

IBP-Bericht Nr. EER-032/2021/951

**Szenarienbewertung für die energetische
Sanierung der städtischen Liegenschaften der
Stadt Oldenburg gemäß BEG 40 EE-Standard**

Durchgeführt im Auftrag der Stadt Oldenburg, Eigenbetrieb Gebäudewirtschaft und Hochbau

Heike Erhorn-Kluttig
Micha Illner
Jessica Preuss

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht Nr. 032/2021/951

Szenarienbewertung für die energetische Sanierung der städtischen Liegenschaften der Stadt Oldenburg gemäß BEG 40 EE-Standard

Energiebedarf und CO₂-Äq.-Emissionen während der Betriebsphase, CO₂-Äq.-Emissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Baukonstruktion und Anlagentechnik sowie Investitions- und Energiekosten

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit schriftlicher Genehmigung des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

Durchgeführt im Auftrag der Stadt Oldenburg, Eigenbetrieb Gebäudewirtschaft und Hochbau

Der Bericht umfasst
131 Seiten Text
68 Tabellen
37 Abbildungen

Heike Erhorn-Kluttig, Micha Illner, Jessica Preuss

Stuttgart, 21. Februar 2021

Institutsleiter

Abteilungsleiter

Bearbeiterin

Prof. Dr.
Philip Leistner

Dr.
Harald Will

Dipl.-Ing.
Heike Erhorn-Kluttig

Inhalt

1	Hintergrund der Untersuchung	4
2	Randbedingungen und Methode	5
2.1	Definition der angestrebten Klimaneutralität	5
2.2	Zu berücksichtigende Gebäude	6
2.3	Energieverbrauch im Ausgangszustand	6
2.4	Berechnung über Typgebäude	7
2.5	Energetische Gebäudeniveaus im Zielzustand	10
2.5.1	Vorstudie zur Festlegung des zukünftig angestrebten energetischen Gebäudeniveaus	10
2.5.2	Beschreibung der baulichen und anlagentechnischen Gebäudequalitäten in der Szenarienbewertung	11
2.6	CO ₂ -Äquivalente der eingesetzten Energieträger	14
2.7	Ermittlung der PV-Erträge	15
2.8	Szenarien	16
2.9	Kosten	17
2.9.1	Bauliche und anlagentechnische Maßnahmen	18
2.9.2	Photovoltaik	23
2.9.3	Energiekosten	24
2.10	Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik	24
2.10.1	Sanierung	25
2.10.2	Neubau	30
2.10.3	Photovoltaik	30
3	Startpunkt	32
4	Szenario 1	36
4.1	Beschreibung des Szenarios	36
4.2	Szenarienergebnisse	36
4.2.1	Endenergiebedarf in der Betriebsphase	36
4.2.2	Treibhausgasemissionen in der Betriebsphase	41
4.2.3	Benötigter Photovoltaikstrom für die Klimaneutralität des Betriebs der städtischen Gebäude	45
4.2.4	Kosten: Investitionskosten und Energiekosten	47
4.2.5	Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik	52
4.3	Fazit des Szenarios	54

5	Szenario 2	56
5.1	Beschreibung des Szenarios	56
5.2	Szenarienergebnisse	56
5.2.1	Endenergiebedarf in der Betriebsphase	56
5.2.2	Treibhausgasemissionen in der Betriebsphase	61
5.2.3	Benötigter Photovoltaikstrom für die Klimaneutralität des Betriebs der städtischen Gebäude	65
5.2.4	Kosten: Investitionskosten und Energiekosten	67
5.2.5	Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik	74
5.3	Fazit des Szenarios	76
6	Szenario 3	78
6.1	Beschreibung des Szenarios	78
6.2	Szenarienergebnisse	78
6.2.1	Endenergiebedarf in der Betriebsphase	78
6.2.2	Treibhausgasemissionen in der Betriebsphase	83
6.2.3	Benötigter Photovoltaikstrom für die Klimaneutralität des Betriebs der städtischen Gebäude	87
6.2.4	Kosten: Investitionskosten und Energiekosten	89
6.2.5	Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik	97
6.3	Fazit des Szenarios	100
7	Vergleich der Szenarien	102
7.1	Betriebsphase	103
7.1.1	Endenergiebedarf	103
7.1.2	Treibhausgasemissionen	107
7.1.3	Benötigte Photovoltaikanlage für die Klimaneutralität in der Betriebsphase	113
7.2	Investitionskosten und Energiekosten	114
7.2.1	Investitions- und Planungskosten	114
7.2.2	Energiekosten	116
7.3	Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Baukonstruktionen und der Anlagentechnik	117
7.4	Zusammenfassung	121
8	Gesamtfazit	124
9	Literatur	129

1 Hintergrund der Untersuchung

Die Stadt Oldenburg steht vor der Aufgabe, ambitionierte Klimaschutzziele innerhalb eines kurzen Zeitrahmens umzusetzen. Dies betrifft nicht zuletzt auch die stadteigenen Liegenschaften. Hier wird angestrebt, sowohl die Sanierung des stadteigenen Gebäudebestands als auch die Neubauten auf dem energetischen Niveau EG 40 EE-Standard durchzuführen. Der EG 40 EE-Standard wird auch Effizienzgebäude 40 Erneuerbare-Energien-Klasse genannt und entspricht dem KfW-Effizienzhaus 40-Standard mit der zusätzlichen Anforderung, dass erneuerbare Energien einen Anteil von mindestens 55 % des für die Wärme- und Kälteversorgung des Gebäudes erforderlichen Energiebedarfs erbringen.

Mithilfe einer Szenarienbewertung wurden vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP drei unterschiedliche Wege hin zur Klimaneutralität des stadteigenen Gebäudebestands untersucht. Insbesondere wurde ermittelt, welcher Endenergiebedarf und welche Treibhausgasemissionen nach den energetischen Sanierungen verbleiben, welche Investitionskosten dabei entstehen und welche verbleibenden Energiekosten dem gegenüberstehen. Die drei Szenarien unterscheiden sich dabei vorrangig bei der Sanierungsrate (Erreichen des Ziels bis 2030, 2035 und 2045). Dabei wurde im Szenario 1 das Zieljahr 2030 gewählt, weil es im von „Fridays For Future“-Oldenburg angestoßenen Prozess zur Schaffung eines Leitbilds für ein klimaneutrales Oldenburg ursprünglich als Zieljahr für ein klimaneutrales Oldenburg gesetzt wurde. Das Zieljahr 2035 im Szenario 2 entspricht dem Beschluss des Oldenburger Stadtrats für ein klimaneutrales Oldenburg. Mit dem Zieljahr 2045 im Szenario 3 wird dem Bericht von „Fridays for Future“-Deutschland [1] zur CO₂-Neutralität Deutschlands Rechnung getragen, in dem von einer Steigerung der Gebäudesanierungsrate von 1 % auf 4 % ausgegangen wird. Ausgehend vom Jahr 2020 würde dies zu einer Komplettsanierung im Jahr 2045 führen.

Die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der energetisch relevanten Baukonstruktionen und der Anlagentechnik – auch graue Energie genannt – wurden überschlägig (als Sockelbetrag) mitbetrachtet. Sie sind jedoch nicht Bestandteil der auf Null zu stellenden Bilanz der Treibhausgasemissionen in den einzelnen Szenarien.

2 Randbedingungen und Methode

Die Szenarienbewertung für die energetische Sanierung der städtischen Liegenschaften der Stadt Oldenburg gliedert sich in acht Schritte, die in Bild 1 dargestellt sind.

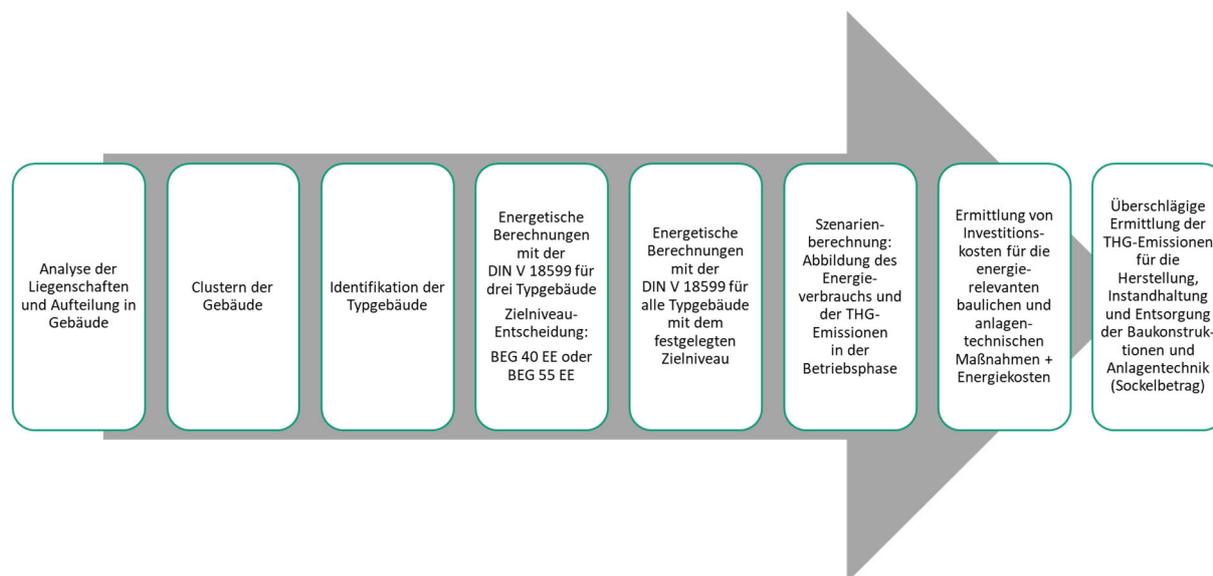


Bild 1:
Arbeitsschritte der Szenarienbewertung für die energetische Sanierung der stadteigenen Gebäude der Stadt Oldenburg auf dem Weg zu einer klimaneutralen Energieversorgung.

2.1 Definition der angestrebten Klimaneutralität

Der Betrieb der stadteigenen Gebäude soll in der Jahresbilanz klimaneutral sein. Dabei werden die gebäudebedingten Energiebedarfe für Heizung, Trinkwarmwasser und ggf. Kühlung, die damit verbundenen Hilfsenergien (inkl. Lüftung, Antriebe und Steuerungen), die Beleuchtung und der nutzerbedingte Strom ermittelt und über CO₂-Äquivalente in Treibhausgasemissionen umgerechnet. Durch energetische Sanierungen und energieeffiziente Neubaukonzepte können die Treibhausgasemissionen verringert werden. Auf den Grundstücken generierte überschüssige Energie kann als Gutschrift in die Bilanz eingehen, z. B. als PV-Strom-Überschuss-Einspeisung.

Die Summe der jährlichen Treibhausgasemissionen aus Energiebedarf und generierter Überschussenergie soll Null betragen. Dabei sollen keine externen Kompensationsmaßnahmen (CO₂-Zertifikate) berücksichtigt werden.

Die Treibhausgasemissionen aus Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Baustoffen und Anlagentechnik (Treibhausgasemissionen aus der sogenannten grauen Energie) sind nicht Teil der angestrebten Klimaneutralität.

Im vorliegenden Bericht werden entsprechend zunächst die sich gemäß Ist-Zustand und geplanten energetischen Sanierungen sowie Neubauten ergebenden Endenergiebedarfe je Jahr innerhalb des Betrachtungszeitraums ermittelt. Über die zugehörigen CO₂-Äquivalente werden daraus die jeweiligen – trotz der eingesetzten hohen energetischen Standards – verbleibenden Treibhausgasemissionen für den Betrieb ermittelt. Abschließend wird berechnet, welche PV-Fläche insgesamt benötigt wird, um die verbleibenden Treibhausgasemissionen des Betriebs der städtischen Gebäude in der Jahresbilanz des Zieljahres auszugleichen. Zusätzlich werden die anfallenden Treibhausgasemissionen aus der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Baustoffen und Anlagentechnik für die energetische Sanierung und die Neubauten ermittelt sowie die dafür entstehenden Investitionskosten und die sich ergebenden reduzierten Energiekosten.

2.2 Zu berücksichtigende Gebäude

Durch die Stadt Oldenburg wurde der zu berücksichtigende Gebäudebestand anhand der Datenbank „Anlage_02_Liegenschaftsdatenbank“ [2] definiert. Dabei werden insgesamt 345 Gebäude berücksichtigt, die sich im Eigentum der Stadt Oldenburg befinden und sowohl eigengenutzt als auch vermietet werden. In der Datenbank enthaltene Gebäude ohne wärmerrelevante Flächen wie z. B. Überdachungen und Abstellgebäude wurden aufgrund ihrer Nutzung aus der Datengrundlage für die Szenarienberechnung entfernt.

2.3 Energieverbrauch im Ausgangszustand

Die Datenbank [2] enthält alle wärmerlevanten Flächen der Gebäude auf Raumebene, die zusammengefasst die beheizte Nettogrundfläche des jeweiligen Gebäudes ergeben. Die gesamte beheizte Nettogrundfläche der betrachteten Gebäude beträgt damit 419.205 m² im Ausgangszustand. Die Energiedaten der Gebäude wurden aus unterschiedlichen Quellen herangezogen (siehe Bild 2).

Beheizte Nettogrundfläche [m²] je Energiedatenquelle

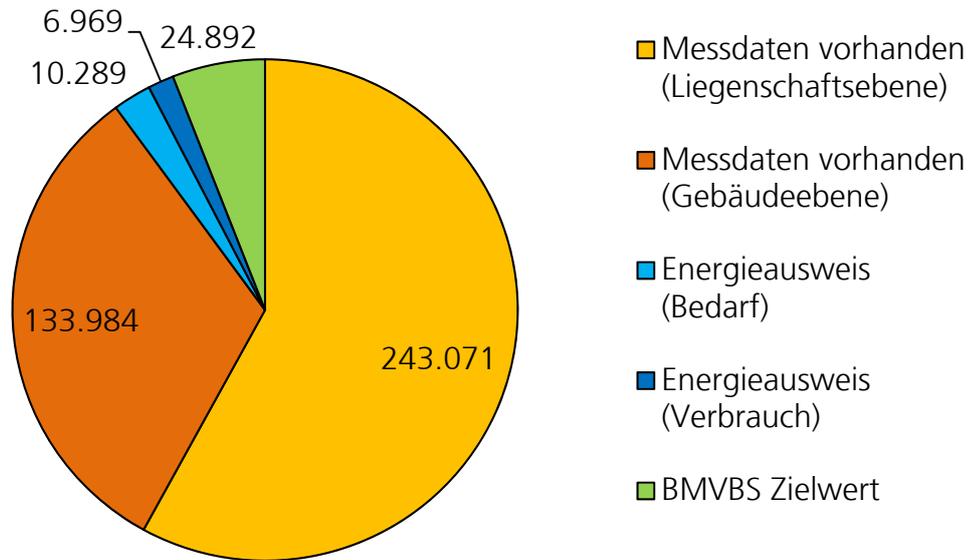


Bild 2:
Verteilung der beheizten Nettogrundflächen im Ausgangszustand nach Energiedatenquelle.

Falls vorhanden, wurden gemessene Verbrauchsdaten verwendet. Die Wärme- und Stromverbräuche aus den Jahren 2018 und 2019 wurden von nahezu allen eigengenutzten Gebäuden bzw. Liegenschaften von der Stadt Oldenburg zur Verfügung gestellt. Bei den gemessenen Stromverbräuchen handelt es sich um die Summe aus gebäudebedingten Verbräuchen und Nutzerstrom. Verbräuche, die nur auf Liegenschaftsebene vorlagen, wurden mithilfe von flächen- und nutzungsabhängigen Faktoren auf einzelne Gebäude aufgeteilt. Bei einigen Gebäuden, die nicht messtechnisch erfasst wurden, konnte auf Wärme- bzw. Stromdaten aus Energieausweisen (sowohl Bedarfs- als auch Verbrauchsausweise) zurückgegriffen werden. Für die fehlenden Energiedaten der übrigen Gebäude (im Wesentlichen fremdvermietete Gebäude) wurden Zielwerte aus der BMVBS-Bekanntmachung [3] eingesetzt. Alle Energiedaten wurden klimabereinigt auf das mittlere Klima der Stadt Oldenburg.

2.4 Berechnung über Typgebäude

Die Szenarien wurden auf der Basis von Typgebäuden berechnet. Dafür wurden die unterschiedlichen Gebäude anhand ihrer Nutzung in Cluster unterteilt. Die Gebäudenutzung und die damit verbundenen unterschiedlichen Nutzungsprofile beeinflussen wesentlich den Energiebedarf bzw. -verbrauch eines Gebäudes. Aufgrund der Höhe der Energieverbräuche der Cluster und nach Abstimmung mit der Stadt Oldenburg wurden folgende Cluster für eine detaillierte Bewertung festgelegt:

- **Kindertagesstätten**
- **Grundschulen**
- **Weiterführende Schulen** (z. B. Gymnasien, Realschulen, Hauptschulen, etc.)
- **Berufsschulen**
- **Sporthallen**
- **Verwaltungsgebäude**

Für jedes der sechs ausgewählten Cluster wurde ein Typgebäude bestimmt, das den jeweiligen Gebäudebestand der Stadt Oldenburg abbildet. Dafür machte das Fraunhofer IBP anhand der Energieverbräuche und der Gebäudegröße Vorschläge. Die Stadt Oldenburg wählte das finale Typgebäude aus und stellte Planunterlagen zur Verfügung. Liegenschaften, die nicht in den detailliert zu bewertenden Clustern enthalten sind, wurden dem sogenannten **Restcluster** zugeordnet und die Veränderung der Energiebedarfe vereinfacht über die Mittelwerte der Energiebedarfe der sechs detailliert betrachteten Cluster für die Jahre 2021 bis 2030, 2035 und 2045 abgebildet.

Innerhalb der Cluster wird unterschieden in:

- Zu sanierende Gebäude; weitere Aufteilung in:
 - Sanierung auf EG 40 EE-Niveau:
 - Gebäude mit Außenwanddämmung als Wärmedämmverbundsystem.
 - Gebäude mit verklankertem zweischaligen Mauerwerk: die Wärmedämmung erfolgt als Hohlraumdämmung (wo möglich) und Innendämmung.
 - Gebäude unter Denkmalschutz: hierfür werden reduzierte Dämmstoffstärken und damit U-Werte in Absprache mit der Stadt Oldenburg eingesetzt.
 - Geplante Neubauten auf EG 40 EE-Niveau: die geplanten Neubauflächen werden vereinfacht linear verteilt bis zum Jahr 2030 eingerechnet.
- Nicht zu sanierende Gebäude: der Energieverbrauch und die Energieträger dieser Liegenschaften bleiben unverändert.

- Szenarien 1 (Zieljahr 2030) und 2 (Zieljahr 2035): alle Gebäude, die 2011 oder später erbaut wurden. Das Bezugsjahr wurde basierend auf der Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2009 [4] festgelegt. Dazu wurde noch eine mittlere Bauzeit von zwei Jahren addiert.
- Szenario 3 (Zieljahr 2045): alle Gebäude, die 2018 oder später erbaut wurden. Das Bezugsjahr wurde basierend auf der Energieeinsparverordnung (EnEV) von 2016 (Verschärfung der EnEV 2014 [5]) festgelegt. Dazu wurde noch eine mittlere Bauzeit von zwei Jahren addiert. Die zusätzlichen Sanierungen in Szenario 3, also alle Gebäude, die zwischen 2011 und 2017 erbaut wurden, werden zwischen 2036 und 2045 saniert.

Die energetische Bewertung der Typgebäude und der unterschiedlichen Sanierungsvarianten erfolgte mit der Norm DIN V 18599 [6], die auch für die Berechnung von Energieausweisen von Nichtwohngebäuden vorgeschrieben ist. Die für das Typgebäude berechneten Energiekennwerte wurden über die Nettogrundflächen je Cluster auf das Cluster hochgerechnet.

Die geometrischen Kennwerte der Typgebäude sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1:
Geometrische Kennwerte der Typgebäude für die sechs detailliert zu bewertenden Cluster.

Typgebäude	Wärmetauschende Hüllflächen					Beheizte Netto-raumfläche m ²	Netto-volumen m ³	AV-Verhältnis m ⁻¹
	Dach / oberste Geschossdecke	Außenwand	Fenster inkl. Dachfenster	Kellerdecke / Bodenplatte / Wand gegen Erdreich	Wand gegen unbeheizt			
	m ²	m ²	m ²	m ²	m ²			
Kindertagesstätten: Ernst-Löwenstein-Straße 56	563	302	123	555	-	592	1.823	0,68
Grundschulen: Alexanderstraße 500	1.547	766	370	1.547	154	1.438	4.550	0,77
Weiterführende Schulen: Theodor-Heuss-Straße 7	2.040	1.790	1.335	2.049	-	4.047	14.029	0,41
Berufsschulen: Ammerländer Heerstraße 33-39	1.616	1.220	764	1.504	438	4.368	15.759	0,28
Sporthallen: Hauptstraße 120	690	498	155	690	24	634	2.900	0,57
Verwaltungsgebäude: Pferdemarkt 14	989	1.383	720	1.160	141	3.365	10.209	0,34

2.5 Energetische Gebäudeniveaus im Zielzustand

2.5.1 Vorstudie zur Festlegung des zukünftig angestrebten energetischen Gebäudeniveaus

In einer Vorstudie wurde untersucht, welches energetische Zielniveau die sanierten (und neugebauten) Gebäude erreichen sollten – EG 40 EE oder EG 55 EE gemäß Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) [7]. Beim EG 40 EE-Niveau muss der Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) [8] um 60 % unterschritten werden, beim EG 55 EE-Niveau um 45 %. Die Bezeichnung „EE“ und damit auch eine erhöhte Förderquote erhält ein Gebäude, wenn mehr als 55 % der Wärme- und Kälteversorgung eines Gebäudes auf erneuerbaren Energien basiert. Dabei war bei beiden Effizienzniveaus das Ziel, zusätzlich zum jeweilig stark reduzierten Gebäudeenergiebedarf eine in der Jahresbilanz klimaneutrale Energieversorgung durch die Einspeisung oder Eigennutzung von auf den Dächern mit Photovoltaik erzeugtem erneuerbaren Strom zu erreichen.

Für das bessere Gebäudeniveau EG 40 EE ergaben sich für die drei zur Voruntersuchung ausgewählten Typgebäude (Grundschule, Weiterführende Schule und Sporthalle) und die ausgewählte Anlagentechnik (Beheizung über eine Luft-Wasser-Wärmepumpe) höhere bauliche Sanierungskosten (KG 300), aber geringere anlagentechnische Sanierungskosten (KG 400) aufgrund der etwas kleineren installierten Heizleistung. Die benötigte Photovoltaikfläche zur Erreichung der Klimaneutralität und damit deren Kosten war für das Gebäudeniveau EG 55 EE leicht höher. Insgesamt ergaben sich etwas geringere Investitionskosten für das EG 55 EE-Niveau, der Unterschied betrug zwischen 3,0 und 4,7 % der energetischen Sanierungskosten. Demgegenüber waren die jährlichen Energiekosten inklusive Berücksichtigung der Photovoltaik-Stromeigennutzung und -einspeisung zwischen 7,7 und 19,0 % höher für das EG 55 EE-Niveau.

Aufgrund der geringen Differenzkosten konnte das EG 40 EE-Gebäudeniveau als zukünftiger Zielzustand für die Sanierungen und Neubauten bestätigt werden und wurde deshalb auch in der Szenarienbewertung eingesetzt. Damit wird u. a. folgenden Punkten Rechnung getragen:

- Geringere benötigte PV-Fläche auf den Dächern und ggf. Fassaden zur Sicherstellung der Klimaneutralität, die insgesamt auch den Nutzerstrom beinhalten soll.
- Geringerer Einfluss von höheren Energiepreisen in der Zukunft auf den Stadthaushalt.
- Höhere Förderzuschüsse für den effizienteren Energiestandard.

2.5.2 Beschreibung der baulichen und anlagentechnischen Gebäudequalitäten in der Szenarienbewertung

Für die Szenarienbewertung erfolgte die Festlegung der U-Werte für das EG 40 EE-Sanierungs- und Neubauniveau je Typgebäude (und damit auch Gebäudecluster) mit dem Ziel, die vorgegebenen \bar{U}_{opak} und $\bar{U}_{\text{transparent}}$ einzuhalten und möglichst geringfügig zu unterschreiten. Dadurch ergeben sich je nach Typgebäude und Hüllflächenanteile leicht unterschiedliche U-Werte für die einzelnen Hüllflächen. Die zweite Anforderung, der vorgegebene maximale Primärenergiebedarf in Abhängigkeit vom Referenzgebäude, wird – wenn dabei noch nötig – über kleine Photovoltaikflächen erreicht. Tabelle 2 stellt die für die Studie festgelegten U-Werte zum Erreichen des EG 40 EE-Standards je Typgebäude zusammen. In der späteren Umsetzung können die U-Werte an jedes einzelne zu sanierende und neu zu bauende Gebäude angepasst werden. Die U-Werte aus Tabelle 2 sind jedoch die Grundlage für die baulichen Investitionskosten und die Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der energetisch relevanten Baukonstruktionen in der Szenarienbewertung.

Aufgrund eines hohen Anteils von Gebäuden mit zweischaligem Mauerwerk mit Klinkerverblendung im Gebäudebestand der Stadt Oldenburg wurde ermittelt, welcher U-Wert durch Einblasdämmung in den Hohlraum und Innendämmung erreicht werden kann. Der dadurch mögliche U-Wert von $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ liegt unter den angesetzten Außenwand-U-Werten von vier der sechs Typgebäude. Damit ist hier eine getrennte energetische Berechnung für die Gebäude mit zweischaligem Mauerwerk und Klinkerverblendung nicht nötig. Bei den Investitionskosten wird die abweichende Dämmausführung der Außenwand bei gleichem U-Wert jedoch entsprechend berücksichtigt. Lediglich bei den Weiterführenden Schulen und den Verwaltungsgebäuden wird für die Sanierung auf EG 40 EE-Standard ein noch besserer Außenwand-U-Wert mit $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ angesetzt. Deshalb wurde für den Gebäudeanteil mit verklinkertem zweischaligen Mauerwerk eine zusätzliche Berechnung mit einem Außenwand-U-Wert von $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ durchgeführt und entsprechend bei den Endenergieergebnissen und resultierenden Treibhausgasemissionen im Betrieb, den Investitionskosten, den Energiekosten und den Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der energetisch relevanten Baukonstruktionen und Anlagentechnik berücksichtigt.

Tabelle 2:
Wärmedurchgangskoeffizienten der Hüllflächen, pauschaler Wärmebrückenansatz und Luftdichtheitskennwert zu Erreichung des EG 40 EE-Standards je Typgebäude.

Typgebäude	U-Wert [W/m ² K]					Pauschaler Wärmebrücken- ansatz [W/m ² K]	Luftdichtheit n ₅₀ [h ⁻¹]
	Dach/oberste Geschoss- decke	Fenster	Wand	Keller- decke	Boden- platte		
Kindertages- stätte	0,15	0,94	0,22	0,20	0,37	0,03	0,6
Grundschule	0,13	0,94	0,22	0,20	0,30		
Weiterfüh- rende Schule	0,15	0,94	0,15/0,18*	0,20	0,37		
Berufsschule	0,15	0,94	0,22	0,20	0,37		
Sporthalle	0,15	0,90	0,20	-	0,37		
Verwaltungs- gebäude	0,15	0,94	0,15/0,18*	0,20	0,37		

* Für die Gebäude mit zweischaligem Mauerwerk und Klinkerverblendung wurde hier eine Ausführung mit einem leicht höheren Außenwand-U-Wert von $0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ berechnet.

Für die denkmalgeschützten Gebäude wurden die möglichen thermischen Hüllflächenqualitäten auf Basis einer Rücksprache mit dem örtlichen Denkmalschutzamt festgelegt, siehe Tabelle 3. Diese sind unabhängig vom Typgebäude, weisen naturgemäß schlechtere U-Werte als die Sanierung auf EG 40 EE-Standard auf und können damit den EG 40 EE-Standard nicht einhalten. Die angesetzten U-Werte sollen auf der „sicheren Seite“ die durchschnittlichen Möglich-

keiten im Denkmalschutz abbilden. Bei der Umsetzung muss im Einzelfall berücksichtigt werden, welche Dämmstärken und -materialien bzw. Fensterqualitäten eingesetzt werden können. Auch wenn der EG 40 EE-Standard nicht eingehalten werden kann, stehen andere Fördermöglichkeiten speziell für denkmalgeschützte Gebäude und auch für andere EG-Sanierungsniveaus (z. B. EG 70) bei der KfW und der BAFA zur Verfügung.

Tabelle 3:
Wärmedurchgangskoeffizienten der Hüllflächen, pauschaler Wärmebrückenansatz und Luftdichtheitskennwert für die energetische Sanierung der denkmalgeschützten Gebäude.

Typgebäude	U-Wert [W/m ² K]					Pauschaler Wärmebrücken- ansatz [W/m ² K]	Luft- dicht- heit n ₅₀ [h ⁻¹]
	Dach/oberste Geschoss- decke	Fenster	Wand	Keller- decke	Boden- platte		
Kindertages- stätte	0,20/0,14	1,1	0,39	0,23	0,37	0,15	1
Grundschule							
Weiterfüh- rende Schule							
Berufsschule							
Sporthalle							
Verwaltungs- gebäude							

Bei der eingesetzten Anlagentechnik für die Sanierungen und Neubauten gelten folgende Randbedingungen:

- Heizenergieerzeuger:
 - 90 % Außenluft-Wasser-Wärmepumpe,
 - 10 % Erdreich-Wasser-Wärmepumpe.
- Ersatz der Bestandsheizkörper durch neue Heizkörper, aber Weiternutzung der Heizungsverteilung nach der Sanierung.
- Lüftungsanlagen entsprechend den Angaben der Stadt Oldenburg im Bestand, für die energetische Sanierung und die Neubauten. Die Angaben basieren auf Anteilen von Lüftungsanlagen mit und ohne Wärmerückgewinnung für unterschiedliche Nutzungen, z. B. Schulräume, Sporthallen, Verwaltungsgebäude, etc.
- Trinkwarmwasserbereitung je Nutzung entsprechend den Angaben der Stadt Oldenburg im Bestand, für die energetische Sanierung und die

Neubauten. Dabei kommen sowohl zentrale Erzeugung in Kombination mit der Heizung, dezentrale (elektrische Durchlauferhitzer) als auch Frischwasserstationen zum Einsatz.

- Kühlung von einzelnen Räumen entsprechend den Angaben der Stadt Oldenburg im Bestand, für die energetische Sanierung und die Neubauten, z. B. Serverräume und Besprechungsräume.
- Umrüstung der Beleuchtung auf LED durch neue LED-Leuchten.
- Gebäudeautomatisierung entsprechend den Angaben der Stadt Oldenburg im Bestand, für die energetische Sanierung und die Neubauten. Dabei wird in die Regelung der Heizung, Belüftung, Beleuchtung und den Sonnenschutz unterschieden. Insgesamt bewegt sich der geplante Automatisierungsgrad zwischen Klasse B (Heizungsregelung der Sporthallen), C und D.

Die Nutzungsprofile der einzelnen Zonen der Typgebäude aus der DIN V 18599 wurden basierend auf Informationen der Stadt Oldenburg bezüglich Soll-Raumtemperaturen und Betriebszeiten angepasst.

2.6 CO₂-Äquivalente der eingesetzten Energieträger

Die Treibhausgasemissionen im Ausgangsjahr 2021 und in den weiteren Jahren wurden für die Energieträger Erdgas und Biomasse auf Basis der CO₂-Äquivalente aus der DIN V 18599-1:2018 [6] ermittelt. Für den Energieträger Strom wurden die zeitlich veränderbaren CO₂-Äquivalente gemäß IINAS [9] eingesetzt, Zwischenwerte wurden jeweils linear interpoliert. Der erzeugte erneuerbare PV-Strom wird mit dem negativen Kennwert der CO₂-Äquivalente des Stroms angerechnet. Damit ist es bezüglich der Treibhausgasemissionen egal, ob der PV-Strom selbst genutzt wird oder eingespeist. Tabelle 4 enthält die verwendeten CO₂-Äquivalente für die Betrachtungsjahre 2021 bis 2045.

Tabelle 4:
Verwendete CO₂-Äquivalente zur Ermittlung der Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gebäude für die Energieträger Strom [9] sowie Erdgas und Biomasse [6].

Jahr	CO ₂ -Äquivalente [g/kWh]			
	Netzstrom	Strom-einspeisung	Erdgas	Biomasse
2021	354	-354	240	40
2022	344	-344	240	40
2023	335	-335	240	40
2024	326	-326	240	40
2025	316	-316	240	40
2026	307	-307	240	40
2027	298	-298	240	40
2028	288	-288	240	40
2029	279	-279	240	40
2030	270	-270	240	40
2031	258	-258	240	40
2032	246	-246	240	40
2033	234	-234	240	40
2034	222	-222	240	40
2035	210	-210	240	40
2036	198	-198	240	40
2037	186	-186	240	40
2038	175	-175	240	40
2039	163	-163	240	40
2040	151	-151	240	40
2041	139	-139	240	40
2042	127	-127	240	40
2043	115	-115	240	40
2044	103	-103	240	40
2045	91	-91	240	40

2.7 Ermittlung der PV-Erträge

Die Berechnung der PV-Erträge stützt sich in allen drei Szenarien auf die nachfolgenden Randbedingungen:

- Eine PV-Studie für den Standort Oldenburg wurde mit dem Computerprogramm PV*Sol [10] durchgeführt.

- Dabei wurden PV-Module mit 350 W_p und einer Modulfläche von 1,71 m² angesetzt.
- Die Studie ergab, dass sich für unterschiedliche Aufstellungsarten ein mittlerer Ertrag von rund 111 kWh/m² Dachfläche und Jahr ergibt. Hierfür wurden die folgenden zwei häufig auftretenden Aufstellungsarten betrachtet:
 - Sattelaufstellung auf einem Flachdach mit 10 ° Neigung in Ost- und Westrichtung. Für das Flachdach wurde von einer Dachgröße von 900 m² ausgegangen. Bei den PV-Modulen wurde ein Abstand von 1,5 m zu den Dachrändern eingehalten, drei Wartungsgänge mit je 1 m Breite eingeplant und der Abstand zwischen den Reihen der PV-Module mit 30 cm angesetzt.
 - Anbringung auf einem Satteldach mit 30 ° Dachneigung in Ost- und Westrichtung. Dabei wurden für die Berechnung des Ertrags auf dem Satteldach mit 225 m² je Dachseite zu den Dachrändern ein Abstand von 60 cm eingehalten und in der Mitte der Anlage ein Wartungsgang von 1 m Breite eingeplant.
- In Absprache mit der Stadt Oldenburg wurde je Szenario die benötigte mit PV belegte Dachfläche ermittelt, um den Energieverbrauch für den Betrieb der gesamten städtischen Gebäude im Zieljahr klimaneutral zu stellen. Zusätzlich wurden noch der Anteil der belegten Dachfläche an der gesamten, über die Typgebäude abgeschätzten verfügbaren und geeigneten Dachfläche und die benötigte Nennleistung der PV in kW_p berechnet.

2.8 Szenarien

Insgesamt drei Szenarien hin zum klimaneutralen Gebäudebestand sollen vom Fraunhofer IBP bewertet werden. Sie wurden mit der Stadt Oldenburg abgestimmt und unterscheiden sich in folgenden Bereichen:

- Zieljahr des Szenarios und damit jährliche Sanierungsrate. Das Startjahr mit unverändertem Energiebedarf ist jeweils 2021.
- Anzahl und Fläche der zu sanierenden Gebäude. In den Szenarien 1 und 2 werden die Gebäude mit Baujahr bis einschließlich 2010 saniert. Darin enthalten sind 282 Gebäude und 343.104 m² beheizte Nettoraumfläche. Im Szenario 3 werden zusätzlich die Gebäude mit Baujahren ab 2011 bis 2017 saniert mit einer Anzahl von 21 Gebäuden und 32.531 m² beheizter Nettoraumfläche.

Damit ergeben sich folgende Sanierungsraten, jährlich zu sanierende Gebäude und jährlich zu sanierende beheizte Gebäudenettoraumflächen:

- **Szenario 1: Zieljahr 2030**

- Die jährliche Sanierungsrate beträgt 11,11 %/a bei einer durchgeführten Komplettsanierung gemäß Kapitel 2.5. ($1 / 9 \text{ Jahre} * 100$).
- Es müssen pro Jahr 31,3 Gebäude saniert werden.
- Die zu sanierende beheizte Nettoraumfläche pro Jahr beträgt 38.123 m².

- **Szenario 2: Zieljahr 2035**

- Die jährliche Sanierungsrate beträgt 7,14 %/a bei einer durchgeführten Komplettsanierung gemäß Kapitel 2.5. ($1 / 14 \text{ Jahre} * 100$).
- Es müssen pro Jahr 20,1 Gebäude saniert werden.
- Die zu sanierende beheizte Nettoraumfläche pro Jahr beträgt 24.507 m².

- **Szenario 3: Zieljahr 2045**

- Die mittlere jährliche Sanierungsrate beträgt 4,17 %/a bei einer durchgeführten Komplettsanierung gemäß Kapitel 2.5. ($1 / 24 \text{ Jahre} * 100$).
- Es müssen pro Jahr im Mittel 12,6 Gebäude saniert werden.
- Die zu sanierende beheizte Nettoraumfläche pro Jahr beträgt im Mittel 15.651 m².

Dabei werden die zu sanierenden Gebäude bis einschließlich Baujahr 2010 im gesamten Zeitraum 2022 bis 2045 saniert, die zu sanierenden Gebäude mit Baujahren ab 2011 bis einschließlich 2017 im Zeitraum 2036 bis 2045. Damit ergibt sich für letztere eine eigene Sanierungsrate von $1 / 10 \text{ Jahre} * 100 = 10 \text{ %/a}$ bei einer Anzahl von insgesamt 21 zu sanierenden Gebäuden.

Zum Vergleich: Die Sanierungsrate der deutschen Wohn- und Nichtwohngebäude beträgt seit Jahren ungefähr 1 %/a, siehe [11].

2.9 Kosten

In Absprache mit der Stadt Oldenburg wurde bei der Betrachtung der finanziellen Auswirkung der energetischen Gebäudesanierungen (Investitionskosten für die Gebäudehüllflächenoptimierung und für die Anlagentechnik sowie die

Energiekosten) auf die Erstellung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung verzichtet. Die Investitionskosten und Energiekosten wurden statisch zum Zeitpunkt der Berechnungen (letztes Quartal 2021) betrachtet. Dabei wurden keine Fördergelder in Ansatz gebracht. Hintergründe dafür sind:

- Der Anlass der hier betrachteten energetischen Sanierungen ist nicht die Betriebswirtschaft (ein wirtschaftlicher Gewinn) sondern der Klimaschutz.
- Eine hohe energetische Qualität eines Gebäudes lässt sich in der Regel nur durch eine gesamtheitliche Sanierung erreichen, die mit hohen Investitionskosten verbunden ist. Diese sind oftmals so hoch, dass bei den derzeitigen Energiepreisen keine Deckung der Investitionskosten zu erwarten ist.
- Die Entwicklung der Energiepreise schwankt derzeit erheblich und lässt keine sichere Prognose zu.
- Für die Zukunft kann nicht vorausgesagt werden, welche Förderungen zur Schaffung von Anreizen noch zu erwarten sind bzw. gestrichen werden.
- Weiter positive Effekte einer Gebäudesanierung (Erhöhung des Komforts, Verbesserung der Luftqualität und Schutz vor Bauschäden) können nicht monetär bewertet werden.

2.9.1 Bauliche und anlagentechnische Maßnahmen

Für die energetisch relevanten baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen werden die Vollkosten der Maßnahmen für die Kostengruppen (KG) 300 „Baukonstruktionen“ und 400 „technische Anlagen“ bestimmt. Bei den Vollkosten handelt es sich um die Summe der Kosten aller Arbeiten, welche einer Maßnahme zugeordnet werden können und für deren Durchführung notwendig sind oder typischerweise als Bestandteil dieser Maßnahme gesehen werden. Die Vollkosten ergeben sich aus der Summe der Soviesokosten und der energetisch bedingten Kosten. Generell nicht in den Kostenansätzen enthalten sind:

- Planungskosten
- Gerüstkosten
- Kosten außerhalb der KG 300 und 400
- Kosten, die nicht energetischen Maßnahmen zugeordnet werden können

Eine exakte Definition der beinhalteten Kosten je Bauteil und spezifischer Anlagentechnik ist in [12] enthalten. Dabei wird auf Erfahrungswerte des Fraunhofer IBPs und auf Literatur [13] bis [16] zurückgegriffen. Nachträglich erfolgt ein pauschaler Aufschlag von 25 % für die Planungskosten (KG 700). Die Gerüstkosten wurden auf Wunsch des Auftraggebers separat ausgewiesen und hinzuaddiert.

Bei den Kostenansätzen handelt es sich um Bruttokosten, welche mit den entsprechenden Faktoren (125,4 % mit dem Basisjahr 2015) auf das Jahr 2021 und die Stadt Oldenburg (Regionalfaktor 0,852) beaufschlagt wurden. Bei den Neubauten werden die Mehrkosten gegenüber dem bisherigen Neubaustandard der Stadt Oldenburg bewertet. Da die Neubauten schon jetzt als Passivhäuser projektiert werden, fallen im Bereich der energetischen Qualität der Bauteile keine Mehrkosten an. Im Bereich der Wärmeversorgung fallen für die im EG 40-Standard angesetzten Wärmepumpen Mehrkosten im Vergleich zum derzeit häufig umgesetzten Anschluss der neuen Gebäude auf Passivhaus-Niveau an die bestehenden Wärmeerzeuger benachbarter Gebäude an.

Die Stadt Oldenburg verfügt über einen hohen Anteil an Gebäuden, die mit Verblenderfassaden ausgestattet sind und deshalb nicht von außen gedämmt werden sollen. Für diese Außenwände wurde ermittelt, welche davon für die Dämmung im Zwischenraum eines zweischaligen Mauerwerks geeignet sind und welche rein über eine Innendämmung energetisch ertüchtigt werden müssen. Auf Basis der vorliegenden Nettoraumflächen der Gebäude, welche über Verblenderfassaden verfügen und über die Kombination aus Hohlraumdämmung und Innendämmung bzw. rein über Innendämmung ertüchtigt werden müssen, wurde clusterscharf ermittelt, welche Kosten für die Dämmung der Verblenderfassaden im Clustermittel anfallen.

Die Kostenansätze beinhalten Preisspannen, die sich aus unterschiedlichen Gründen ergeben:

- Bei der Sanierung von opaken Bauteilen werden die für die Erreichung des EG 40-Standards notwendigen U-Werte erreicht. Je nach Typgebäude (Kinderbetreuungseinrichtung, Grundschule, Verwaltungsgebäude, etc.) gibt es aufgrund der Baujahre der Gebäude unterschiedliche mittlere Ausgangszustände der Hüllflächen, welche bei einer Sanierung mit unterschiedlichen, zusätzlichen Dämmstoffdicken auf das gewünschte Sanierungsniveau gebracht werden. Dadurch ergibt sich eine Preisspanne bei den Kostenansätzen.
- Bei der Sanierung der Fenster sind die Kostenansätze abhängig von der mittleren Fenstergröße des jeweiligen Typgebäudes. Bei Typgebäuden mit durchschnittlich größeren Fenstern fallen die Quadratmeterkosten für die Fenster geringer aus.
- Die Kostenspannen bei den Lüftungsanlagen (spezifische Kosten hier bezogen auf den Quadratmeter Nettogrundfläche) ergeben sich aus

den nutzungsspezifischen Anforderungen an die Luftvolumenströme der Typgebäude.

- Der Kostenansatz der LED-Beleuchtung beruht auf einem vollständigen Austausch der Bestandsleuchten gegen neue LED-Leuchten. Die Kosten-spanne für die LED-Beleuchtung ergibt sich aus den nutzungsspezifischen Randbedingungen der Typgebäude. Je nach Nutzung der Räume müssen unterschiedliche Beleuchtungsstärken erreicht werden, was in unterschiedlichen installierten Leistungen der Beleuchtung resultiert.
- Bei den Wärmeerzeugern Luft-Wasser-Wärmepumpe und Sole-Wasser-Wärmepumpe wurde ebenfalls eine spezifische Kostendegression in Euro/kW_{th} mit steigender Wärmeleistung angesetzt. Somit kosten kleine Wärmeerzeuger wie z. B. in der „Kinderbetreuungseinrichtung“ spezifisch mehr als dies für große Gebäude wie z. B. die „Berufsschule“ der Fall ist.

Da sich bei Sanierungen historischer Bausubstanz häufig spezielle Anforderungen aufgrund der zu erhaltenden Bausubstanz stellen, muss teilweise eine angepasste Bau- und Handwerkstechnik angewendet werden. Auch bei der Auswahl der Baumaterialien kann es zu Einschränkungen aufgrund besonderer Anforderungen kommen. Aus diesem Grund wurden bei Sanierungen an denkmalgeschützten Gebäuden die Kosten der sich bei gewöhnlichen Sanierungen ergebenden Kostenansätze mit dem Faktor 2 multipliziert.

Die Kostenansätze für die Sanierung werden nachfolgend beschrieben.

- Die Kostenspannen für die Sanierungen der Bauteile im EG 40 EE-Standard sind in Tabelle 5 dargestellt. Für die Sanierung der denkmalgeschützten Gebäude sind die Kostenspannen in Tabelle 6 enthalten.
- Die sich aufgrund der energetischen Sanierung ergebenden Kostenspannen für die Wärmeerzeuger sind für den EG 40 EE-Standard in Tabelle 7 und für die denkmalgerechte Sanierung in Tabelle 8 eingetragen.
- Die Kostenspannen für die Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, die LED-Beleuchtung, den Ersatz des Sonnenschutzes und den Austausch der Bestandsheizkörper, welche im Rahmen der EG 40 EE-Sanierung eingebaut werden, sind in Tabelle 9 enthalten. Für Sanierungen an denkmalgeschützten Gebäuden befinden sich diese Informationen in Tabelle 10.

Für die energetischen Sanierungsmaßnahmen ist die Einrüstung der betreffenden Gebäude notwendig. Die Kosten für diese Gerüste wurde anhand [13] ermittelt und unterscheiden sich für die betrachteten Typgebäude (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 5:
Kostenspannen (brutto) für die Sanierung von Bauteilen im EG 40 EE-Standard.

Bauteil	Sanierungskosten im EG 40 EE-Standard [€/m ² _{Bauteil}]	Sanierungskosten im EG 40 EE-Standard für Szenario 3 Phase 2 (ergänzende Dämmung von bereits gedämmten Gebäuden der Baujahre 2011 bis 2017) [€/m ² _{Bauteil}]
Dach	205 – 208	168
Oberste Geschossdecke	79 – 88	40 – 50
Außenwand	127 – 155	109 – 127
Außenwand mit zweischaligem Mauerwerk	154 – 217	137
Wand gegen Erdreich	134 – 148	-
Kellerdecke	177 – 181	-
Kellerboden gegen Erdreich	133	-
Fenster	544 – 656	544 – 656
Innenwand an unbeheizte Zonen	67 – 79	-

Tabelle 6:
Kostenspannen (brutto) für die Sanierung von Bauteilen an denkmalgeschützten Gebäuden.

Bauteil	Sanierungskosten in denkmalgeschützten Gebäuden [€/m ² _{Bauteil}]
Dach	369 – 390
Oberste Geschossdecke	167
Außenwand	233
Außenwand mit zweischaligem Mauerwerk	252 – 306
Kellerdecke	181
Kellerboden gegen Erdreich	267
Fenster	983 – 1.323
Innenwand an unbeheizte Zonen	148

Tabelle 7:
 Kostenspannen (brutto) für die im Rahmen des EG 40 EE-Standards verbauten
 Wärmeerzeuger.

Anlagentechnische Komponente	Sanierungskosten im EG 40 EE-Standard
Luft-Wasser-Wärmepumpe [€/kW _{th}]	658 – 1.091
Sole-Wasser-Wärmepumpe [€/kW _{th}]	1.543 – 2.599

Tabelle 8:
 Kostenspannen (brutto) für die Sanierung von Wärmeerzeugern in denkmalge-
 schützten Gebäuden.

Anlagentechnische Komponente	Sanierungskosten in denkmalgeschützten Gebäuden
Luft-Wasser-Wärmepumpe [€/kW _{th}]	610 – 1.035
Sole-Wasser-Wärmepumpe [€/kW _{th}]	1.514 – 2.367

Tabelle 9:
 Kostenspannen (brutto) für die im Rahmen der EG 40 EE-Sanierung verbauten
 Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung, LED-Beleuchtung, Sonnenschutz
 (Ersatzmaßnahme) und den Austausch der Bestandsheizkörper.

Anlagentechnische Komponente	Sanierungskosten im EG 40 EE-Standard [€/m ² _{NGF}]
Lüftungsanlagen mit WRG	11 – 148
LED-Beleuchtung	25 – 43
Sonnenschutz (Ersatz)	43 – 80
Heizkörper (Austausch)	20 – 38

Tabelle 10:

Kostenspannen (brutto) für die im Rahmen von Sanierungen an denkmalgeschützten Gebäuden anfallenden Kosten für den Einbau der LED-Beleuchtung, Sonnenschutz (Ersatzmaßnahme) und den Austausch der Bestandsheizkörper.

Anlagentechnische Komponente	Sanierungskosten im Denkmalschutz [€/m ² _{NGF}]
Lüftungsanlagen mit WRG	0 – 148
LED-Beleuchtung	25 – 43
Sonnenschutz (Ersatz)	86 – 159
Heizkörper (Austausch)	26 – 50

Tabelle 11:

Kosten (brutto) für die im Rahmen von Sanierungen notwendigen Gerüste an den Typgebäuden.

Typgebäude bzw. Cluster	Gerüstkosten für die energetische Sanierung [€/m ² _{NGF}]
Kindertagesstätten	21
Grundschulen	21
Weiterführende Schulen	21
Berufsschulen	21
Sporthallen	14
Verwaltungsgebäude	15
Restcluster	18

2.9.2 Photovoltaik

Für die Kosten der Photovoltaik wurde ein Ansatz in Abhängigkeit der installierten Nennleistung gewählt. Dafür wurde die jeweilig im Szenario ermittelte Gesamtnennleistung zum Erreichen des Ziels Klimaneutralität durch die Anzahl der zu sanierenden und neuzubauenden Gebäude geteilt und so eine mittlere Nennleistung je Gebäude für jedes Szenario ermittelt. Für diese wurden die Kosten je kW_p basierend auf [17] ermittelt und mit dem Kostenfaktor für Oldenburg multipliziert, siehe Tabelle 12.

Tabelle 12:
Kosten für die Photovoltaik (brutto) je Szenario.

	Photovoltaikkosten [€/kW _p]
Szenario 1	983
Szenario 2	978
Szenario 3	970

2.9.3 Energiekosten

Die für die Szenarienberechnungen anzusetzenden Energiepreise wurden durch die Stadt Oldenburg zur Verfügung gestellt und teilweise aus Literaturquellen ([18], [19]) entnommen. Für die Energiekosten wird gemäß Absprache mit den Vertretern der Stadt Oldenburg keine Veränderung der Kosten über die Jahre angesetzt, die Energiepreise pro Einheit verbleiben folglich statisch.

Tabelle 13:
Energiepreise (brutto), gültig für alle Szenarien.

Energieträger	Energiepreis [€/MWh]
Erdgas	48,74
Strom*	233,11
Wärmepumpenstrom	209,91
Holzhackschnitzel	14,65
Holzpellet	41,83
Scheitholz**	63,90
PV-Einspeisung***	52,70

* Mittelwert aus dem Strompreis für Verwaltung und Schulen/Kindertagesstätten und Sport-
hallen.

** Marktpreise Energieholz Stand September 2021 [18].

*** Prognose der Einspeisevergütung für Ende 2021 auf Basis der derzeitigen Degression und
festen Einspeisevergütung gemäß [19].

2.10 Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik

Die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Bauteile und Anlagentechnik (KG 300 und KG 400) verursachen Energieaufwände (die sogenannte graue Energie) und entsprechende Treibhausgasemissionen, die für die Szenarienberechnung als zusätzlicher Treibhausgas-Betrag für die unterschiedlichen Sanierungstiefen und die Ersatzneubauten ermittelt werden. Diese Treibhausgasemissionen sind für einen nennenswerten Anteil der gesamten Treibhaus-

gasemissionen eines Gebäudes in dessen Lebenszyklus verantwortlich und werden aus diesem Grund auch dargestellt. Sie sind jedoch nicht Bestandteil der auf Null zu stellenden Bilanz der Treibhausgasemissionen.

Die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik, die durch Sanierungs- und Neubautätigkeiten verursacht werden, werden vollständig dem Jahr zugeschrieben, in dem die Tätigkeiten stattfinden. Dabei werden keine Wiederanschaffungen nach Ende der Nutzungsdauer der jeweiligen Komponenten berücksichtigt.

Die Betrachtung der Treibhausgasemissionen erfolgt für den Neubau und die Sanierungen in unterschiedlicher Weise. Bei den Sanierungen werden nur die Treibhausgasemissionen der Bauteile und Anlagentechnik betrachtet, welche im Rahmen der Sanierung ausgetauscht werden. Bei den Neubauten werden alle Bauteile und Anlagentechniken, die in das neue Gebäude eingebaut werden, berücksichtigt.

2.10.1 Sanierung

2.10.1.1 Konstruktive Bauteile

Für die Sanierung wurde ein bauteilbezogenes Bewertungsverfahren gewählt. Für die konstruktiven Bauteile (Außenwand, Dach/oberste Geschossdecke, Fenster, Kellerdecke, erdberührte Bauteile) wurden Kennwerte anhand [20] ermittelt. Dabei wurden vom Fraunhofer IBP Mittelwerte aus den jeweils angegebenen Typkonstruktionen ermittelt. In [20] sind außerdem Worst-, Normal- und Best-Case-Varianten für die Konstruktionen angegeben, wobei sich die Best-Case-Varianten dadurch auszeichnen, dass die verwendeten Bau- und Dämmstoffe ökologisch optimiert gewählt wurden. Für die Szenarien wurde als Basisvariante angesetzt, dass die Sanierungen im EG 40-Standard und im Bereich des Denkmalschutzes mit den LCA-Informationen der Normal-Case-Varianten berechnet werden. Für den Ersatz des Sonnenschutzes wurde auf einen Außenraffstore aus [21] zurückgegriffen.

Die nettogrundflächenspezifischen Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Instandhaltung der Hüllflächenbauteile fallen beim Denkmalschutz niedriger aus (vgl. Tabelle 14), da dort nicht dieselben thermischen Qualitäten wie bei den gewöhnlichen Sanierungen erreicht werden und somit weniger Dämmstoff zum Einsatz kommt.

Tabelle 14:
 Nettogrundflächenspezifische Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Instandhaltung der Hüllflächenbauteile im EG 40 EE-Sanierungsstandard und für die denkmalgerechte Sanierung für die verschiedenen Typgebäude komplett angerechnet für das Jahr der baulichen Umsetzung.

Typgebäude bzw. Cluster	Nettogrundflächenspezifische Treibhausgasemissionen der Hüllflächenbauteile [kg _{CO2-Äq} /m ² _{NGF}]	
	EG 40 EE-Sanierung	Denkmalschutz-Sanierung
Kindertagesstätten	239,5	200,7
Grundschulen	298,4	251,4
Weiterführende Schulen	205,2	167,4
Berufsschulen	109,3	91,0
Sporthallen	373,2	299,3
Verwaltungsgebäude	132,2	104,2
Restcluster	226,3	185,7

Für die in der zweiten Phase von Szenario 3 durchgeführten Sanierungen werden ebenfalls die Werte aus Tabelle 14 für die EG 40 EE-Sanierungen herangezogen. Dies ist dem Mangel an geeigneten Literaturdaten für die Sanierung von bereits gedämmten Gebäuden geschuldet, verursacht aber aufgrund der relativ geringen Nettogrundflächen, welche in Phase 2 saniert werden, eine begrenzte Ungenauigkeit.

Durch eine lebenszyklusoptimierte Produktauswahl können bei den Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Instandhaltung der Hüllflächenbauteile deutliche Reduktionen erzielt werden. Bei Kindertagesstätten und Verwaltungsgebäuden beträgt das Reduktionspotenzial rund 14 %, für die Grund- und Weiterführenden Schulen 15 %, bei Sporthallen 18 % und bei Berufsschulen 12 %.

2.10.1.2 Anlagentechnik

Die bei der Sanierung ausgetauschten (bzw. neu ins Gebäude eingebrachten) anlagentechnischen Komponenten wurden bezüglich der Herstellung und Instandhaltung auf Treibhausgasemissionen bewertet. Dies betrifft die Wärmeerzeuger, Lüftungsanlagen, den Sonnenschutz, den Austausch der Bestandsheizkörper und die LED-Beleuchtung.

Lüftungsanlagen

Für die im Rahmen von Sanierungen eingesetzten Lüftungsanlagen wurden die Treibhausgasemissionen der Herstellung und Instandhaltung auf der Basis von

Kennwerten zu Schulgebäuden aus [22] ermittelt, indem die Kennwerte auf die Nettogrundfläche umgerechnet wurden. Der so ermittelte Kennwert für die Installation der Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung beträgt $47,6 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-Äq.}}/\text{m}^2_{\text{NRF}}$ und beinhaltet keinen zusätzlichen Materialbedarf für z. B. höhere Decken (wie bei Neubauten angesetzt), da dies in Sanierungen nicht auftritt. Es wurde angesetzt, dass dieser Wert für Gebäude mit einem nettogrundflächenbezogenen Luftvolumenstrom von $3,5 \text{ m}^3/(\text{h}\cdot\text{m}^2)$ gültig ist. Die Treibhausgasemission der Lüftungsanlage von Gebäuden mit davon abweichenden nettogrundflächenbezogenen Luftvolumenströmen wurde proportional angepasst. Für das Restcluster wurde der nettogrundflächenbezogene Mittelwert aus den Typgebäuden berechnet und für die Installationsquote von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung wurde ebenfalls ein Mittelwert der Installationsquoten der anderen Gebäudecluster gebildet.

Die Typgebäude werden im Rahmen der energetischen Sanierung unterschiedlich häufig mit Lüftungsanlagen ausgestattet, wodurch die daraus resultierenden Treibhausgasemissionen unterschiedlich hoch ausfallen (vgl. Tabelle 15). Bei denkmalgeschützten Gebäuden werden bei der Sanierung seltener Lüftungsanlagen angesetzt als dies bei normalen Sanierungen der Fall ist, weshalb dort die durch die Lüftungsanlagen verursachten Treibhausgasemissionen geringer ausfallen (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15:
Treibhausgasemissionen durch die Herstellung und Instandhaltung von Lüftungsanlagen im EG 40 EE-Sanierungsstandard und im Denkmalschutz in den Typgebäuden.

Typgebäude bzw. Cluster	Nettogrundflächenspezifische Treibhausgasemissionen der Lüftungsanlagen [$\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-Äq.}}/\text{m}^2_{\text{NGF}}$]	
	EG 40 EE-Sanierung	Denkmalschutz-Sanierung
Kindertagesstätten	56,1	56,1
Grundschulen	74,2	51,9
Weiterführende Schulen	84,3	84,3
Berufsschulen	59,3	41,5
Sporthallen	17,2	-
Verwaltungsgebäude	5,7	-
Restcluster	53,3	43,6

Beleuchtung

Die Sanierung der Beleuchtungsanlagen erfolgt in allen Sanierungsstandards mit einer LED-Beleuchtung. Allerdings sind die zu installierende Leistung und

somit die Treibhausgasemissionen der LED-Beleuchtung je Cluster unterschiedlich. Als Grundlage wurde eine LED-Beleuchtung für Bürogebäude aus [21] verwendet. Der Austausch der Beleuchtung erfolgt für alle Sanierungsniveaus gleich.

Tabelle 16:

Mittlere installierte LED-Beleuchtungsleistung in der Sanierung und sich daraus ergebende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung je m² Nettogrundfläche und je Typgebäude.

Typgebäude	Mittlere installierte Leistung [W/m ² _{NRF}]	Treibhausgasemissionen [kg _{CO2-Äq} /m ² _{NGF}]
Kindertagesstätten	5,2	3,9
Grundschulen	4,0	3,0
Weiterführende Schulen	4,3	3,2
Berufsschulen	7,0	5,2
Sporthallen	5,0	3,7
Verwaltungsgebäude	5,5	4,1
Restcluster	5,2	3,9

Wärmeerzeuger

Durch die Sanierung der Gebäude auf unterschiedliche energetische Standards (EG 40 und Denkmalschutz) ergeben sich unterschiedliche erforderliche thermische Leistungen der Wärmeerzeuger, was sich wiederum auf deren Treibhausgasemissionen bei der Herstellung und Instandhaltung auswirkt. Die Wärmeerzeugerleistung für das Restcluster wird aus den flächenbezogenen Mittelwerten der sechs Typgebäude berechnet, wobei ein „Restcluster-Typgebäude“ mit 340 m² Nettogrundfläche (berechnet aus der Anzahl der Restgebäude und deren Nettogrundflächen) angesetzt wurde. Die LCA-Daten für die betrachteten Wärmeerzeuger Luft-Wasser-Wärmepumpe und Sole-Wasser-Wärmepumpe wurden aus [21] entnommen und mittels Trendlinie abgebildet und darauf aufbauend extrapoliert. Daraus ergeben sich die folgenden Gleichungen:

- Luft-Wasser-Wärmepumpe: $GWP_{L/W} = 55,427 \cdot (P_{th})^{0,5992}$ [kg]
- Sole-Wasser-Wärmepumpe: $GWP_{S/W} = 176,84 \cdot P_{th} + 140,05$ [kg]

Tabelle 17:
Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der unterschiedlichen Wärmeerzeuger in den Typgebäuden für den EG 40 EE-Sanierungsstandard und im Denkmalschutz.

Wärmeerzeuger / Typgebäude		Nettogrundflächenspezifische Treibhausgasemissionen der Wärmeerzeuger [kg _{CO2-Äq} /m ² _{NGF}]	
		EG 40 EE-Sanierung	Denkmalschutz-Sanierung
LW-Wärmepumpe	Kindertagesstätten	0,9	1,0
	Grundschulen	0,6	0,8
	Weiterführende Schulen	0,4	0,4
	Berufsschulen	0,3	0,3
	Sporthallen	0,9	1,0
	Verwaltungsgebäude	0,3	0,4
	Restcluster	1,0	1,2
SW-Wärmepumpe	Kindertagesstätten	13,6	16,5
	Grundschulen	13,1	18,2
	Weiterführende Schulen	12,1	14,5
	Berufsschulen	7,9	10,1
	Sporthallen	13,3	17,1
	Verwaltungsgebäude	7,2	9,7
	Restcluster	10,9	14,0

Austausch der Heizkörper

Im Rahmen der Sanierungsmaßnahmen werden durch die Stadt Oldenburg für gewöhnlich die Bestandsheizkörper ausgebaut und durch neue Flächenheizkörper ersetzt. Die LCA-Daten für die betrachteten Heizkörper wurden aus [21] entnommen. Für die betrachteten Typgebäude ergeben sich die in Tabelle 18 dargestellten Treibhausgasemissionen für den Austausch der Heizkörper.

Tabelle 18:
Treibhausgasemissionen durch die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Heizkörpern im EG 40 EE-Sanierungsstandard und im Denkmalschutz in den Typgebäuden.

Typgebäude bzw. Cluster	Nettogrundflächenspezifische Treibhausgasemissionen der Heizkörper [$\text{kg}_{\text{CO}_2\text{-Äq}}/\text{m}^2_{\text{NGF}}$]	
	EG 40 EE-Sanierung	Denkmalschutz-Sanierung
Kindertagesstätten	13,7	16,5
Grundschulen	13,1	18,1
Weiterführende Schulen	12,0	14,4
Berufsschulen	7,9	10,0
Sporthallen	13,4	17,1
Verwaltungsgebäude	7,2	9,6
Restcluster	11,2	14,3

2.10.2 Neubau

Die Abbildung der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der technischen Gebäudeausrüstung erfolgt bei den Neubauten über einen pauschalen Wert von $585 \text{ kg}_{\text{CO}_2\text{-Äq}}/\text{m}^2_{\text{NGF}}$ [23] für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren, der für konventionell errichtete Gebäude zutreffend ist.

Auf Basis von Erfahrungen der Landeshauptstadt München können durch eine lebenszyklusoptimierte Bauweise bei den Neubauten rund 35 % der Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik eingespart werden.

2.10.3 Photovoltaik

Für die Ermittlung der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Photovoltaik wird auf [24] zurückgegriffen. Darin werden die Treibhausgasemissionen in die Anteile Modulherstellung, Inverter, Unterkonstruktion und Leitungen unterteilt. Bezogen auf das Kilowattpeak erhält man die in Tabelle 19 zusammengestellten Kennwerte. Für die Module wurden die Werte für eine Herstellung aus dem asiatisch-pazifischen Raum (ohne China) verwendet, um der weltweiten Produktionsstatistik und gleichzeitig der gewählten Nennleistung von $350 \text{ kW}_p/\text{Modul}$ bei $1,71 \text{ m}^2$ Modulfläche Rechnung zu tragen.

Tabelle 19:
Treibhausgasemissionen durch die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Photovoltaik-Anlagen.

PV-Anlagenbestandteil	Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung [kg/kW _p]
Modulherstellung	1.006
Inverter	18
Unterkonstruktion	79
Leitungen	38
Summe	1.141

3 Startpunkt

Tabelle 20 stellt den Startpunkt der Szenarienbewertung mit den Flächenkennwerten der sechs detailliert zu bewertenden Cluster und dem Restcluster zusammen, in Tabelle 21 sind die entsprechenden Anzahlen der enthaltenen Liegenschaften eingetragen. Tabelle 22 enthält die entsprechenden Endenergieverbräuche, aufgeteilt in die eingesetzten Energieträger Erdgas, Biomasse, Wärmepumpenstrom, Allgemiestrom. Aus den Endenergieverbräuchen und Nettogrundflächen wurden für die zu sanierenden Liegenschaften mittlere spezifische Heizenergie- und Stromverbräuche je Gebäudecluster ermittelt, siehe Tabelle 23.

Tabelle 20:
Beheizte Nettogrundflächen der betrachteten Gebäude der Stadt Oldenburg aufgeteilt in die sechs detailliert zu bewertenden Gebäudecluster und das Restcluster basierend auf den Daten aus der Datenbank der Stadt Oldenburg [2].

			Beheizte Nettogrundfläche [m ²]							
			Kindertagesstätten	Grundschulen	Weiterführende Schulen	Berufsschulen	Sport-hallen	Verwaltungsgebäude	Rest-cluster	Summe der Gebäude
Gesamt			26.927	80.174	148.357	51.094	42.136	43.009	48.396	440.092
Zu sanieren	Phase 1 (Gebäude bis einschließlich Baujahr 2010)	Normale Sanierung	14.402	55.094	101.091	37.503	33.492	20.566	34.599	296.748
		Denkmalschutz	238	7.366	12.454	0	3.925	17.161	5.211	46.355
	Phase 2 (Gebäude mit Baujahr 2011 bis 2017) (ausschließlich normale Sanierung)	4.026	1.527	5.229	13.591	2.021	0	6.137	32.531	
Ohne Änderungen			6.355	7.493	21.743	0	2.697	5.283	0	43.570
Geplanter Neubau			1.906	8.693	7.839	0	0	0	2.449	20.887

Tabelle 21:
Anzahl der betrachteten Gebäude der Stadt Oldenburg aufgeteilt in die sechs detailliert zu bewertenden Gebäudecluster und das Restcluster basierend auf den Daten aus der Datenbank der Stadt Oldenburg [2].

			Anzahl der Gebäude [-]							
			Kinder- tages- stätten	Grund- schulen	Weiter- füh- rende Schulen	Berufs- schulen	Sport- hallen	Verwal- tungs- ge- bäude	Rest- cluster	Summe der Ge- bäude
Gesamt			35	66	45	8	42	26	123	345
Zu sanieren	Phase 1 (Gebäude bis ein- schließlich Baujahr 2010)	Normale Sanierung	19	40	28	6	33	15	102	243
		Denkmalschutz	1	6	3	0	5	9	15	39
	Phase 2 (Gebäude mit Baujahr 2011 bis 2017) (ausschließlich normale Sa- nierung)		7	2	4	2	1	0	5	21
Ohne Änderungen			6	5	4	0	3	2	0	20
Geplanter Neubau			2	13	6	0	0	0	1	22

Tabelle 22:

Endenergieverbräuche der betrachteten Gebäude der Stadt Oldenburg im Ist-Zustand (basierend auf Daten aus den Jahren 2018 und 2019) aufgeteilt in die sechs detailliert zu bewertenden Gebäudecluster und das Restcluster basierend auf den Daten aus der Datenbank der Stadt Oldenburg [2].

		Endenergieverbrauch [MWh/a]								
		Kinder- tages- stätten	Grund- schulen	Weiter- füh- rende Schulen	Berufs- schulen	Sport- hallen	Verwal- tungs- gebäude	Rest- cluster	Summe der Ge- bäude	
Gesamt	Erdgas	2.180	7.791	15.025	2.957	5.340	4.308	5.788	43.388	
	Biomasse	0	0	0	291	0	0	426	717	
	Wärmepum- penstrom	166	11	0	83	2	42	6	309	
	Allgemein- strom	503	893	2.735	1.339	1.389	1.348	1.549	9.755	
	Summe	2.849	8.695	17.760	4.669	6.731	5.697	7.769	54.169	
Zu sanieren	Phase 1 (Gebäude bis ein- schließlich Baujahr 2010)	Erdgas	1.629	7.032	12.565	2.681	4.879	4.202	5.609	38.597
		Biomasse	0	0	0	291	0	0	69	360
		Wärmepum- penstrom	32	11	0	0	2	0	0	46
		Allgemein- strom	271	713	2.110	848	1.230	1.278	1.215	7.665
		Summe	1.932	7.756	14.675	3.820	6.112	5.480	6.893	46.667
	Phase 2 (Gebäude mit Baujahr 2011 bis 2017)	Erdgas	259	159	569	276	247	0	180	1.689
		Biomasse	0	0	0	0	0	0	357	357
		Wärmepum- penstrom	4	0	0	83	0	0	6	93
		Allgemein- strom	85	25	252	491	93	0	333	1.280
		Summe	348	185	821	850	339	0	876	3.419
Ohne Änderun- gen	Erdgas	293	599	1.891	0	213	106	0	3.102	
	Biomasse	0	0	0	0	0	0	0	0	
	Wärmepum- penstrom	129	0	0	0	0	42	0	171	
	Allgemein- strom	147	154	373	0	66	70	0	810	
	Summe	569	754	2.263	0	280	217	0	4.083	

Tabelle 23:

Spezifische mittlere Energieverbräuche der zu sanierenden Liegenschaften für die unterschiedlichen Cluster basierend auf den Endenergieverbräuchen und beheizten Nettogrundflächen aus der Datenbank (Stand 2018/2019) der Stadt Oldenburg [2].

Cluster	Mittlerer spezifischer Heizenergieverbrauch [kWh/m ² a]	Mittlerer spezifischer Stromverbrauch [kWh/m ² a]
Kindertagesstätten	93,8	20,1
Grundschulen	109,1	12,5
Weiterführende Schulen	106,9	19,5
Berufsschulen	65,2	26,2
Sporthallen	126,8	33,0
Verwaltungsgebäude	101,4	31,3
Restcluster	135,4	22,7

4 Szenario 1

4.1 Beschreibung des Szenarios

Szenario 1 mit dem Zieljahr 2030 ist gekennzeichnet durch folgende Rahmenbedingungen:

- Die jährliche Sanierungsrate beträgt 11,11 %/a. Es werden die insgesamt 282 Gebäude aus der Sanierungsphase 1 mit den Baujahren bis einschließlich 2010 saniert, siehe Tabelle 21. Damit werden pro Jahr 31,3 Gebäude in Angriff genommen.
- Die angestrebte Sanierungsqualität für normale Sanierungen ist das EG 40 EE-Niveau (vergl. Tabelle 2). Für Gebäude, die unter Denkmalschutz stehen, wird ein reduziertes Dämmniveau festgelegt, siehe Tabelle 3. Die Energieerzeugung wird bei der Sanierung auf Außenluft-Wasser-Wärmepumpen (90 %) und Sole-Wasser-Wärmepumpen (10 %) umgestellt. Die Bestandsheizkörper werden bei der Sanierung durch neue ersetzt, die Heizungsverteilung wird beibehalten. Unterschiedliche Arten von Lüftungsanlagen und der Trinkwarmwasserbereitung werden entsprechend den Angaben der Stadt Oldenburg in Abhängigkeit von unterschiedlichen Raumnutzungen eingesetzt. Ähnliches gilt für die Gebäudeautomation. Die Beleuchtung wird bei der Sanierung komplett auf neue LED-Leuchten umgestellt.
- Die CO₂-Äquivalente der eingesetzten Energieträger basieren auf der DIN V 18599-1:2018, siehe [6]. Für den Energieträger Strom und den eingespeisten Strom aus PV-Anlagen werden zeitlich veränderliche CO₂-Äquivalente gemäß IINAS eingesetzt, siehe Kapitel 2.6. Die gemäß DIN V 18599 ermittelten Endenergiekennwerte müssen für die Energieträger Erdgas und Biomasse zusätzlich mit dem Verhältnis Brennwert/Heizwert umgerechnet werden, bevor mit den CO₂-Äquivalenten multipliziert werden darf.

4.2 Szenarienergebnisse

4.2.1 Endenergiebedarf in der Betriebsphase

Die Szenarienergebnisse für den Endenergiebedarf im Betrieb werden im Folgenden aufgeteilt in die Cluster und für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude in einer Tabelle sowie in Diagrammen präsentiert. Für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude sind zwei Diagramme enthalten, die den Endenergiebedarf einmal aufgeteilt in die genutzten Energieträger und einmal aufgeteilt in die Gebäudecluster darstellen. Dabei werden zunächst die Endenergiebedarfswerte ohne Berücksichtigung des benötigten Photovoltaikstroms zur Erreichung der Klimaneutralität aufgezeigt.

Tabelle 24 enthält den berechneten Endenergiebedarf der Betriebsphase für die Jahre 2021 bis 2030. Während die Werte für die Energieträger Erdgas und Biomasse (eingesetzt bei den Berufsschulen und Gebäuden im Restcluster) über die Jahre sinken, erhöht sich andererseits der Netzstrombedarf, weil weitere elektrische Wärmepumpen eingesetzt werden und der Nutzerstrombedarf über die Jahre gleich hoch angesetzt wurde. Da die Sanierungsrate und die für die Studie angesetzte Rate der geplanten Neubauten bis zum Zieljahr 2030 konstant ist, ergibt sich jeweils ein linearer Verlauf bei den einzelnen Energieträgern und auch bei der Summe der Endenergie.

Die Summe der Endenergie in Szenario 1 reduziert sich von 54.169 MWh/a im Jahr 2021 durch die Sanierungen auf 24.540 MWh/a im Jahr 2030 und damit auf 45 % des Ausgangsbedarfs. Dabei ist die weitere Reduzierung durch die Bilanzierung des über die Photovoltaik erzeugten Stroms noch nicht berücksichtigt.

Bild 3 enthält die Endenergiebedarfsverläufe für die sechs Gebäudecluster mit Typgebäuden für die Jahre 2021 bis 2030. Neben dem jeweils sinkenden Gesamtenergiebedarf sind auch die einzelnen Anteile der Energieträger zu erkennen, so auch, dass es nur im Cluster Berufsschule (und im nicht abgebildeten Restcluster) Biomasseanteile gibt. Aufgrund der durchgeführten baulichen Sanierungen und der Nutzung von erneuerbaren Energien durch die Wärmepumpen sinken der Erdgasbedarf und der Biomassebedarf stärker als der Netzstrombedarf steigt.

Tabelle 24:
Jährliche Endenergiebedarfswerte je Energieträger von 2021 bis 2030 für den Betrieb der städtischen Gebäude gemäß Szenario 1 mit dem Zieljahr 2030.

Cluster	Energie-träger	Endenergiebedarf gemäß Szenario 1 [MWh/a]									
		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Kinder-tages-stätten	Erdgas	2.180	1.999	1.818	1.637	1.456	1.275	1.094	913	732	552
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	669	724	779	835	890	945	1.001	1.056	1.111	1.167
	Summe	2.849	2.724	2.598	2.472	2.346	2.221	2.095	1.969	1.844	1.718
Grund-schu-len	Erdgas	7.791	7.009	6.228	5.447	4.665	3.884	3.103	2.321	1.540	759
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	904	1.122	1.340	1.558	1.776	1.994	2.212	2.430	2.648	2.866
	Summe	8.695	8.131	7.568	7.005	6.442	5.878	5.315	4.752	4.189	3.625
Weiter-füh-rende Schu-len	Erdgas	15.025	13.629	12.232	10.836	9.440	8.044	6.648	5.252	3.856	2.460
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	2.735	3.128	3.522	3.915	4.308	4.702	5.095	5.488	5.881	6.275
	Summe	17.760	16.757	15.754	14.751	13.748	12.746	11.743	10.740	9.737	8.734
Berufs-schu-len	Erdgas	2.957	2.659	2.361	2.063	1.765	1.467	1.169	872	574	276
	Bio-masse	291	258	226	194	161	129	97	65	32	0
	Netz-strom	1.422	1.479	1.536	1.593	1.650	1.707	1.764	1.821	1.878	1.935
	Summe	4.669	4.396	4.123	3.850	3.577	3.304	3.031	2.757	2.484	2.211
Sport-hallen	Erdgas	5.340	4.797	4.255	3.713	3.171	2.629	2.087	1.544	1.002	460
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	1.391	1.479	1.567	1.655	1.743	1.831	1.919	2.007	2.095	2.183
	Summe	6.731	6.277	5.822	5.368	4.914	4.460	4.005	3.551	3.097	2.643
Ver-wal-tungs-ge-bäude	Erdgas	4.308	3.841	3.374	2.907	2.440	1.973	1.506	1.040	573	106
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	1.389	1.454	1.518	1.583	1.648	1.712	1.777	1.842	1.906	1.971
	Summe	5.697	5.295	4.892	4.490	4.088	3.686	3.283	2.881	2.479	2.077
Rest-cluster	Erdgas	5.788	5.165	4.542	3.919	3.296	2.672	2.049	1.426	803	180
	Bio-masse	426	419	411	403	396	388	380	373	365	357
	Netz-strom	1.554	1.714	1.874	2.034	2.194	2.354	2.514	2.674	2.834	2.994
	Summe	7.769	7.298	6.827	6.356	5.886	5.415	4.944	4.473	4.002	3.532
Ge-samt-heit der Ge-bäude	Erdgas	43.388	39.099	34.811	30.522	26.234	21.945	17.657	13.368	9.080	4.791
	Bio-masse	717	677	637	597	557	517	477	437	397	357
	Netz-strom	10.065	11.101	12.137	13.173	14.210	15.246	16.282	17.318	18.355	19.391
	Summe	54.169	50.877	47.585	44.293	41.001	37.708	34.416	31.124	27.832	24.540

Szenario 1: Endenergie Betrieb

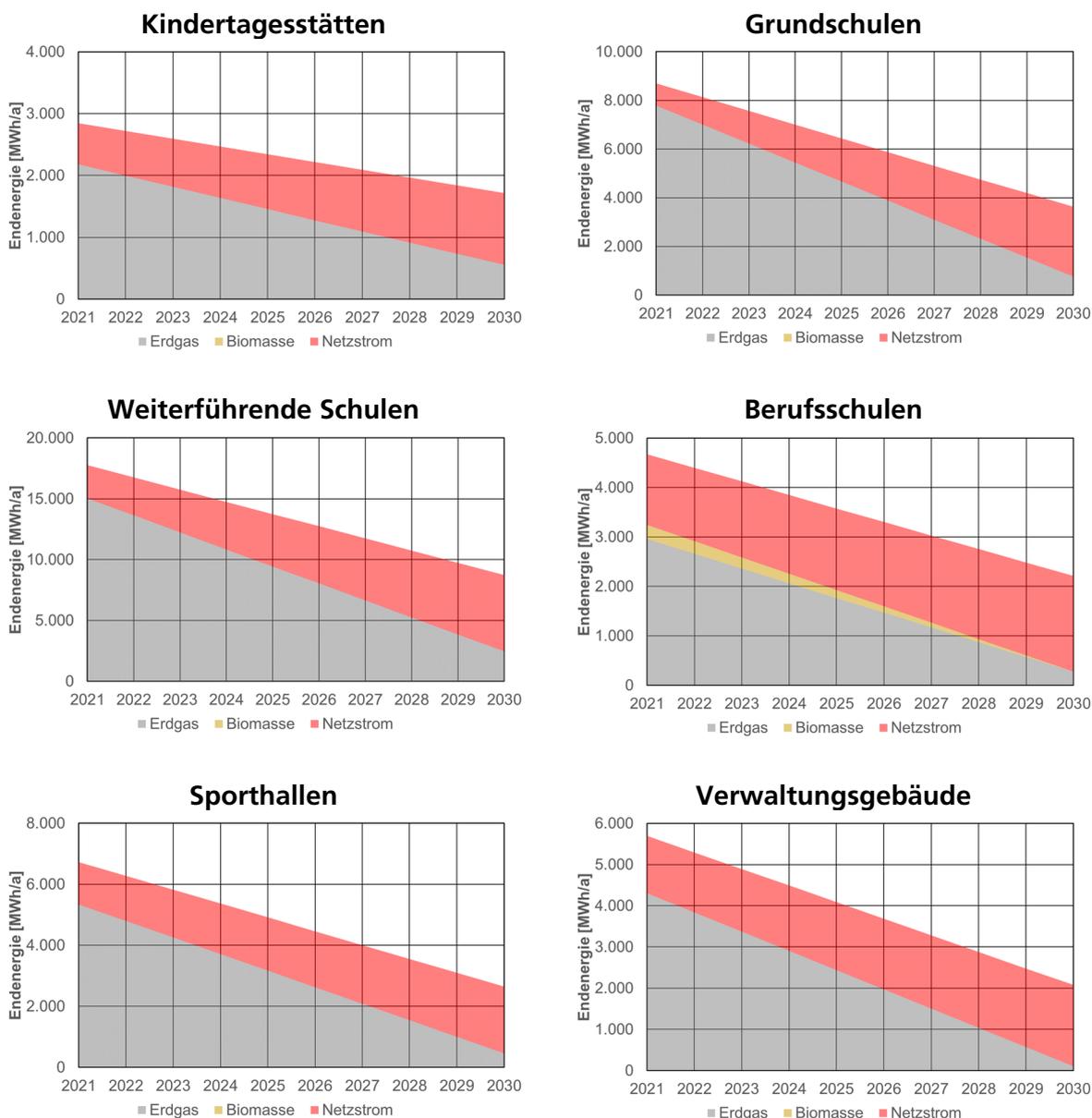


Bild 3:
Jährliche Endenergiebedarfswerte für den Betrieb der sechs spezifischen Gebäudecluster aufgeteilt in die genutzten Energieträger gemäß Szenario 1.

In Bild 4 und Bild 5 ist der Endenergiebedarf der Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 1 dargestellt, aufgeteilt in die verwendeten Energieträger bzw. in die insgesamt sieben Gebäudecluster. Aus der Aufteilung in die Gebäudecluster ist ersichtlich, dass das Cluster „Weiterführende Schulen“ den höchsten Energiebedarf der Cluster hat, gefolgt von den Grundschulen.

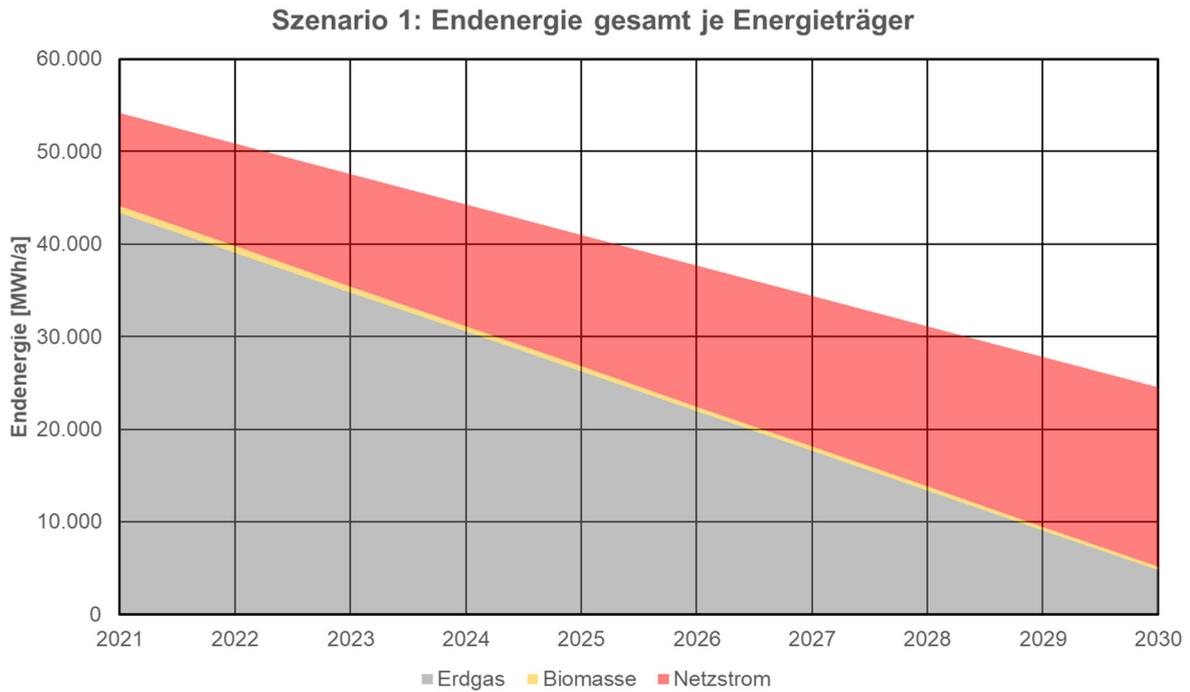


Bild 4:
 Jährliche Endenergiebedarfswerte für den Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Energieträger gemäß Szenario 1.

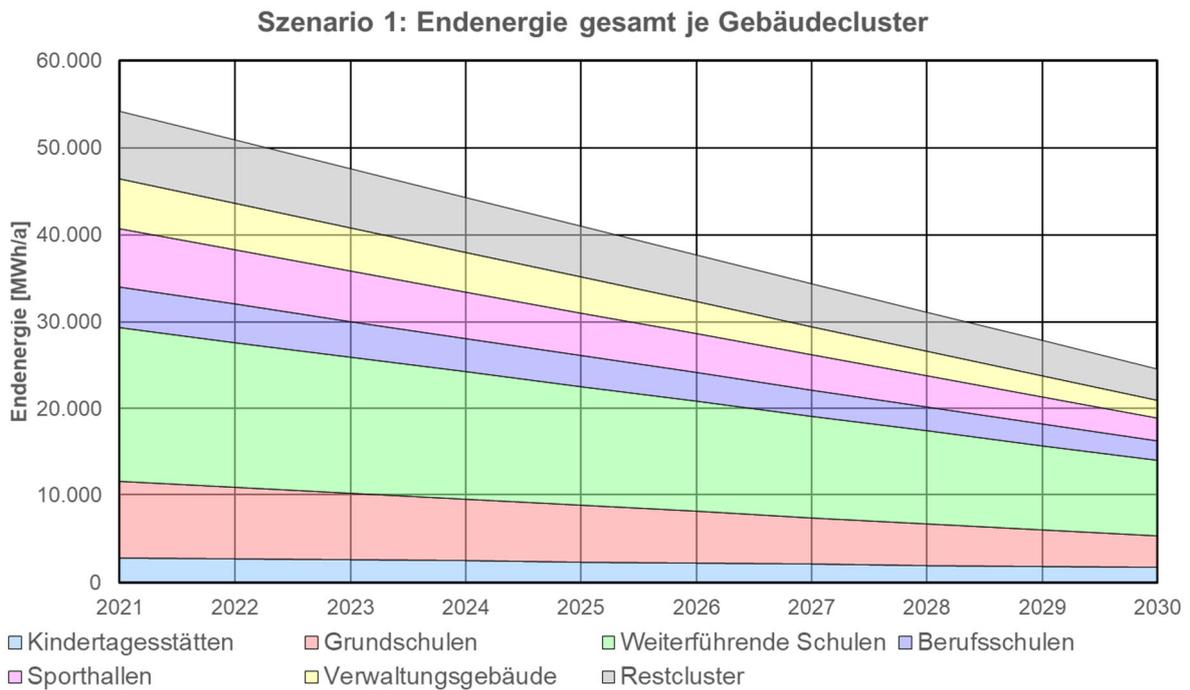


Bild 5:
 Jährliche Endenergiebedarfswerte für den Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Gebäudecluster gemäß Szenario 1.

4.2.2 Treibhausgasemissionen in der Betriebsphase

Auch die Szenarienergebnisse für die Treibhausgasemissionen aus der Betriebsphase werden aufgeteilt in die Cluster und für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude in einer Tabelle sowie in Diagrammen präsentiert. Für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude sind zwei Diagramme enthalten, die den Endenergiebedarf einmal aufgeteilt in die genutzten Energieträger und einmal aufgeteilt in die Gebäudecluster darstellen. Die Treibhausgasemissionen werden in den Tabellen und Bildern in der Einheit t (Tonnen) ausgewiesen, der verkürzten Version von $t_{CO_2\text{-Äq}}$. Die Ermittlung des benötigten Photovoltaikstroms für die Klimaneutralität wird im nächsten Kapitel zusammengefasst.

Tabelle 25 enthält die berechneten Treibhausgasemissionen der Betriebsphase für die Jahre 2021 bis 2030. Während die Werte für die Energieträger Erdgas und Biomasse (eingesetzt bei den Berufsschulen und Gebäuden im Restcluster) entsprechend den Endenergiewerten über die Jahre sinken, erhöhen sich andererseits die Treibhausgasemissionen aus dem Netzstrombedarf trotz sinkender CO_2 -Äquivalente, weil weitere elektrische Wärmepumpen eingesetzt werden und der Nutzerstrombedarf über die Jahre gleich hoch angesetzt wurde. Da die Sanierungsrate über die Jahre konstant ist und die CO_2 -Äquivalente entweder konstant oder bis 2030 linear absinkend ist (Netzstrom), ergibt sich jeweils ein linearer Verlauf bei den einzelnen Energieträgern und auch bei der Summe der Treibhausgasemissionen.

Die Summe der Treibhausgasemissionen in Szenario 1 reduziert sich von 13.048 t/a im Jahr 2021 durch die Sanierungen auf 6.284 t/a im Jahr 2030 und damit auf 48 % der Ausgangsemissionen. Dabei ist die weitere Reduzierung durch die Bilanzierung des über die Photovoltaik erzeugten Stroms noch nicht berücksichtigt.

Bild 6 enthält die Treibhausgasemissionsverläufe für die sechs Gebäudecluster mit Typgebäuden für die Jahre 2021 bis 2030. Neben den jeweils sinkenden Gesamtemissionen sind auch die einzelnen Anteile der Energieträger zu erkennen, so auch, dass es nur im Cluster Berufsschule (und im nicht abgebildeten Restcluster) kleine Biomasseanteile gibt. Aufgrund der durchgeführten baulichen Sanierungen und der Nutzung von erneuerbaren Energien durch die Wärmepumpen sinken die Treibhausgasemissionen aus den Energieträgern Erdgas und Biomasse stärker als die Treibhausgasemissionen aus dem Netzstrom steigen.

Tabelle 25:
 Jährliche Treibhausgasemissionen je Energieträger von 2021 bis 2030 für den
 Betrieb der städtischen Gebäude gemäß Szenario 1 mit dem Zieljahr 2030.

Cluster	Energie- träger	Treibhausgasemissionen gemäß Szenario 1 [t/a]									
		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Kinder- tages- stätten	Erdgas	475	436	396	357	317	278	239	199	160	120
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	237	249	261	272	281	290	298	304	310	314
	Summe	712	685	658	629	599	568	537	503	470	435
Grund- schu- len	Erdgas	1.698	1.528	1.358	1.187	1.017	847	676	506	336	165
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	320	386	449	508	561	612	659	700	739	773
	Summe	2.018	1.914	1.807	1.695	1.578	1.459	1.336	1.206	1.075	938
Weiter- füh- rende Schu- len	Erdgas	3.275	2.971	2.667	2.362	2.058	1.754	1.449	1.145	841	536
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	968	1.076	1.180	1.276	1.361	1.443	1.518	1.581	1.641	1.691
	Summe	4.244	4.047	3.846	3.639	3.419	3.197	2.968	2.725	2.481	2.227
Berufs- schu- len	Erdgas	645	580	515	450	385	320	255	190	125	60
	Bio- masse	11	10	8	7	6	5	4	2	1	0
	Netz- strom	503	509	515	519	521	524	526	525	524	522
	Summe	1.159	1.098	1.038	976	912	849	784	717	650	582
Sport- hallen	Erdgas	1.164	1.046	928	809	691	573	455	337	218	100
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	492	509	525	540	551	562	572	578	584	588
	Summe	1.657	1.555	1.453	1.349	1.242	1.135	1.027	915	803	689
Ver- wal- tungs- ge- bäude	Erdgas	939	837	736	634	532	430	328	227	125	23
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	492	500	509	516	521	526	530	530	532	531
	Summe	1.431	1.337	1.244	1.150	1.053	956	858	757	657	554
Rest- cluster	Erdgas	1.262	1.126	990	854	718	583	447	311	175	39
	Bio- masse	16	15	15	15	15	14	14	14	14	13
	Netz- strom	550	590	628	663	693	723	749	770	791	807
	Summe	1.828	1.731	1.633	1.532	1.426	1.320	1.210	1.095	979	859
Ge- samt- heit der Ge- bäude	Erdgas	9.459	8.524	7.589	6.654	5.719	4.784	3.849	2.914	1.979	1.044
	Bio- masse	27	25	24	22	21	19	18	16	15	13
	Netz- strom	3.563	3.819	4.066	4.295	4.490	4.680	4.852	4.988	5.121	5.226
	Summe	13.048	12.367	11.678	10.970	10.230	9.484	8.719	7.918	7.115	6.284

Szenario 1: Treibhausgasemissionen Betrieb

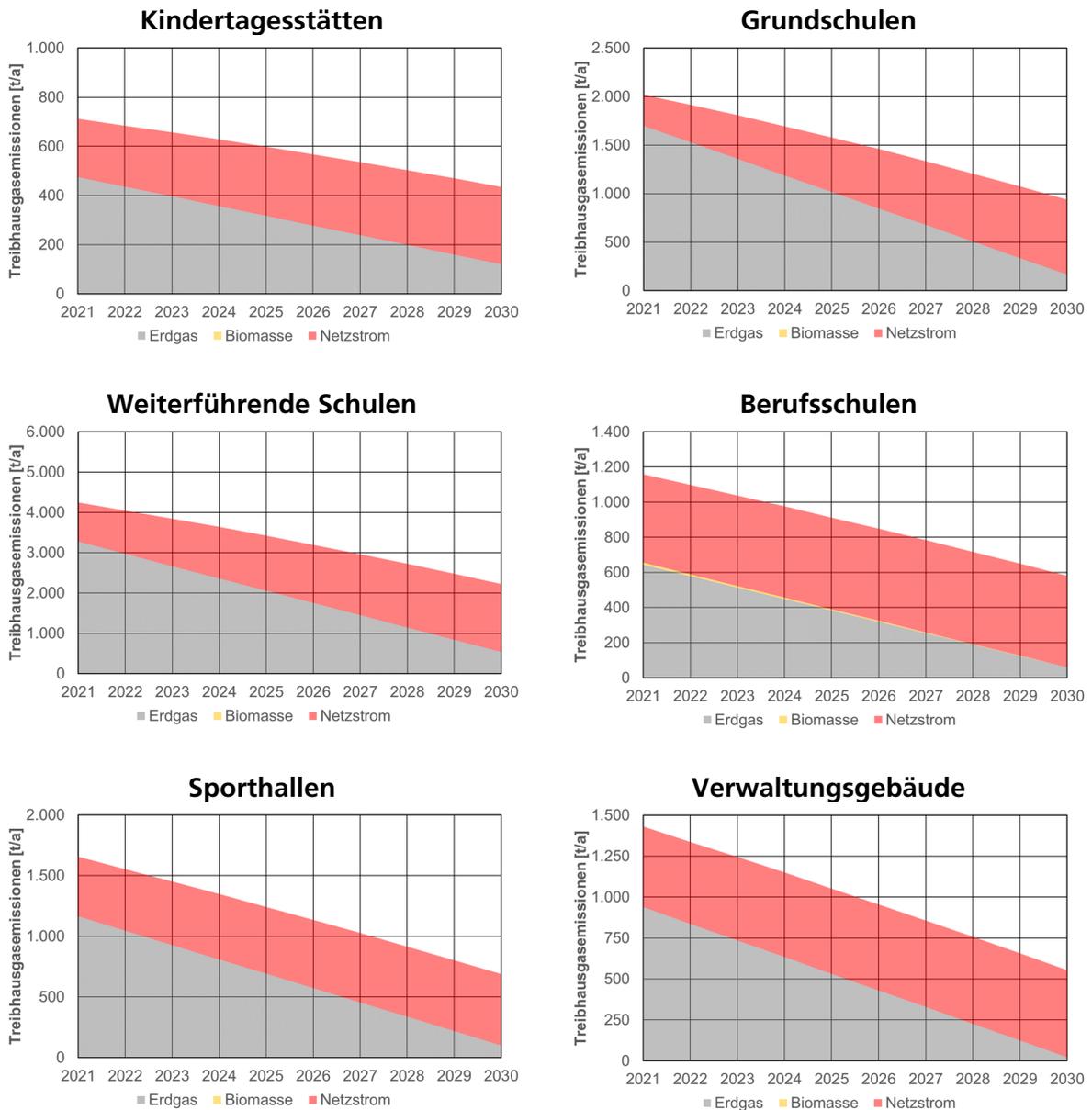


Bild 6:

Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der sechs spezifischen Gebäudecluster aufgeteilt in die genutzten Energieträger gemäß Szenario 1.

In Bild 7 und Bild 8 sind die Treibhausgasemissionen der Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 1 dargestellt, aufgeteilt in die verwendeten Energieträger bzw. in die insgesamt sieben Gebäudecluster. Aus der Aufteilung in die Gebäudecluster ist ersichtlich, dass das Cluster „Weiterführende Schulen“ die höchsten Treibhausgasemissionen der Cluster verursacht, gefolgt von den Grundschulen.

Szenario 1: Treibhausgasemissionen gesamt je Energieträger

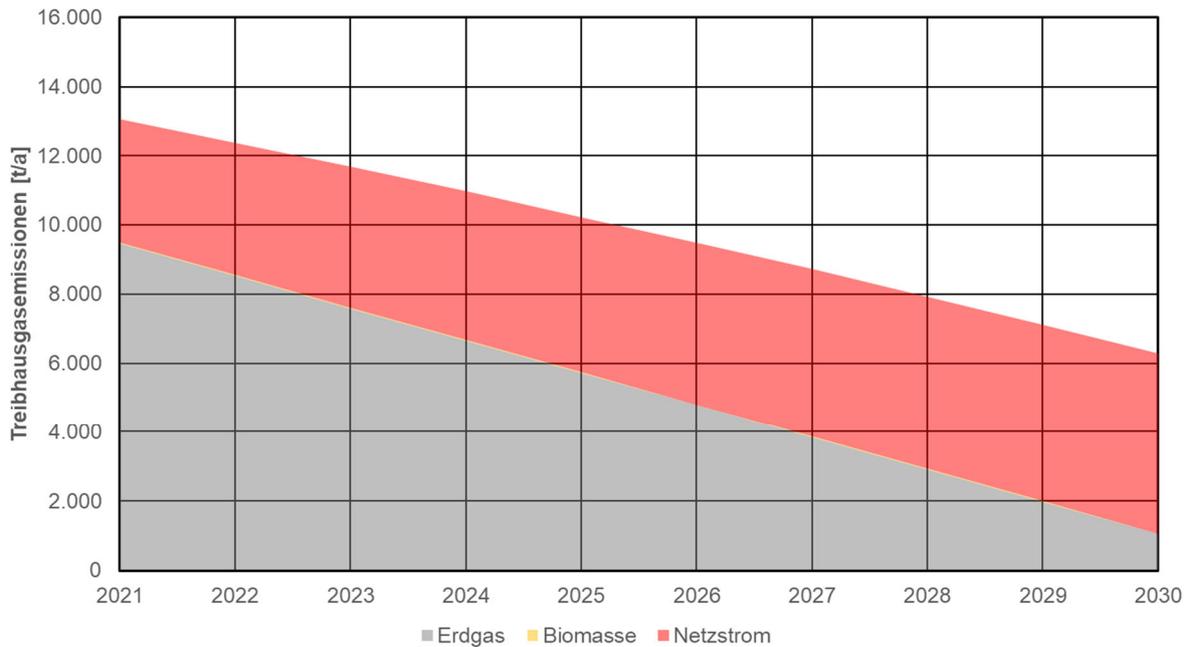


Bild 7:
Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Energieträger gemäß Szenario 1.

Szenario 1: Treibhausgasemissionen gesamt je Gebäudecluster

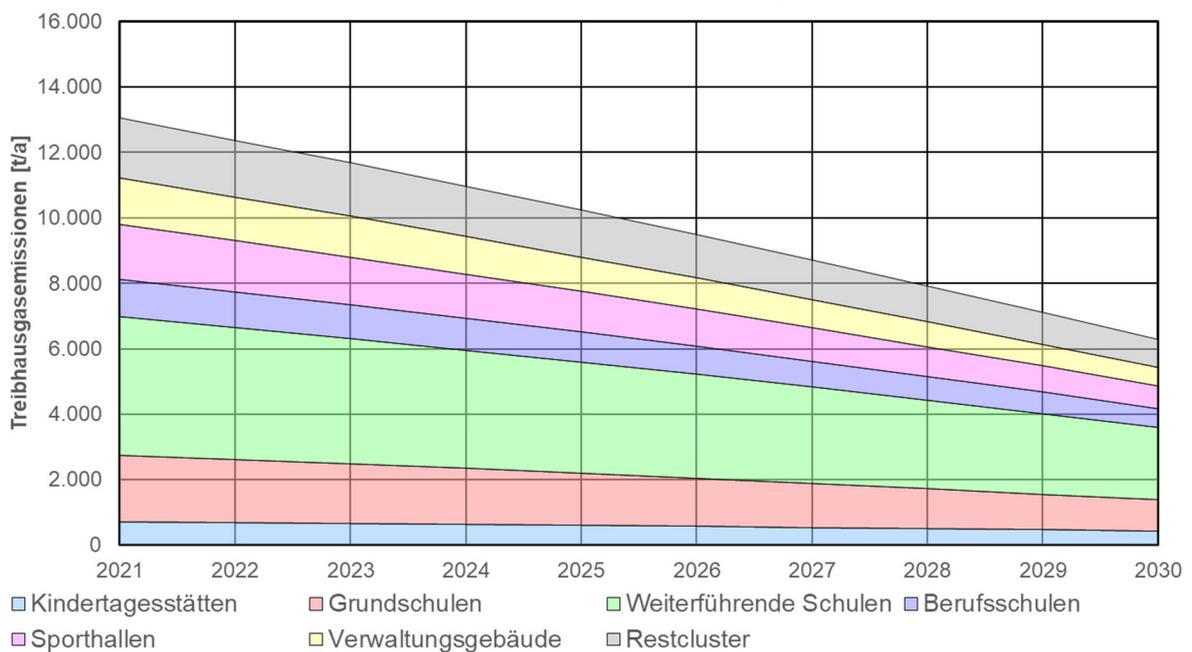


Bild 8:
Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Gebäudecluster gemäß Szenario 1.

4.2.3 Benötigter Photovoltaikstrom für die Klimaneutralität des Betriebs der städtischen Gebäude

Die im Jahr 2030 verbleibenden Treibhausgasemissionen von 6.284 t/a sollen durch die Erzeugung von Strom über PV-Module ausgeglichen werden und so der Betrieb der städtischen Gebäude in einer Jahresbilanz klimaneutral gestellt werden. Dafür werden bei einer CO₂-Äquivalente von -269,5 g/kWh für in das Stromnetz eingespeisten PV-Strom im Jahr 2030 insgesamt 23.316 MWh/a PV-Strom benötigt. Da die CO₂-Äquivalente für die Einspeisung von PV-Strom dem negativen Wert der CO₂-Äquivalente für den genutzten Strom aus dem Stromnetz entspricht, ist es bilanziell egal, ob der PV-Strom selbst genutzt oder eingespeist wird. Es sollte jedoch angestrebt werden, möglichst viel des PV-Stroms in den Gebäuden selbst zu nutzen, um das Stromnetz zu entlasten.

Mit dem Ansatz von 111 kWh PV-Strom pro m² Dachfläche und Jahr können die benötigte für Photovoltaik geeignete Dachfläche, die benötigte Modulfläche und die erforderliche Nennleistung in kW_p berechnet werden. Dieser Ansatz verwendet die Solarstrahlungsintensität in Oldenburg, berücksichtigt bereits die erforderlichen Abstände der Module zu den Dachrändern und zwischen den Modulreihen und beruht auf Modulen mit 350 W_p auf einer Fläche von 1,71 m², siehe auch Kapitel 2.7. Zusätzlich kann über die für PV geeigneten Dachflächen der Typgebäude der Anteil der davon benötigten Dachfläche ermittelt werden.

Damit ergeben sich folgende Kennwerte für die erforderliche Photovoltaik:

- Benötigte Dachfläche: 210.052 m²
- Benötigte Modulfläche: 136.534 m²
- Benötigte PV-Nennleistung: 27.946 kW_p
- Anteil der erforderlichen PV-Dachfläche an der für PV geeigneten Dachfläche: 67,5 %

Dabei kann nicht auf den Dächern jedes Gebäudeclusters die für das Gebäudecluster erforderliche PV-Strommenge erzeugt werden. Während dies basierend auf den gewählten Typgebäuden für die Grundschulen, Kindertagesstätten und Sporthallen leichter möglich ist, erscheint es vor allem für die Verwaltungsgebäude und die Weiterführenden Schulen als unmöglich. Deshalb werden die PV-Kennwerte in dieser Studie nur für die Gesamtheit der Gebäude bestimmt.

Wird dabei von einem linearen Zubau an PV-Fläche über die betrachteten Jahre ausgegangen, so ergeben sich die in Tabelle 26 zusammengestellten Kennwerte für die benötigte PV-Dachfläche, die Endenergie und die Treibhausgasemissionen inklusive Berücksichtigung des PV-Stroms.

Tabelle 26:
Benötigte Dachfläche für PV sowie Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen mit Berücksichtigung des PV-Stroms für die Klimaneutralität im Betrieb im Jahr 2030 gemäß Szenario 1.

Kennwert		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Benötigte Dachfläche für PV [m²]		0	23.339	46.678	70.017	93.357	116.696	140.035	163.374	186.713	210.052
Endenergie inkl. PV-Strom [MWh/a]	Erdgas	43.388	39.099	34.811	30.522	26.234	21.945	17.657	13.368	9.080	4.791
	Bio-masse	717	677	637	597	557	517	477	437	397	357
	Strombedarf	10.065	11.101	12.137	13.173	14.210	15.246	16.282	17.318	18.355	19.391
	PV-Strom	0	-2.591	-5.181	-7.772	-10.363	-12.953	-15.544	-18.135	-20.725	-23.316
	Summe	54.169	48.287	42.404	36.521	30.638	24.755	18.872	12.990	7.107	1.224
Treibhausgasemissionen inkl. PV-Strom [t/a]	Erdgas	9.459	8.524	7.589	6.654	5.719	4.784	3.849	2.914	1.979	1.044
	Bio-masse	27	25	24	22	21	19	18	16	15	13
	Strombedarf	3.563	3.819	4.066	4.295	4.490	4.680	4.852	4.988	5.121	5.226
	PV-Strom	0	-891	-1.736	-2.534	-3.275	-3.977	-4.632	-5.223	-5.782	-6.284
	Summe	13.048	11.476	9.943	8.437	6.955	5.507	4.087	2.695	1.333	0

Bild 9 zeigt den Verlauf der Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der stadteigenen Gebäude mit Berücksichtigung des erzeugten PV-Stroms über den Betrachtungszeitraum 2021 bis 2030 gemäß Szenario 1. Die Klimaneutralität wird erst im Zieljahr 2030 erreicht, in den Jahren zuvor verbleiben sich jährlich verringernde Treibhausgasemissionen.

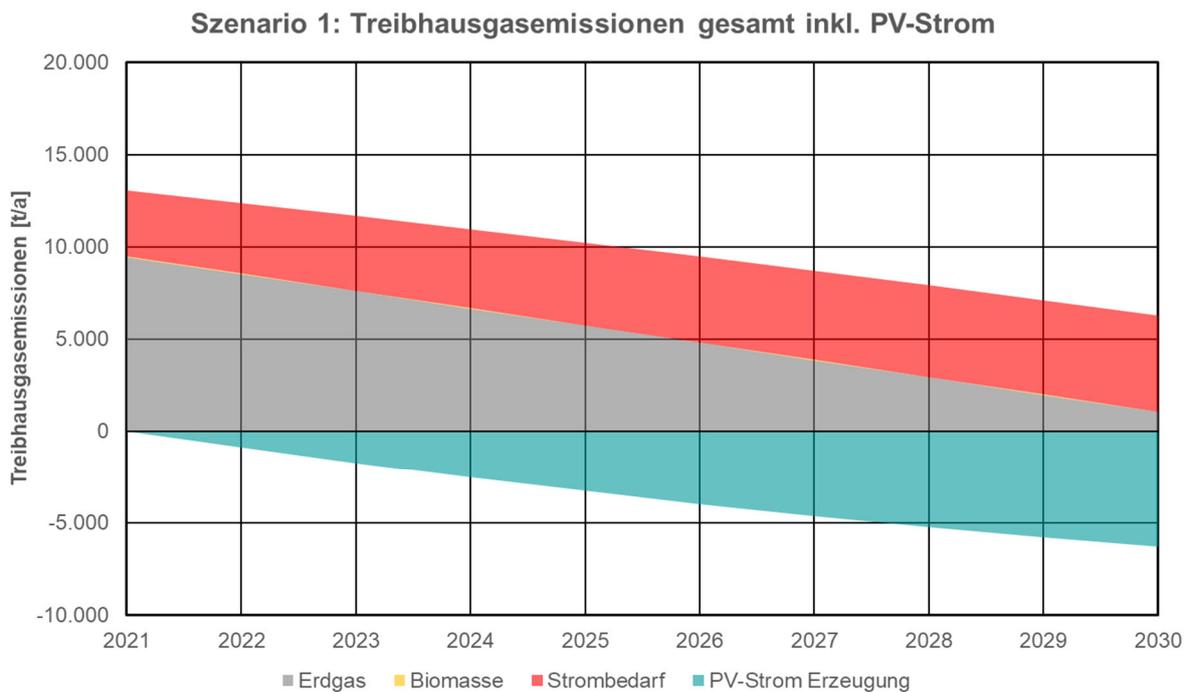


Bild 9:
 Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude inklusive der benötigten PV-Stromerzeugung für das Ziel Klimaneutralität aufgeteilt in die Energieträger gemäß Szenario 1.

4.2.4 Kosten: Investitionskosten und Energiekosten

Die Investitionskosten für die Sanierungen der städtischen Gebäude (KG 300 (Bauwerk) und KG 400 (Anlagentechnik)) betragen beginnend mit dem Jahr 2022 jährlich 31,4 Millionen Euro brutto. Die dafür veranschlagten Planungskosten (25 %) betragen jährlich 7,9 Millionen Euro brutto. Die Aufteilung auf die einzelnen Komponenten ist in Tabelle 27 ersichtlich. Dabei sind die Kosten für die Photovoltaik nicht enthalten.

Die Mehrkosten der geplanten Neubauten gegenüber dem bereits derzeit durch die Stadt Oldenburg angewandten Passivhausstandard im Bereich der Wärmepumpen (siehe dazu Kapitel 2.9) sind als Anteil der Kosten ebenfalls in Tabelle 27 eingetragen.

Tabelle 27:
 Jährlich anfallende Investitions- und Nebenkosten für die Sanierung und die geplanten Neubauten ohne Berücksichtigung der Photovoltaikkosten für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 1.

Cluster	Kosten	Jährliche Investitions- und Nebenkosten für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 1 [T€/a] (brutto)							
		Energetische Sanierung der Bauteile	Gerüste	Einbau Luft-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Sole-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Lüftung mit WRG	Einbau LED-Beleuchtung	Ersatz der Heizkörper	Summe
Kindertagesstätten	KG 300 & KG 400	998,7	35,1	120,6	30,3	165,2	52,2	61,4	1.463,6
	KG 700 (25 %)	249,7	8,8	30,2	7,6	41,3	13,1	15,3	365,9
	Summe	1.248,4	43,8	150,8	37,9	206,6	65,3	76,7	1.829,5
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	17,3	5,0	0	0	0	22,3
Grundschulen	KG 300 & KG 400	3.986,8	149,6	424,9	111,0	879,2	170,1	259,9	5.981,4
	KG 700 (25 %)	996,7	37,4	106,2	27,7	219,8	42,5	65,0	1.495,4
	Summe	4.983,4	187,0	531,1	138,7	1.099,0	212,6	324,9	7.476,8
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	63,0	20,9	0	0	0	83,9
Weiterführende Schulen	KG 300 & KG 400	7.791,1	272,0	537,2	147,1	1.867,9	332,4	425,0	11.372,7
	KG 700 (25 %)	1.947,8	68,0	134,3	36,8	467,0	83,1	106,3	2.843,2
	Summe	9.738,9	340,0	671,6	183,9	2.334,8	415,5	531,3	14.215,9
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	42,7	13,6	0	0	0	56,3
Berufsschulen	KG 300 & KG 400	1.012,3	89,8	115,2	30,1	434,4	178,7	90,0	1.950,5
	KG 700 (25 %)	253,1	22,5	28,8	7,5	108,6	44,7	22,5	487,6
	Summe	1.265,4	112,3	144,0	37,7	543,0	223,4	112,5	2.438,2
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	0	0	0	0	0	0
Sporthallen	KG 300 & KG 400	3.153,4	59,2	268,8	66,4	123,7	127,4	156,9	3.955,7
	KG 700 (25 %)	788,3	14,8	67,2	16,6	30,9	31,8	39,2	988,9
	Summe	3.941,7	74,0	336,0	83,0	154,6	159,2	196,1	4.944,6
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	0	0	0	0	0	0
Verwaltungsgebäude	KG 300 & KG 400	2.093,1	63,0	127,5	32,9	24,0	140,7	95,5	2.576,7
	KG 700 (25 %)	523,3	15,7	31,9	8,2	6,0	35,2	23,9	644,2
	Summe	2.616,4	78,7	159,4	41,1	30,0	175,9	119,3	3.220,8
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	0	0	0	0	0	0
Restcluster	KG 300 & KG 400	2.949,7	85,1	302,9	79,5	428,6	140,9	141,0	4.127,6
	KG 700 (25 %)	737,4	21,3	75,7	19,9	107,1	35,2	35,2	1.031,9
	Summe	3.687,1	106,4	378,6	99,3	535,7	176,2	176,2	5.159,6
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	21,4	6,6	0	0	0	28,0
Gesamtheit der Gebäude	KG 300 & KG 400	21.985,0	753,8	1.897,2	497,3	3.922,9	1.142,5	1.229,7	31.428,3
	KG 700 (25 %)	5.496,3	188,4	474,3	124,3	980,7	285,6	307,4	7.857,1
	Summe	27.481,3	942,2	2.371,5	621,6	4.903,6	1.428,1	1.537,1	39.285,4
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	144,4	45,9	0	0	0	190,3

Die Summe der Investitions- und Planungskosten (ohne Photovoltaikkosten) für die Gesamtheit der Gebäude über die neun Betrachtungsjahre 2022 bis 2030 sind in Tabelle 28 zusammengestellt und betragen 353,57 Millionen Euro.

Die Kosten für die Photovoltaik zum Erreichen des Klimaneutralitätszieles betragen jährlich 3,05 Millionen Euro und insgesamt 27,47 Millionen Euro. Letztere sind ebenfalls in Tabelle 28 eingetragen. Bei einem Ansatz von ebenfalls 25 % Nebenkosten für die Photovoltaik ergeben sich weitere 6,9 Millionen Euro als Nebenkosten für die Photovoltaik.

Die Gesamtsumme der Investitions- und Nebenkosten inklusive der Photovoltaik zur Erreichung der Klimaneutralität in der Betriebsphase in Szenario 1 ergeben sich somit zu 387,9 Millionen Euro.

Tabelle 28:

Summe der anfallenden Investitions- und Nebenkosten für die Sanierung und die geplanten Neubauten sowie Summe der Kosten für die Photovoltaikanlagen über die Betrachtungszeit 2022 bis 2030 für die Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 1.

Kostenbereich	Summe der Investitions- und Nebenkosten für die Gesamtheit der Gebäude (2022 bis 2030) gemäß Szenario 1 [T€] (brutto)
KG 300 (Bauwerk)	204.649
KG 400 (Anlagentechnik ohne Photovoltaik)	78.206
KG 700 (Nebenkosten)	70.714
Summe KG 300, KG 400, KG 700	353.568
<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	<i>1.713</i>
Photovoltaikkosten (KG 400)	27.470
Nebenkosten Photovoltaik (KG 700)	6.868
Gesamtsumme	387.906

Für die Ermittlung der Energiekosten werden die Tarife der Stadt Oldenburg und weitere Quellen gemäß Kapitel 2.9.3 verwendet. Dabei müssen die Endenergieverbräuche aus Kapitel 4.2.1 für folgende Energieträger weiter unterteilt werden:

- Biomasse: Aufteilung in Holzpellet, Holzhackschnitzel und Scheitholz
- Netzstrom: Aufteilung in Wärmepumpenstrom und sonstigen Strom

Abgesehen davon, dass der Wärmepumpenstrom zu einem niedrigeren Tarif als der sonstige Netzstrom abgerechnet wird, kann auch nur der sonstige Strom durch selbst genutzten PV-Strom ersetzt werden. Tabelle 31 enthält die jährlichen Energiekosten für die einzelnen Gebäudecluster sowie die Gesamtheit der Gebäude ohne Berücksichtigung des erzeugten PV-Stroms.

Tabelle 29:
Jährliche Energiekosten je Energieträger von 2021 bis 2030 für den Betrieb der städtischen Gebäude gemäß Szenario 1 ohne Berücksichtigung des PV-Stroms.

Cluster	Energieträger	Energiekosten ohne Berücksichtigung des PV-Stroms gemäß Szenario 1 [T€/a] (brutto)									
		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Kindertagesstätten	Erdgas	96,6	88,6	80,6	72,5	64,5	56,5	48,5	40,5	32,4	24,4
	Biomasse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netzstrom	152,1	164,1	176,0	188,0	200,0	212,0	223,9	235,9	247,9	259,9
	Summe	248,7	252,6	256,6	260,5	264,5	268,5	272,4	276,4	280,3	284,3
Grundschulen	Erdgas	345,1	310,5	275,9	241,3	206,7	172,1	137,4	102,8	68,2	33,6
	Biomasse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netzstrom	210,5	258,0	305,4	352,9	400,3	447,8	495,3	542,7	590,2	637,6
	Summe	555,6	568,5	581,3	594,2	607,0	619,9	632,7	645,6	658,4	671,3
Weiterführende Schulen	Erdgas	665,6	603,7	541,9	480,1	418,2	356,4	294,5	232,7	170,8	109,0
	Biomasse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netzstrom	637,6	724,2	810,9	897,5	984,2	1.070,9	1.157,5	1.244,2	1.330,9	1.417,5
	Summe	1.303,1	1.328,0	1.352,8	1.377,6	1.402,4	1.427,2	1.452,0	1.476,9	1.501,7	1.526,5
Berufsschulen	Erdgas	131,0	117,8	104,6	91,4	78,2	65,0	51,8	38,6	25,4	12,2
	Biomasse	11,0	9,7	8,5	7,3	6,1	4,9	3,7	2,4	1,2	0,0
	Netzstrom	329,5	342,0	354,5	366,9	379,4	391,8	404,3	416,7	429,2	441,7
	Summe	471,5	469,5	467,6	465,6	463,7	461,7	459,7	457,8	455,8	453,9
Sporthallen	Erdgas	236,5	212,5	188,5	164,5	140,5	116,5	92,4	68,4	44,4	20,4
	Biomasse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netzstrom	324,3	341,4	358,6	375,8	393,0	410,2	427,4	444,6	461,8	479,0
	Summe	560,8	554,0	547,1	540,3	533,5	526,7	519,9	513,0	506,2	499,4
Verwaltungsgebäude	Erdgas	190,8	170,2	149,5	128,8	108,1	87,4	66,7	46,1	25,4	4,7
	Biomasse	36,0	34,3	32,6	31,0	29,3	27,6	26,0	24,3	22,6	21,0
	Netzstrom	322,9	335,7	348,6	361,5	374,4	387,3	400,1	413,0	425,9	438,8
	Summe	549,6	540,2	530,7	521,2	511,8	502,3	492,8	483,4	473,9	464,4
Restcluster	Erdgas	256,4	228,8	201,2	173,6	146,0	118,4	90,8	63,2	35,6	8,0
	Biomasse	25,0	24,5	24,1	23,6	23,2	22,7	22,3	21,8	21,4	21,0
	Netzstrom	362,2	395,5	429,9	464,4	498,8	533,3	567,7	602,1	636,6	671,0
	Summe	643,6	648,8	655,2	661,6	668,0	674,4	680,8	687,2	693,6	700,0
Gesamtheit der Gebäude	Erdgas	1.922,1	1.732,1	1.542,1	1.352,1	1.162,2	972,2	782,2	592,2	402,2	212,3
	Biomasse	36,0	34,3	32,6	31,0	29,3	27,6	26,0	24,3	22,6	21,0
	Netzstrom	2.339,0	2.560,9	2.784,0	3.007,0	3.230,1	3.453,2	3.676,3	3.899,3	4.122,4	4.345,5
	Summe	4.297,0	4.327,3	4.358,7	4.390,1	4.421,6	4.453,0	4.484,4	4.515,8	4.547,3	4.578,7

Aufgrund des Wechsels von den kostengünstigeren Energieträgern Erdgas und Biomasse auf den Strom für die Wärmepumpen erhöhen sich die Energiekosten ohne die Berücksichtigung des PV-Stroms trotz der Sanierungen von 4,3 Millionen Euro/a im Jahr 2021 auf knapp 4,6 Millionen Euro/a im Jahr 2030.

Da die Photovoltaik gemäß Tabelle 26 nur für die Gesamtheit der Gebäude bestimmt wurde und in dieser Studie nicht auf die einzelnen Gebäudecluster aufgeteilt wurde, kann auch die Nutzung des PV-Stroms nicht auf die Gebäudecluster verteilt werden. Für die Gesamtheit der Gebäude wurde der erzeugte PV-Strom jedoch unterteilt in selbst genutzten Strom, der entsprechend vom Netzstrom abgezogen wurde, und eingespeisten Strom ins Netz, für den der Einspeisetarif gemäß Tabelle 13 angerechnet wird. Dabei wurden basierend auf den Erfahrungen mit den Effizienzhaus Plus-Bildungsbauten [25] und den Plusenergieschulen aus EnEff:Schule [26] folgende maximale Anteile als selbst genutzter Strom angerechnet:

- Selbst genutzter PV-Strom ist maximal 50 % des sonstigen Netzstroms (ohne Wärmepumpenstrom).
- Selbst genutzter PV-Strom ist maximal 50 % des gesamten erzeugten PV-Stroms.

Von diesen beiden Werten wird jeweils der kleinere Wert ermittelt und als selbst genutzter PV-Strom angerechnet, d. h. vom Netzstrom abgezogen. Der restliche erzeugte PV-Strom wird als eingespeister Strom angesetzt und mit dem Einspeisetarif vergütet. Damit ergeben sich die Energiekosten aus Tabelle 30. Bei Berücksichtigung des selbst genutzten und eingespeisten PV-Stroms reduzieren sich die Energiekosten von 4,3 Millionen Euro/a im Jahr 2021 auf 2,3 Millionen Euro/a im Jahr 2030. Summiert man die Kosten für den Sanierungszeitraum 2022 bis 2030 (neun Jahre), so ergeben sich Energiekosten von 26,5 Millionen Euro.

Tabelle 30:
 Jährliche Energiekosten je Energieträger von 2021 bis 2030 für den Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude gemäß Szenario 1 mit Berücksichtigung des PV-Stroms.

Energie-träger	Energiekosten für die Gesamtheit der Gebäude mit Berücksichtigung des PV-Stroms gemäß Szenario 1 [T€/a] bzw. für die Summe 2022 bis 2030 [T€] (jeweils brutto)										
	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	Summe 2022 bis 2030
Erdgas	1.922,1	1.732,1	1.542,1	1.352,1	1.162,2	972,2	782,2	592,2	402,2	212,3	8.749,6
Biomasse	36,0	34,3	32,6	31,0	29,3	27,6	26,0	24,3	22,6	21,0	248,6
Netz-strom	2.339,0	2.259,0	2.180,0	2.101,2	2.022,4	2.182,5	2.377,6	2.573,0	2.768,1	2.963,2	21.426,8
PV-Stromein-speisung	0,0	-68,3	-136,5	-204,8	-273,1	-395,4	-525,6	-655,8	-786,0	-916,2	-3.961,7
Summe	4.297,0	3.957,1	3.618,2	3.279,5	2.940,8	2.786,9	2.660,2	2.533,6	2.406,9	2.280,1	26.463,3

4.2.5 Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik

Der Materialaufwand für die energetische Sanierung der Gebäudehüllflächen, den Einbau der Wärmepumpen als neue Wärmeerzeuger und sonstiger Anlagentechnik sowie für die Neubauten verursacht entsprechend den jährlichen Sanierungen und Neubauten insgesamt 12.214 t/a anfallende Treibhausgasemissionen und ist in Tabelle 31 aufgeschlüsselt.

Tabelle 31:
 Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die energetische Sanierung und die Neubauten der städtischen Gebäude in Oldenburg gemäß Szenario 1.

Cluster	Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 1 [t/a]							
	Energetische Sanierung						Neubauten	Summe
	Bauteile	Luft-Wasser-Wärmepumpen	Sole-Wasser-Wärmepumpen	Austausch der Heizkörper	Lüftung mit WRG	LED-Beleuchtung		
Kindertagesstätten	388,6	1,4	2,2	22,4	91,3	6,4	123,9	636,0
Grundschulen	2.032,5	4,1	9,5	94,7	496,5	20,8	565,0	3.223,1
Weiterführende Schulen	2.536,1	4,6	15,6	154,9	1.063,0	40,6	509,6	4.324,3
Berufsschulen	455,3	1,1	3,3	32,8	246,9	21,8	0	761,3
Sporthallen	1.108,7	3,4	5,7	57,2	63,9	15,6	0	1.254,5
Verwaltungsgebäude	500,8	1,3	3,5	34,8	12,9	17,1	0	570,6
Restcluster	976,9	4,2	5,0	51,4	230,0	17,2	159,2	1.443,9
Gesamtheit der Gebäude	7.998,8	20,0	44,8	448,2	2.204,5	139,6	1.357,7	12.213,6

Summiert man die jährlich anfallenden Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik für die energetische Sanierung und die Neubauten über die Betrachtungsjahre 2022 bis 2030 (neun Jahre) auf, so erhält man die insgesamt gemäß Szenario 1 in diesem Bereich anfallenden Treibhausgasemissionen von 109.922 t, siehe Tabelle 32.

Für die Photovoltaikanlagen wird der nennleistungsbezogene Kennwert für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung aus Kapitel 2.10.3 mit der benötigten Nennleistung der Photovoltaik zur Erreichung der Klimaneutralität im Jahr 2030 multipliziert. Die damit entstehenden Treibhausgasemissionen für die Photovoltaik betragen 31.886 t und sind ebenfalls in Tabelle 32 eingetragen. Somit ergibt sich eine Gesamtsumme der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Gesamtheit der Gebäude von 141.808 t als Sockelbeitrag. Dieser wird im Gegensatz zu den betriebsbedingten Treibhausgasemissionen basierend auf der Endenergie im Jahr 2030 nicht klimaneutral gestellt.

Tabelle 32:

Summe der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik über die Betrachtungszeit 2022 bis 2030 für die Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 1.

Bereich		Summe der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Gesamtheit der Gebäude (2022 bis 2030) [t]
Energetische Sanierung	Bauteile	71.988,8
	Luft-Wasser-Wärmepumpen	180,3
	Sole-Wasser-Wärmepumpen	403,5
	Austausch der Heizkörper	4.033,4
	Lüftung mit WRG	19.840,8
	LED-Beleuchtung	1.256,5
Neubauten		12.219,0
Photovoltaik		31.885,2
Gesamtsumme		141.807,5

4.3 Fazit des Szenarios

Mit dem Szenario 1 mit dem Zieljahr 2030 kann der Endenergiebedarf der stadteigenen Gebäude von 54.169 MWh/a im Jahr 2021 auf 24.540 MWh/a im Jahr 2030 gesenkt werden. Das ist eine Reduzierung der Endenergie um 54,7 % innerhalb von neun Jahren. Die PV-Anlagen zur Klimaneutralstellung erzeugen 23.316 MWh/a Strom im Jahr 2030. Trotz der erreichten Klimaneutralität bleiben noch 1.224 MWh/a Endenergie im Jahr 2030 übrig (2,3 % der Endenergie im Jahr 2021).

Die jährlichen Treibhausgasemissionen werden von 13.048 t auf 6.284 t durch die reine Sanierung vermindert, also um beträchtliche 51,8 %. Dazu tragen die sich innerhalb der zehn betrachteten Jahre verringernenden CO₂-Äquivalente für den Strom, der Umstieg von Erdgas auf elektrisch betriebene Wärmepumpen sowie natürlich die Gebäudesanierungen bei. Um die verbleibenden Treibhausgasemissionen auszugleichen und damit den Betrieb der städtischen Gebäude inklusive Nutzerstrom klimaneutral zu stellen, werden Photovoltaikanlagen mit einer Nennleistung von 27.946 kW_p benötigt, die einer Modulfläche von 136.534 m² entsprechen. Damit müssen, ermittelt über die geeigneten Dachanteile der gewählten Typgebäude und bereits unter Berücksichtigung von Abständen zum Dachrand und zwischen den PV-Modulen durchschnittlich

67,5 % der für PV geeigneten Dachflächen belegt werden. Die Treibhausgasemissionen im Jahr 2030 sind damit in der Jahresbilanz Null.

Für die Sanierung der Gesamtheit der stadteigenen Gebäude und die geplanten Neubauten wird in Szenario 1 von Investitionskosten in den Kostengruppen 300 und 400 sowie den zugehörigen Nebenkosten (KG 700) ab 2022 von jährlich rund 39,3 Millionen Euro brutto ausgegangen. Insgesamt entstehen in den neun Jahren damit 353,6 Millionen Euro Investitions- und Planungskosten, die mit 34,3 Millionen Euro Kosten für die Investitionen und die Planung der Photovoltaik ergänzt werden müssen. Die Gesamtsumme der ermittelten Investitions- und Planungskosten beträgt somit 387,9 Millionen Euro. Die Energiekosten inklusive der Anrechnung des Photovoltaikstroms sinken von anfänglich 4,3 Millionen Euro/a (2021) auf 2,3 Millionen Euro/a brutto (2030).

Durch den Materialaufwand der Sanierung und der Instandhaltung der sanierten Gebäude sowie der Neubauten und der Photovoltaik ergeben sich zusätzlich anfallende Treibhausgasemission über den Zeitraum von 2022 bis 2030 von insgesamt 141.808 t.

Dividiert man die Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik mit den Treibhausgasemissionseinsparungen durch den verringerten Energiebedarf im Zieljahr gegenüber dem Istzustand (13.048 t/a), so erhält man eine vereinfachte Ermittlung der Treibhausgas-Amortisationszeit der Materialaufwände. Das Ergebnis für Szenario 1 beträgt 10,9 Jahre und zeigt, dass die Mehraufwände für die Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik deutlich vor Ende der Lebensdauer der einzelnen Komponenten ausgeglichen werden können. Es besteht also keine Gefahr, dass höhere Treibhausgasemissionen durch die sogenannte graue Energie entstehen als über die Energieeinsparungen rückerwirtschaftet werden können. Dabei werden vereinfacht weder die leicht unterschiedlichen Treibhausgaseinsparungen in den unterschiedlichen Jahren im Betrieb noch aufgrund der fehlenden Datenlage der Einfluss der sich ändernden CO₂-Äquivalente auf die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik berücksichtigt. Würden alle Treibhausgasaufwände und -einsparungen im Jahr 2022 anfallen, d. h. theoretisch alle Sanierungen und Neubauten sowie die Photovoltaik im Jahr 2022 umgesetzt werden, so ergäbe sich eine etwas geringere Amortisationszeit von 10,0 Jahren.

5 Szenario 2

5.1 Beschreibung des Szenarios

Szenario 2 mit dem Zieljahr 2035 ist gekennzeichnet durch folgende Rahmenbedingungen:

- Die jährliche Sanierungsrate beträgt 7,14 %/a. Es werden die insgesamt 282 Gebäude aus der Sanierungsphase 1 mit den Baujahren bis einschließlich 2010 saniert, siehe Tabelle 21. Damit werden pro Jahr 20,1 Gebäude in Angriff genommen.
- Die angestrebte Sanierungsqualität entspricht Szenario 1 und ist für normale Sanierungen das EG 40 EE-Niveau (vergl. Tabelle 2). Für Gebäude, die unter Denkmalschutz stehen, wird ein reduziertes Dämmniveau festgelegt, siehe Tabelle 3. Die Energieerzeugung wird bei der Sanierung auf Außenluft-Wasser-Wärmepumpen (90 %) und Sole-Wasser-Wärmepumpen (10 %) umgestellt. Die Bestandsheizkörper werden bei der Sanierung durch neue ersetzt, die Heizungsverteilung wird beibehalten. Unterschiedliche Arten von Lüftungsanlagen und der Trinkwarmwasserbereitung werden entsprechend den Angaben der Stadt Oldenburg in Abhängigkeit von unterschiedlichen Raumnutzungen eingesetzt. Ähnliches gilt für die Gebäudeautomation. Die Beleuchtung wird bei der Sanierung komplett auf neue LED-Leuchten umgestellt.
- Die CO₂-Äquivalente der eingesetzten Energieträger entsprechen Szenario 1 und basieren auf der DIN V 18599-1:2018, siehe [6]. Für den Energieträger Strom und den eingespeisten Strom aus PV-Anlagen werden zeitlich veränderliche CO₂-Äquivalente gemäß IINAS eingesetzt, siehe Kapitel 2.6. Die gemäß DIN V 18599 ermittelten Endenergiekennwerte müssen für die Energieträger Erdgas und Biomasse zusätzlich mit dem Verhältnis Brennwert/Heizwert umgerechnet werden, bevor mit den CO₂-Äquivalenten multipliziert werden darf.

5.2 Szenarienergebnisse

5.2.1 Endenergiebedarf in der Betriebsphase

Die Szenarienergebnisse für den Endenergiebedarf im Betrieb werden im Folgenden aufgeteilt in die Cluster und für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude in einer Tabelle sowie in Diagrammen präsentiert. Für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude sind zwei Diagramme enthalten, die den Endenergiebedarf einmal aufgeteilt in die genutzten Energieträger und einmal aufgeteilt in die Gebäudecluster darstellen. Dabei werden zunächst die Endenergiebedarfswerte ohne Berücksichtigung des benötigten Photovoltaikstroms zur Erreichung der Klimaneutralität aufgezeigt.

Tabelle 33 enthält den berechneten Endenergiebedarf der Betriebsphase für die Jahre 2021 bis 2035. Während die Werte für die Energieträger Erdgas und Biomasse (eingesetzt bei den Berufsschulen und Gebäuden im Restcluster) über die Jahre sinken, erhöht sich andererseits der Netzstrombedarf, weil weitere elektrische Wärmepumpen eingesetzt werden und der Nutzerstrombedarf über die Jahre gleich hoch angesetzt wurde. Die Sanierungsrate verläuft bis zum Zieljahr 2035 konstant. Allerdings werden die geplanten Neubauten in der Studie in allen drei Szenarien nur auf die Jahre 2022 bis 2030 linear verteilt. Deshalb ergibt sich bei den Clustern mit geplanten Neubauten kein ganz linearer Verlauf beim Netzstrom und auch bei der Summe der Endenergie.

Die Summe der Endenergie in Szenario 2 reduziert sich wie in Szenario 1 von 54.169 MWh/a im Jahr 2021 durch die Sanierungen auf 24.540 MWh/a im Zieljahr. Allerdings ist das Zieljahr in Szenario 2 das Jahr 2035 und nicht mehr das Jahr 2030. Die Reduzierung erfolgt damit aber gleichermaßen auf 45 % des Ausgangsbedarfs. Dabei ist die weitere Reduzierung durch die Bilanzierung des über die Photovoltaik erzeugten Stroms noch nicht berücksichtigt.

Bild 10 enthält die Endenergiebedarfsverläufe für die sechs Gebäudecluster mit Typgebäuden für die Jahre 2021 bis 2035. Neben dem jeweils sinkenden Gesamtenergiebedarf sind auch die einzelnen Anteile der Energieträger zu erkennen, so auch, dass es nur im Cluster Berufsschule (und im nicht abgebildeten Restcluster) Biomasseanteile gibt. Aufgrund der durchgeführten baulichen Sanierungen und der Nutzung von erneuerbaren Energien durch die Wärmepumpen sinken der Erdgasbedarf und der Biomassebedarf stärker als der Netzstrombedarf steigt.

Tabelle 33:
 Jährliche Endenergiebedarfswerte je Energieträger von 2021 bis 2035 für den
 Betrieb der städtischen Gebäude gemäß Szenario 2 mit dem Zieljahr 2035.

Cluster	Energie- träger	Endenergiebedarf gemäß Szenario 2 [MWh/a]														
		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Kinder- tages- stätten	Erdgas	2.180	2.064	1.948	1.831	1.715	1.599	1.482	1.366	1.250	1.133	1.017	901	784	668	552
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	669	708	747	786	826	865	904	943	982	1.022	1.051	1.080	1.109	1.138	1.167
	Summe	2.849	2.772	2.695	2.618	2.541	2.463	2.386	2.309	2.232	2.155	2.067	1.980	1.893	1.805	1.718
Grund- schulen	Erdgas	7.791	7.288	6.786	6.284	5.781	5.279	4.777	4.275	3.772	3.270	2.768	2.266	1.763	1.261	759
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	904	1.058	1.211	1.365	1.518	1.672	1.825	1.979	2.132	2.286	2.402	2.518	2.634	2.750	2.866
	Summe	8.695	8.346	7.997	7.648	7.300	6.951	6.602	6.254	5.905	5.556	5.170	4.784	4.398	4.011	3.625
Weiter- füh- rende Schulen	Erdgas	15.025	14.127	13.230	12.332	11.435	10.537	9.640	8.742	7.845	6.947	6.050	5.152	4.255	3.357	2.460
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	2.735	3.002	3.269	3.535	3.802	4.069	4.336	4.603	4.870	5.136	5.364	5.592	5.819	6.047	6.275
	Summe	17.760	17.129	16.498	15.868	15.237	14.606	13.976	13.345	12.714	12.084	11.414	10.744	10.074	9.404	8.734
Berufs- schulen	Erdgas	2.957	2.765	2.574	2.382	2.191	1.999	1.808	1.616	1.425	1.233	1.042	850	659	467	276
	Bio- masse	291	270	249	228	208	187	166	145	125	104	83	62	42	21	0
	Netz- strom	1.422	1.459	1.495	1.532	1.569	1.605	1.642	1.679	1.715	1.752	1.789	1.825	1.862	1.899	1.935
	Summe	4.669	4.494	4.318	4.143	3.967	3.791	3.616	3.440	3.265	3.089	2.914	2.738	2.562	2.387	2.211
Sport- hallen	Erdgas	5.340	4.991	4.642	4.294	3.945	3.597	3.248	2.900	2.551	2.203	1.854	1.506	1.157	809	460
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	1.391	1.448	1.504	1.561	1.617	1.674	1.730	1.787	1.843	1.900	1.956	2.013	2.070	2.126	2.183
	Summe	6.731	6.439	6.147	5.855	5.563	5.271	4.979	4.687	4.395	4.103	3.811	3.519	3.227	2.935	2.643
Verwal- tungs- ge- bäude	Erdgas	4.308	4.008	3.708	3.407	3.107	2.807	2.507	2.207	1.907	1.607	1.306	1.006	706	406	106
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	1.389	1.431	1.472	1.514	1.555	1.597	1.638	1.680	1.721	1.763	1.805	1.846	1.888	1.929	1.971
	Summe	5.697	5.438	5.180	4.921	4.663	4.404	4.145	3.887	3.628	3.370	3.111	2.852	2.594	2.335	2.077
Rest- cluster	Erdgas	5.788	5.388	4.987	4.586	4.186	3.785	3.385	2.984	2.583	2.183	1.782	1.381	981	580	180
	Bio- masse	426	421	417	412	407	402	397	392	387	382	377	372	367	362	357
	Netz- strom	1.554	1.657	1.760	1.863	1.966	2.069	2.171	2.274	2.377	2.480	2.583	2.686	2.789	2.892	2.994
	Summe	7.769	7.466	7.163	6.861	6.558	6.255	5.953	5.650	5.347	5.045	4.742	4.440	4.137	3.834	3.532
Ge- sam- theit der Ge- bäude	Erdgas	43.388	40.631	37.874	35.117	32.360	29.603	26.846	24.090	21.333	18.576	15.819	13.062	10.305	7.548	4.791
	Bio- masse	717	691	666	640	614	589	563	537	512	486	460	435	409	383	357
	Netz- strom	10.065	10.762	11.459	12.156	12.853	13.550	14.248	14.945	15.642	16.339	16.949	17.560	18.170	18.781	19.391
	Summe	54.169	52.084	49.999	47.913	45.828	43.742	41.657	39.572	37.486	35.401	33.229	31.056	28.884	26.712	24.540

Szenario 2: Endenergie Betrieb

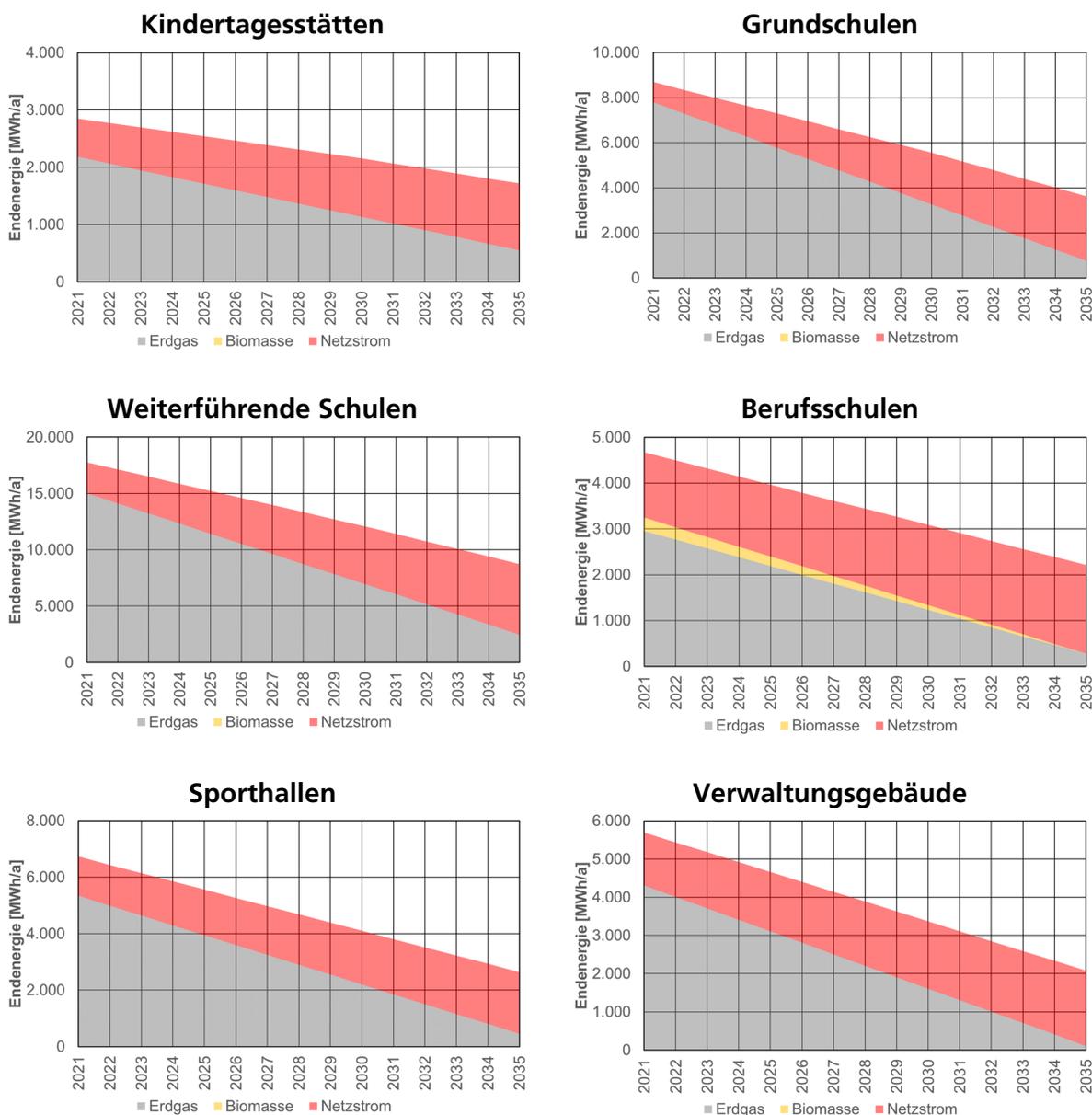


Bild 10:

Jährliche Endenergiebedarfswerte für den Betrieb der sechs spezifischen Gebäudecluster aufgeteilt in die genutzten Energieträger gemäß Szenario 2.

In Bild 11 und Bild 12 ist der Endenergiebedarf der Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 2 dargestellt, aufgeteilt in die verwendeten Energieträger bzw. in die insgesamt sieben Gebäudecluster. Aus der Aufteilung in die Gebäudecluster ist ersichtlich, dass das Cluster „Weiterführende Schulen“ den höchsten Energiebedarf der Cluster hat, gefolgt von den Grundschulen.

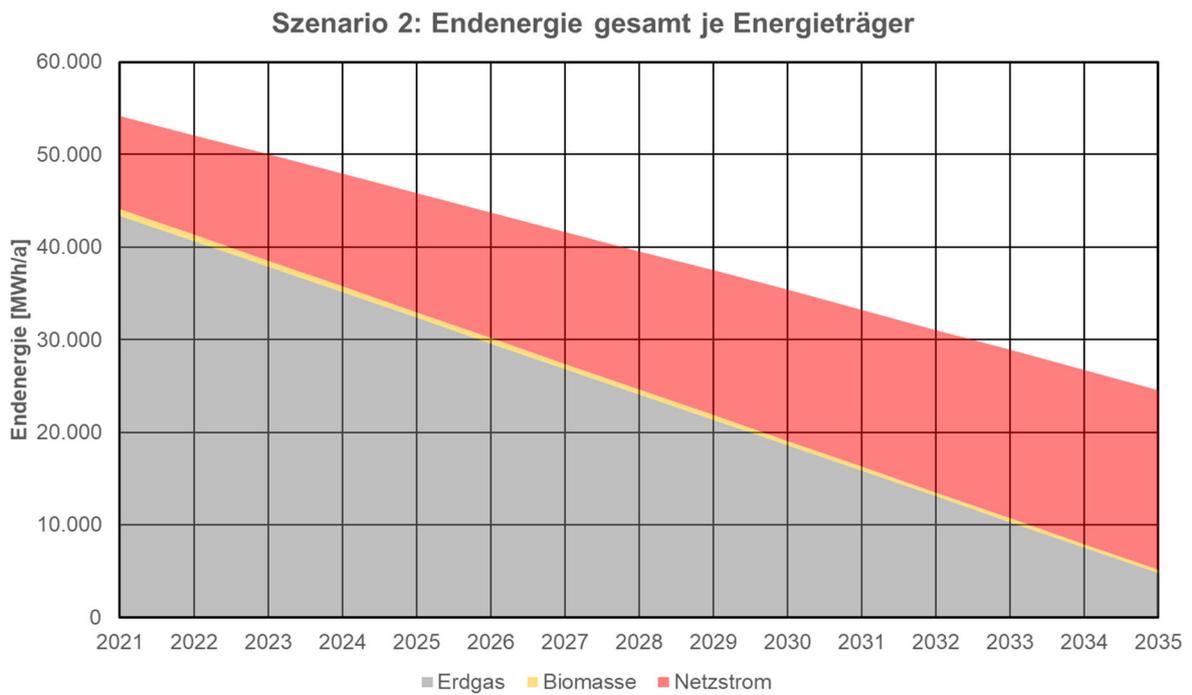


Bild 11:
 Jährliche Endenergiebedarfswerte für den Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Energieträger gemäß Szenario 2.

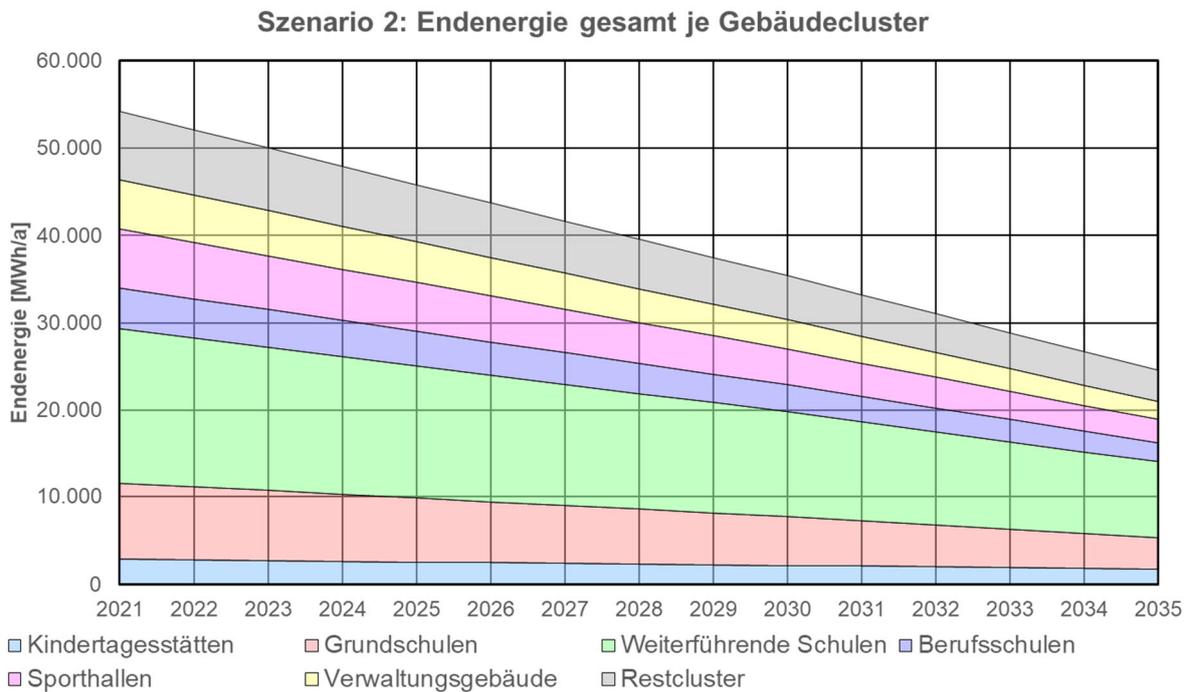


Bild 12:
 Jährliche Endenergiebedarfswerte für den Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Gebäudecluster gemäß Szenario 2.

5.2.2 Treibhausgasemissionen in der Betriebsphase

Auch die Szenarienergebnisse für die Treibhausgasemissionen aus der Betriebsphase werden aufgeteilt in die Cluster und für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude in einer Tabelle sowie in Diagrammen präsentiert. Für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude sind zwei Diagramme enthalten, die die Treibhausgasemissionen einmal aufgeteilt in die genutzten Energieträger und einmal aufgeteilt in die Gebäudecluster darstellen. Die Treibhausgasemissionen werden in den Tabellen und Bildern in der Einheit t (Tonnen) ausgewiesen, der verkürzten Version von $t_{CO_2-Äq}$. Die Ermittlung des benötigten Photovoltaikstroms für die Klimaneutralität wird im nächsten Kapitel zusammengefasst.

Tabelle 34 enthält die berechneten Treibhausgasemissionen der Betriebsphase für die Jahre 2021 bis 2035. Während die Werte für die Energieträger Erdgas und Biomasse (eingesetzt bei den Berufsschulen und Gebäuden im Restcluster) entsprechend den Endenergiewerten über die Jahre sinken, erhöhen sich andererseits die Treibhausgasemissionen aus dem Netzstrombedarf trotz sinkender CO_2 -Äquivalente, weil weitere elektrische Wärmepumpen eingesetzt werden und der Nutzerstrombedarf über die Jahre gleich hoch angesetzt wurde. Der Verlauf der Treibhausgasemissionen ist nicht ganz linear, weil die geplanten Neubauten nur bis zum Jahr 2030 einberechnet werden und weil die CO_2 -Äquivalente des Netzstroms ab 2030 nicht mehr linear absinkend ist.

Die Summe der Treibhausgasemissionen in Szenario 2 reduziert sich von 13.048 t/a im Jahr 2021 durch die Sanierungen auf 5.130 t/a im Jahr 2035 und damit auf 39,3 % der Ausgangsemissionen. Dabei ist die weitere Reduzierung durch die Bilanzierung des über die Photovoltaik erzeugten Stroms noch nicht berücksichtigt.

Bild 13 enthält die Treibhausgasemissionsverläufe für die sechs Gebäudecluster mit Typgebäuden für die Jahre 2021 bis 2035. Neben den jeweils sinkenden Gesamtemissionen sind auch die einzelnen Anteile der Energieträger zu erkennen, so auch, dass es nur im Cluster Berufsschule (und im nicht abgebildeten Restcluster) kleine Biomasseanteile gibt. Aufgrund der durchgeführten baulichen Sanierungen und der Nutzung von erneuerbaren Energien durch die Wärmepumpen sinken die Treibhausgasemissionen aus den Energieträgern Erdgas und Biomasse stärker als die Treibhausgasemissionen aus dem Netzstrom steigen.

Tabelle 34:
 Jährliche Treibhausgasemissionen je Energieträger von 2021 bis 2035 für den
 Betrieb der städtischen Gebäude gemäß Szenario 2 mit dem Zieljahr 2035.

Cluster	Energie- träger	Treibhausgasemissionen gemäß Szenario 2 [t/a]														
		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Kinder- tages- stätten	Erdgas	475	450	425	399	374	348	323	298	272	247	222	196	171	146	120
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	237	244	250	256	261	266	269	272	274	275	271	266	259	253	245
	Summe	712	694	675	656	635	614	593	569	546	522	493	462	430	398	365
Grund- schulen	Erdgas	1.698	1.589	1.479	1.370	1.260	1.151	1.041	932	822	713	603	494	384	275	165
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	320	364	406	445	480	513	544	570	595	616	620	619	616	611	602
	Summe	2.018	1.953	1.885	1.815	1.740	1.664	1.585	1.502	1.417	1.329	1.223	1.113	1.001	885	767
Weiter- füh- rende Schulen	Erdgas	3.275	3.080	2.884	2.688	2.493	2.297	2.101	1.906	1.710	1.514	1.319	1.123	928	732	536
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	968	1.033	1.095	1.153	1.202	1.249	1.292	1.326	1.359	1.384	1.384	1.376	1.362	1.342	1.318
	Summe	4.244	4.112	3.979	3.841	3.694	3.546	3.394	3.231	3.069	2.899	2.703	2.499	2.289	2.074	1.854
Berufs- schulen	Erdgas	645	603	561	519	478	436	394	352	311	269	227	185	144	102	60
	Bio- masse	11	10	9	8	8	7	6	5	5	4	3	2	2	1	0
	Netz- strom	503	502	501	499	496	493	489	483	479	472	461	449	436	422	406
	Summe	1.159	1.115	1.071	1.027	981	936	890	841	794	745	692	637	581	524	467
Sport- hallen	Erdgas	1.164	1.088	1.012	936	860	784	708	632	556	480	404	328	252	176	100
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	492	498	504	509	511	514	516	515	514	512	505	495	484	472	458
	Summe	1.657	1.586	1.516	1.445	1.371	1.298	1.224	1.147	1.070	992	909	823	737	648	559
Verwal- tungs- ge- bäude	Erdgas	939	874	808	743	677	612	547	481	416	350	285	219	154	88	23
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	492	492	493	493	491	490	488	484	480	475	466	454	442	428	414
	Summe	1.431	1.366	1.301	1.236	1.169	1.102	1.035	965	896	825	750	674	596	517	437
Rest- cluster	Erdgas	1.262	1.174	1.087	1.000	912	825	738	650	563	476	388	301	214	126	39
	Bio- masse	16	16	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14	13	13
	Netz- strom	550	570	590	607	621	635	647	655	663	668	666	661	653	642	629
	Summe	1.828	1.760	1.692	1.622	1.549	1.475	1.400	1.320	1.241	1.158	1.069	976	880	782	681
Ge- sam- theit der Ge- bäude	Erdgas	9.459	8.858	8.257	7.656	7.055	6.454	5.853	5.252	4.651	4.050	3.449	2.848	2.247	1.646	1.044
	Bio- masse	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13
	Netz- strom	3.563	3.702	3.839	3.963	4.062	4.160	4.246	4.304	4.364	4.403	4.373	4.320	4.252	4.169	4.072
	Summe	13.048	12.585	12.120	11.642	11.139	10.635	10.119	9.575	9.034	8.471	7.839	7.183	6.513	5.829	5.130

Szenario 2: Treibhausgasemissionen Betrieb

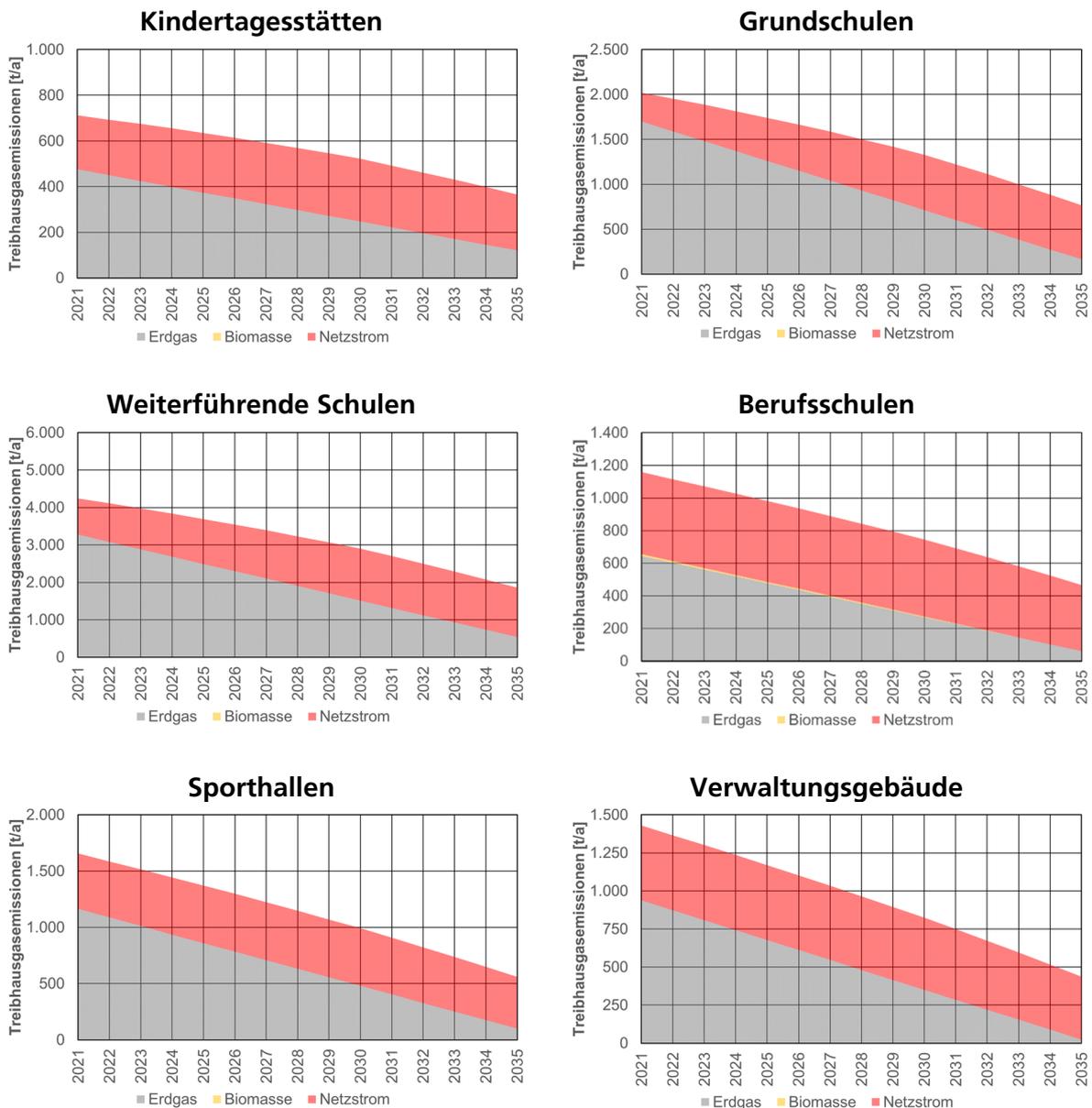


Bild 13:

Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der sechs spezifischen Gebäudecluster aufgeteilt in die genutzten Energieträger gemäß Szenario 2.

In Bild 14 und Bild 15 sind die Treibhausgasemissionen der Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 2 dargestellt, aufgeteilt in die verwendeten Energieträger bzw. in die insgesamt sieben Gebäudecluster. Aus der Aufteilung in die Gebäudecluster ist ersichtlich, dass das Cluster „Weiterführende Schulen“ die höchsten Treibhausgasemissionen der Cluster verursacht, gefolgt von den Grundschulen.

Szenario 2: Treibhausgasemissionen gesamt je Energieträger

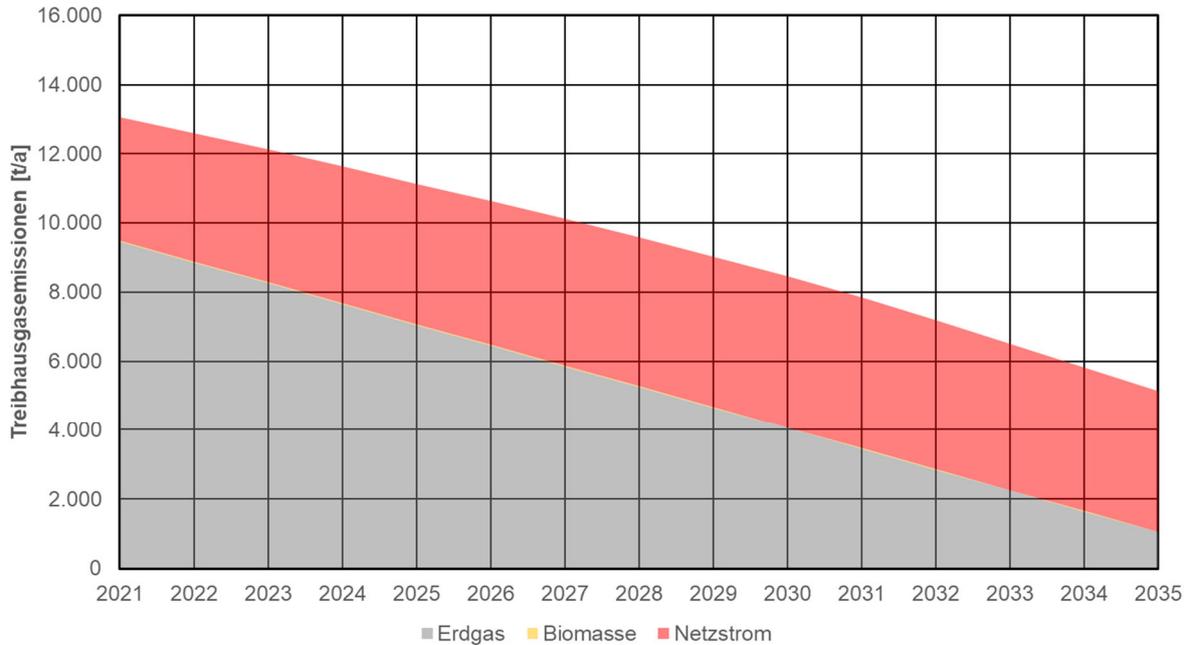


Bild 14:
Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Energieträger gemäß Szenario 2.

Szenario 2: Treibhausgasemissionen gesamt je Gebäudecluster

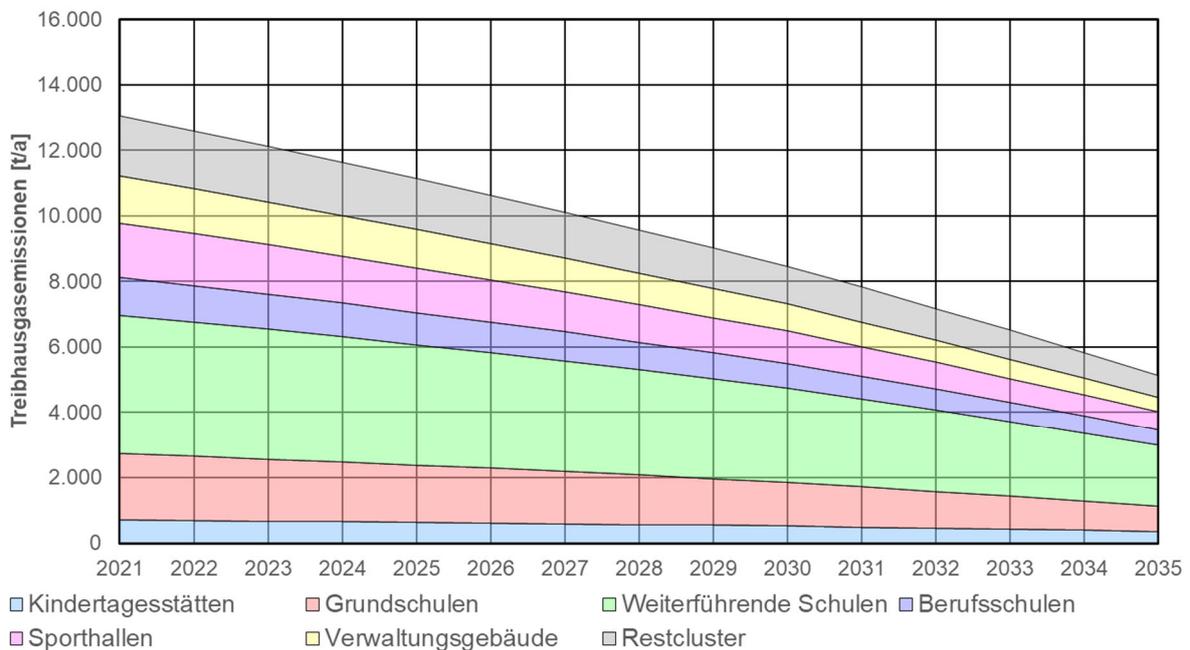


Bild 15:
Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Gebäudecluster gemäß Szenario 2.

5.2.3 Benötigter Photovoltaikstrom für die Klimaneutralität des Betriebs der städtischen Gebäude

Die im Jahr 2035 verbleibenden Treibhausgasemissionen von 5.130 t/a sollen durch die Erzeugung von Strom über PV-Module ausgeglichen werden und so der Betrieb der städtischen Gebäude in einer Jahresbilanz klimaneutral gestellt werden. Dafür werden bei einer CO₂-Äquivalente von -210 g/kWh für in das Stromnetz eingespeisten PV-Strom im Jahr 2035 insgesamt 24.428 MWh/a PV-Strom benötigt. Da die CO₂-Äquivalente für die Einspeisung von PV-Strom dem negativen Wert der CO₂-Äquivalente für den genutzten Strom aus dem Stromnetz entspricht, ist es bilanziell egal, ob der PV-Strom selbst genutzt wird oder eingespeist wird. Es sollte jedoch angestrebt werden, möglichst viel des PV-Stroms in den Gebäuden selbst zu nutzen, um das Stromnetz zu entlasten.

Mit dem Ansatz von 111 kWh PV-Strom pro m² Dachfläche und Jahr können die benötigte für Photovoltaik geeignete Dachfläche, die benötigte Modulfläche und die erforderliche Nennleistung in kW_p berechnet werden. Dieser Ansatz verwendet die Solarstrahlungsintensität in Oldenburg, berücksichtigt bereits die erforderlichen Abstände der Module zu den Dachrändern und zwischen den Modulreihen und beruht auf Modulen mit 350 W_p auf einer Fläche von 1,71 m², siehe auch Kapitel 2.7. Zusätzlich kann über die für PV geeigneten Dachflächen der Typgebäude der Anteil der davon benötigten Dachfläche ermittelt werden.

Damit ergeben sich folgende Kennwerte für die erforderliche Photovoltaik:

- Benötigte Dachfläche: 220.070 m²
- Benötigte Modulfläche: 143.045 m²
- Benötigte PV-Nennleistung: 29.278 kW_p
- Anteil der erforderlichen PV-Dachfläche an der für PV geeigneten Dachfläche: 70,7 %

Dabei kann nicht auf den Dächern jedes Gebäudeclusters die für das Gebäudecluster erforderliche PV-Strommenge erzeugt werden. Während dies basierend auf den gewählten Typgebäuden für die Grundschulen, Kindertagesstätten und Sporthallen leichter möglich ist, erscheint es vor allem für die Verwaltungsgebäude und die Weiterführenden Schulen als unmöglich. Deshalb werden die PV-Kennwerte in dieser Studie nur für die Gesamtheit der Gebäude bestimmt.

Wird dabei von einem linearen Zubau an PV-Fläche über die betrachteten Jahre ausgegangen, so ergeben sich die in Tabelle 35 zusammengestellten Kennwerte für die benötigte PV-Dachfläche, die Endenergie und die Treibhausgasemissionen inklusive Berücksichtigung des PV-Stroms.

Tabelle 35:

Benötigte Dachfläche für PV sowie Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen mit Berücksichtigung des PV-Stroms für die Klimaneutralität im Betrieb im Jahr 2035 gemäß Szenario 2.

Kennwert		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Benötigte Dachfläche für PV [m ²]		0	15.719	31.439	47.158	62.877	78.596	94.316	110.035	125.754	141.474	157.193	172.912	188.631	204.351	220.070
Endenergie inkl. PV-Strom [MWh/a]	Erdgas	43.388	40.631	37.874	35.117	32.360	29.603	26.846	24.090	21.333	18.576	15.819	13.062	10.305	7.548	4.791
	Biomasse	717	691	666	640	614	589	563	537	512	486	460	435	409	383	357
	Strombedarf	10.065	10.762	11.459	12.156	12.853	13.550	14.248	14.945	15.642	16.339	16.949	17.560	18.170	18.781	19.391
	PV-Strom	0	-1.745	-3.490	-5.235	-6.979	-8.724	-10.469	-12.214	-13.959	-15.704	-17.448	-19.193	-20.938	-22.683	-24.428
	Summe	54.169	50.339	46.509	42.679	38.848	35.018	31.188	27.358	23.527	19.697	15.780	11.863	7.946	4.029	112
Treibhausgasemissionen inkl. PV-Strom [t/a]	Erdgas	9.459	8.858	8.257	7.656	7.055	6.454	5.853	5.252	4.651	4.050	3.449	2.848	2.247	1.646	1.044
	Biomasse	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13
	Strombedarf	3.563	3.702	3.839	3.963	4.062	4.160	4.246	4.304	4.364	4.403	4.373	4.320	4.252	4.169	4.072
	PV-Strom	0	-600	-1.169	-1.706	-2.205	-2.678	-3.120	-3.518	-3.894	-4.232	-4.502	-4.722	-4.900	-5.036	-5.130
	Summe	13.048	11.985	10.951	9.936	8.933	7.957	6.999	6.058	5.139	4.239	3.337	2.462	1.614	793	0

Bild 16 zeigt den Verlauf der Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der stadteigenen Gebäude mit Berücksichtigung des erzeugten PV-Stroms über den Betrachtungszeitraum 2021 bis 2030 gemäß Szenario 2. Die Klimaneutralität wird erst im Zieljahr 2035 erreicht, in den Jahren zuvor verbleiben sich jährlich verringerte Treibhausgasemissionen.

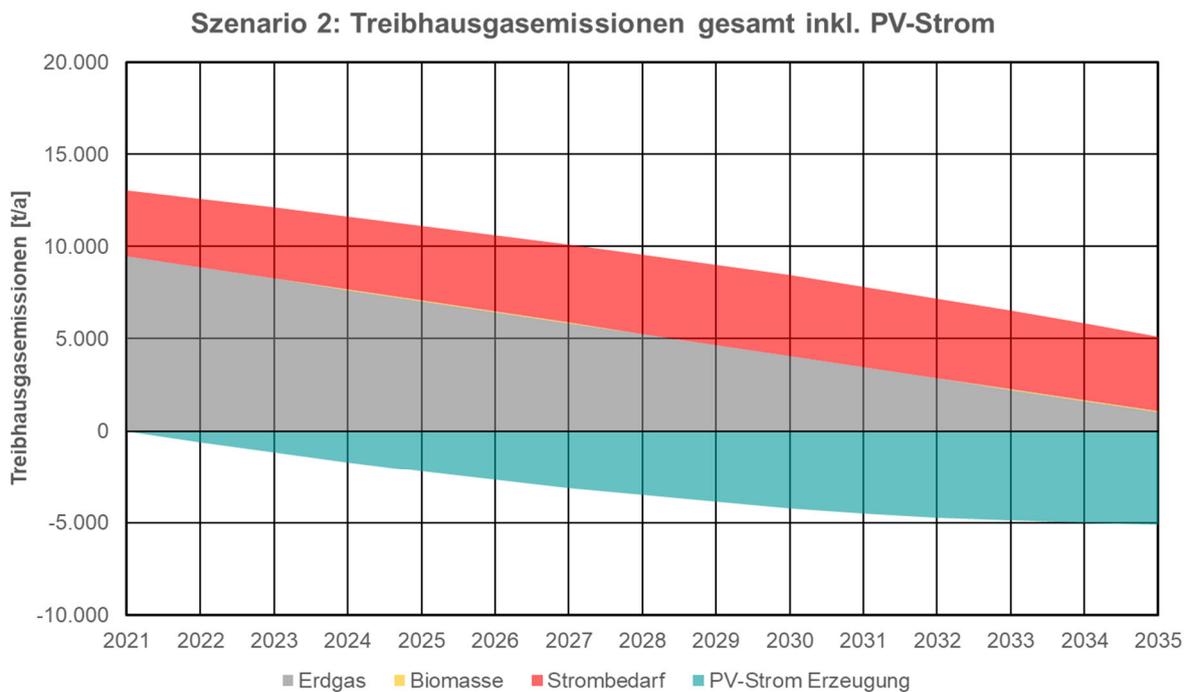


Bild 16:
 Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude inklusive der benötigten PV-Stromerzeugung für das Ziel Klimaneutralität aufgeteilt in die Energieträger gemäß Szenario 2.

5.2.4 Kosten: Investitionskosten und Energiekosten

Die Investitionskosten für die Sanierungen der städtischen Gebäude und die Mehrkosten gegenüber dem derzeitigen Energiestandard für die geplanten Neubauten (KG 300 (Bauwerk) und KG 400 (Anlagentechnik)) betragen für die Jahre 2022 bis 2030 jährlich 20,3 Millionen Euro brutto. Die dafür veranschlagten Planungskosten (25 %) betragen jährlich 5,1 Millionen Euro brutto. Die Aufteilung auf die einzelnen Komponenten ist in Tabelle 36 ersichtlich. Dabei sind die Kosten für die Photovoltaik nicht enthalten. Die Mehrkosten der geplanten Neubauten gegenüber dem bereits derzeit durch die Stadt Oldenburg angewandten Passivhausstandard im Bereich der Wärmepumpen (siehe dazu Kapitel 2.9) sind als Anteil der Kosten getrennt in Tabelle 36 eingetragen.

Da die Neubaukosten nur für die Jahre 2022 bis 2030 anfallen, ergeben sich leicht reduzierte jährliche Kosten für die Cluster Kindertagesstätten, Grundschulen, Weiterführende Schulen und das Restcluster in den Jahren 2031 bis 2035, siehe Tabelle 38. Die Investitionskosten für die Sanierungen der städtischen Gebäude (KG 300 (Bauwerk) und KG 400 (Anlagentechnik)) betragen für die Jahre 2031 bis 2035 jährlich 20,1 Millionen Euro brutto. Die dafür veranschlagten Planungskosten (25 %) betragen jährlich 5,0 Millionen Euro brutto.

Tabelle 36:
 Jährlich anfallende Investitions- und Nebenkosten für die Sanierung ohne Berücksichtigung der Photovoltaikkosten für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 2.

Cluster	Kosten	Jährliche Investitions- und Nebenkosten für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 2 [T€/a] (brutto)							
		Energetische Sanierung der Bauteile	Gerüste	Einbau Luft-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Sole-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Lüftung mit WRG	Einbau LED-Beleuchtung	Ersatz der Heizkörper	Summe
Kindertagesstätten	KG 300 & KG 400	642,0	22,5	82,5	20,9	106,2	33,6	39,5	947,3
	KG 700 (25 %)	160,5	5,6	20,6	5,2	26,6	8,4	9,9	236,8
	Summe	802,6	28,2	103,1	26,2	132,8	42,0	49,3	1.184,1
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	17,3	5,0	0	0	0	22,3
Grundschulen	KG 300 & KG 400	2.562,9	96,2	291,2	77,3	565,2	109,3	167,1	3.869,2
	KG 700 (25 %)	640,7	24,0	72,8	19,3	141,3	27,3	41,8	967,3
	Summe	3.203,6	120,2	363,9	96,6	706,5	136,7	208,9	4.836,5
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	63,0	20,9	0	0	0	83,9
Weiterführende Schulen	KG 300 & KG 400	5.008,6	174,8	357,6	98,4	1.200,8	213,7	273,2	7.327,1
	KG 700 (25 %)	1.252,1	43,7	89,4	24,6	300,2	53,4	68,3	1.831,8
	Summe	6.260,7	218,5	447,0	123,0	1.501,0	267,1	341,5	9.158,8
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	42,7	13,6	0	0	0	56,3
Berufsschulen	KG 300 & KG 400	650,8	57,7	74,1	19,4	279,2	114,9	57,8	1.253,9
	KG 700 (25 %)	162,7	14,4	18,5	4,8	69,8	28,7	14,5	313,5
	Summe	813,5	72,2	92,6	24,2	349,0	143,6	72,3	1.567,4
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	0	0	0	0	0	0
Sporthallen	KG 300 & KG 400	2.027,2	38,1	172,8	42,7	79,5	81,9	100,9	2.542,9
	KG 700 (25 %)	506,8	9,5	43,2	10,7	19,9	20,5	25,2	635,7
	Summe	2.534,0	47,6	216,0	53,3	99,4	102,3	126,1	3.178,7
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	0	0	0	0	0	0
Verwaltungsgebäude	KG 300 & KG 400	1.345,6	40,5	82,0	21,1	15,4	90,5	61,4	1.656,4
	KG 700 (25 %)	336,4	10,1	20,5	5,3	3,9	22,6	15,3	414,1
	Summe	1.681,9	50,6	102,5	26,4	19,3	113,1	76,7	2.070,5
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	0	0	0	0	0	0
Restcluster	KG 300 & KG 400	1.896,2	54,7	200,8	53,0	275,5	90,6	90,6	2.661,5
	KG 700 (25 %)	474,1	13,7	50,2	13,2	68,9	22,6	22,7	665,4
	Summe	2.370,3	68,4	251,0	66,2	344,4	113,2	113,3	3.326,8
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	21,4	6,6	0	0	0	28,0
Gesamtheit der Gebäude	KG 300 & KG 400	14.133,2	484,6	1.260,9	332,8	2.521,9	734,5	790,5	20.258,3
	KG 700 (25 %)	3.533,3	121,1	315,2	83,2	630,5	183,6	197,6	5.064,6
	Summe	17.666,5	605,7	1.576,1	416,0	3.152,3	918,1	988,1	25.322,9
	davon Mehrkosten Neubauten	0	0	144,4	45,9	0	0	0	190,3

Tabelle 37:
 Jährlich anfallende Investitions- und Nebenkosten für die Sanierung und die geplanten Neubauten ohne Berücksichtigung der Photovoltaikkosten für die Jahre 2031 bis 2035 gemäß Szenario 2.

Cluster	Kosten	Jährliche Investitions- und Nebenkosten für die Jahre 2031 bis 2035 gemäß Szenario 2 [T€/a] (brutto)							
		Energetische Sanierung der Bauteile	Gerüste	Einbau Luft-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Sole-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Lüftung mit WRG	Einbau LED-Beleuchtung	Ersatz der Heizkörper	Summe
Kindertagesstätten	KG 300 & KG 400	642,0	22,5	70,8	17,6	106,2	33,6	39,5	932,3
	KG 700 (25 %)	160,5	5,6	17,7	4,4	26,6	8,4	9,9	233,1
	Summe	802,6	28,2	88,5	22	132,8	42,0	49,3	1.165,3
Grundschulen	KG 300 & KG 400	2.562,9	96,2	248,8	63,3	565,2	109,3	167,1	3.812,8
	KG 700 (25 %)	640,7	24,0	62,2	15,8	141,3	27,3	41,8	953,2
	Summe	3.203,6	120,2	311	79,1	706,5	136,7	208,9	4.766,0
Weiterführende Schulen	KG 300 & KG 400	5.008,6	174,8	328,9	89,3	1.200,8	213,7	273,2	7.289,3
	KG 700 (25 %)	1.252,1	43,7	82,2	22,3	300,2	53,4	68,3	1.822,3
	Summe	6.260,7	218,5	411,1	111,6	1.501,0	267,1	341,5	9.111,5
Berufsschulen	KG 300 & KG 400	650,8	57,7	74,1	19,4	279,2	114,9	57,8	1.253,9
	KG 700 (25 %)	162,7	14,4	18,5	4,8	69,8	28,7	14,5	313,5
	Summe	813,5	72,2	92,6	24,2	349,0	143,6	72,3	1.567,4
Sporthallen	KG 300 & KG 400	2.027,2	38,1	172,8	42,7	79,5	81,9	100,9	2.542,9
	KG 700 (25 %)	506,8	9,5	43,2	10,7	19,9	20,5	25,2	635,7
	Summe	2.534,0	47,6	216,0	53,3	99,4	102,3	126,1	3.178,7
Verwaltungsgebäude	KG 300 & KG 400	1.345,6	40,5	82,0	21,1	15,4	90,5	61,4	1.656,4
	KG 700 (25 %)	336,4	10,1	20,5	5,3	3,9	22,6	15,3	414,1
	Summe	1.681,9	50,6	102,5	26,4	19,3	113,1	76,7	2.070,5
Restcluster	KG 300 & KG 400	1.896,2	54,7	186,4	48,5	275,5	90,6	90,6	2.642,6
	KG 700 (25 %)	474,1	13,7	46,6	12,1	68,9	22,6	22,7	660,6
	Summe	2.370,3	68,4	233	60,6	344,4	113,2	113,3	3.303,2
Gesamtheit der Gebäude	KG 300 & KG 400	14.133,2	484,6	1.163,7	301,9	2.521,9	734,5	790,5	20.130,2
	KG 700 (25 %)	3.533,3	121,1	290,9	75,4	630,5	183,6	197,6	5.032,5
	Summe	17.666,5	605,7	1.454,7	377,3	3.152,3	918,1	988,1	25.162,7

Die Summe der Investitions- und Planungskosten (ohne Photovoltaikkosten) für die Gesamtheit der Gebäude über die 14 Betrachtungsjahre 2022 bis 2035 sind in Tabelle 28 zusammengestellt und betragen (wie in Szenario 1) 353,57 Millionen Euro.

Die Kosten für die Photovoltaik zum Erreichen des Klimaneutralitätszieles betragen jährlich 2,05 Millionen Euro und insgesamt 28,63 Millionen Euro. Letztere sind ebenfalls in Tabelle 38 eingetragen. Bei einem Ansatz von ebenfalls 25 % Nebenkosten für die Photovoltaik ergeben sich weitere 7,2 Millionen Euro als Nebenkosten für die Photovoltaik.

Die Gesamtsumme der Investitions- und Nebenkosten inklusive der Photovoltaik zur Erreichung der Klimaneutralität in der Betriebsphase in Szenario 2 ergeben sich somit zu 389,4 Millionen Euro.

Tabelle 38:

Summe der anfallenden Investitions- und Nebenkosten für die Sanierung und die geplanten Neubauten sowie Summe der Kosten für die Photovoltaikanlagen über die Betrachtungszeit 2022 bis 2035 für die Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 2.

Kostenbereich	Summe der Investitions- und Nebenkosten für die Gesamtheit der Gebäude (2022 bis 2035) gemäß Szenario 2 [T€] (brutto)
KG 300 (Bauwerk)	204.649
KG 400 (Anlagentechnik ohne Photovoltaik)	78.206
KG 700 (Nebenkosten)	70.714
Summe KG 300, KG 400, KG 700	353.568
<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	<i>1.713</i>
Photovoltaikkosten (KG 400)	28.634
Nebenkosten Photovoltaik (KG 700)	7.159
Gesamtsumme	389.361

Für die Ermittlung der Energiekosten werden die Tarife der Stadt Oldenburg und weitere Quellen gemäß Kapitel 2.9.3 verwendet. Dabei müssen die Endenergieverbräuche aus Kapitel 4.2.1 für folgende Energieträger weiter unterteilt werden:

- Biomasse: Aufteilung in Holzpellet, Holzhackschnitzel und Scheitholz
- Netzstrom: Aufteilung in Wärmepumpenstrom und sonstigen Strom

Abgesehen davon, dass der Wärmepumpenstrom zu einem niedrigeren Tarif als der sonstige Netzstrom abgerechnet wird, kann auch nur der sonstige Strom durch selbst genutzten PV-Strom ersetzt werden. Tabelle 39 enthält die jährlichen Energiekosten für die einzelnen Gebäudecluster sowie die Gesamtheit der Gebäude ohne Berücksichtigung des erzeugten PV-Stroms.

Tabelle 39:
 Jährliche Energiekosten je Energieträger von 2021 bis 2035 für den Betrieb der städtischen Gebäude gemäß Szenario 2 ohne Berücksichtigung des PV-Stroms.

Cluster	Energie-träger	Energiekosten ohne Berücksichtigung des PV-Stroms gemäß Szenario 2 [T€/a] (brutto)														
		2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Kinder-tages-stätten	Erdgas	96,6	91,4	86,3	81,1	76,0	70,8	65,7	60,5	55,4	50,2	45,0	39,9	34,7	29,6	24,4
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	152,1	160,6	169,1	177,6	186,1	194,6	203,1	211,6	220,1	228,6	234,9	241,1	247,4	253,6	259,9
	Summe	248,7	252,0	255,4	258,7	262,1	265,4	268,8	272,1	275,5	278,8	279,9	281,0	282,1	283,2	284,3
Grund-schulen	Erdgas	345,1	322,9	300,6	278,4	256,1	233,9	211,6	189,4	167,1	144,9	122,6	100,4	78,1	55,9	33,6
	Bio-masse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netz-strom	210,5	244,0	277,5	311,0	344,5	378,0	411,5	445,0	478,5	512,0	537,1	562,2	587,4	612,5	637,6
	Summe	555,6	566,9	578,1	589,4	600,6	611,8	623,1	634,3	645,6	656,8	659,7	662,6	665,5	668,4	671,3
Weiter-füh-rende Schulen	Erdgas	665,6	625,8	586,1	546,3	506,6	466,8	427,0	387,3	347,5	307,8	268,0	228,2	188,5	148,7	109,0
	Bio-masse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netz-strom	637,6	696,4	755,3	814,2	873,0	931,9	990,8	1.049,6	1.108,5	1.167,4	1.217,4	1.267,4	1.317,5	1.367,5	1.417,5
	Summe	1.303,1	1.322,3	1.341,4	1.360,5	1.379,6	1.398,7	1.417,8	1.436,9	1.456,0	1.475,1	1.485,4	1.495,7	1.505,9	1.516,2	1.526,5
Berufs-schulen	Erdgas	131,0	122,5	114,0	105,5	97,1	88,6	80,1	71,6	63,1	54,6	46,1	37,7	29,2	20,7	12,2
	Bio-masse	11,0	10,2	9,4	8,6	7,8	7,0	6,3	5,5	4,7	3,9	3,1	2,3	1,6	0,8	0,0
	Netz-strom	329,5	337,5	345,6	353,6	361,6	369,6	377,6	385,6	393,6	401,6	409,6	417,6	425,6	433,6	441,7
	Summe	471,5	470,2	469,0	467,7	466,5	465,2	463,9	462,7	461,4	460,2	458,9	457,6	456,4	455,1	453,9
Sport-hallen	Erdgas	236,5	221,1	205,7	190,2	174,8	159,3	143,9	128,5	113,0	97,6	82,1	66,7	51,3	35,8	20,4
	Bio-masse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netz-strom	324,3	335,3	346,4	357,4	368,5	379,5	390,6	401,6	412,7	423,7	434,8	445,8	456,9	467,9	479,0
	Summe	560,8	556,4	552,0	547,6	543,2	538,9	534,5	530,1	525,7	521,3	516,9	512,5	508,2	503,8	499,4
Verwal-tungs-ge-bäude	Erdgas	190,8	177,5	164,2	150,9	137,7	124,4	111,1	97,8	84,5	71,2	57,9	44,6	31,3	18,0	4,7
	Bio-masse	36,0	34,9	33,8	32,7	31,7	30,6	29,5	28,5	27,4	26,3	25,2	24,2	23,1	22,0	21,0
	Netz-strom	322,9	331,1	339,4	347,7	356,0	364,3	372,5	380,8	389,1	397,4	405,7	413,9	422,2	430,5	438,8
	Summe	549,6	543,6	537,5	531,4	525,3	519,2	513,1	507,0	500,9	494,9	488,8	482,7	476,6	470,5	464,4
Rest-cluster	Erdgas	256,4	238,7	220,9	203,2	185,4	167,7	149,9	132,2	114,4	96,7	78,9	61,2	43,5	25,7	8,0
	Bio-masse	25,0	24,7	24,4	24,1	23,8	23,5	23,3	23,0	22,7	22,4	22,1	21,8	21,5	21,2	21,0
	Netz-strom	362,2	383,1	405,2	427,4	449,5	471,6	493,8	515,9	538,1	560,2	582,4	604,6	626,7	648,9	671,0
	Summe	643,6	646,5	650,6	654,7	658,8	662,9	667,0	671,1	675,2	679,3	683,5	687,6	691,7	695,8	700,0
Ge-samt-heit der Ge-bäude	Erdgas	1.922,1	1.800,0	1.677,8	1.555,7	1.433,6	1.311,4	1.189,3	1.067,2	945,0	822,9	700,8	578,6	456,5	334,4	212,3
	Bio-masse	36,0	34,9	33,8	32,7	31,7	30,6	29,5	28,5	27,4	26,3	25,2	24,2	23,1	22,0	21,0
	Netz-strom	2.339,0	2.488,1	2.638,4	2.788,8	2.939,1	3.089,5	3.239,8	3.390,2	3.540,6	3.690,9	3.821,9	3.952,8	4.083,7	4.214,6	4.345,5
	Summe	4.297,0	4.323,0	4.350,1	4.377,2	4.404,4	4.431,5	4.458,7	4.485,8	4.513,0	4.540,1	4.547,9	4.555,6	4.563,3	4.571,0	4.578,7

Aufgrund des Wechsels von den kostengünstigeren Energieträgern Erdgas und Biomasse auf den Strom für die Wärmepumpen erhöhen sich die Energiekosten ohne die Berücksichtigung des PV-Stroms trotz der Sanierungen von 4,3 Millionen Euro/a im Jahr 2021 auf knapp 4,6 Millionen Euro/a im Jahr 2035.

Da die Photovoltaik gemäß Tabelle 35 nur für die Gesamtheit der Gebäude bestimmt wurde und in dieser Studie nicht auf die einzelnen Gebäudecluster aufgeteilt wurde, kann auch die Nutzung des PV-Stroms nicht auf die Gebäudecluster verteilt werden. Für die Gesamtheit der Gebäude wurde der erzeugte PV-Strom jedoch unterteilt in selbst genutzten Strom, der entsprechend vom Netzstrom abgezogen wurde, und eingespeisten Strom ins Netz, für den der Einspeisetarif gemäß Tabelle 13 angerechnet wird. Dabei wurden basierend auf den Erfahrungen mit den Effizienzhaus Plus-Bildungsbauten [25] und den Plusenergieschulen aus EnEff:Schule [26] folgende maximale Anteile als selbst genutzter Strom angerechnet:

- Selbst genutzter PV-Strom ist maximal 50 % des sonstigen Netzstroms (ohne Wärmepumpenstrom).
- Selbst genutzter PV-Strom ist maximal 50 % des gesamten erzeugten PV-Stroms.

Von diesen beiden Werten wird jeweils der kleinere Wert ermittelt und als selbst genutzter PV-Strom angerechnet, d. h. vom Netzstrom abgezogen. Der restliche erzeugte PV-Strom wird als eingespeister Strom angesetzt und mit dem Einspeisetarif vergütet. Damit ergeben sich die Energiekosten aus Tabelle 40. Bei Berücksichtigung des selbst genutzten und eingespeisten PV-Stroms reduzieren sich die Energiekosten von 4,3 Millionen Euro/a im Jahr 2021 auf 2,2 Millionen Euro/a im Jahr 2035. Summiert man die Kosten für den Sanierungszeitraum 2022 bis 2035 (14 Jahre), so ergeben sich Energiekosten von 41,5 Millionen Euro.

Tabelle 40:
 Jährliche Energiekosten je Energieträger von 2021 bis 2035 für den Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude gemäß Szenario 2 mit Berücksichtigung des PV-Stroms.

Energieträger	Energiekosten für die Gesamtheit der Gebäude mit Berücksichtigung des PV-Stroms gemäß Szenario 2 [T€/a] bzw. für die Summe 2022 bis 2035 [T€] (jeweils brutto)															
	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	Summe 2022 bis 2035
Erdgas	1.922,1	1.800,0	1.677,8	1.555,7	1.433,6	1.311,4	1.189,3	1.067,2	945,0	822,9	700,8	578,6	456,5	334,4	212,3	14.085,4
Biomasse	36,0	34,9	33,8	32,7	31,7	30,6	29,5	28,5	27,4	26,3	25,2	24,2	23,1	22,0	21,0	390,9
Netzstrom	2.339,0	2.284,9	2.231,7	2.178,7	2.125,6	2.072,7	2.019,5	2.118,3	2.248,7	2.378,7	2.495,7	2.612,4	2.729,3	2.846,2	2.963,2	33.305,5
PV-Stromein- speisung	0,0	-46,0	-91,9	-137,9	-183,9	-229,9	-275,8	-356,1	-443,6	-530,9	-619,7	-708,5	-797,2	-886,0	-974,8	-6.282,4
Summe	4.297,0	4.073,7	3.851,4	3.629,2	3.406,9	3.184,8	2.962,5	2.857,8	2.777,5	2.697,0	2.602,0	2.506,7	2.411,7	2.316,6	2.221,5	41.499,4

5.2.5 Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik

Der Materialaufwand für die energetische Sanierung der Gebäudehüllflächen, den Einbau der Wärmepumpen als neue Wärmeerzeuger und sonstiger Anlagentechnik sowie für die Neubauten verursacht in den Jahren 2022 bis 2030 entsprechend den jährlichen Sanierungen und Neubauten insgesamt 8.337 t/a anfallende Treibhausgasemissionen und ist in Tabelle 41 aufgeschlüsselt.

Tabelle 41:
Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die energetische Sanierung und die Neubauten der städtischen Gebäude in Oldenburg für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 2.

Cluster	Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 2 [t/a]							
	Energetische Sanierung						Neubauten	Summe
	Bauteile	Luft-Wasser-Wärmepumpen	Sole-Wasser-Wärmepumpen	Austausch der Heizkörper	Lüftung mit WRG	LED-Beleuchtung		
Kindertagesstätten	249,8	0,9	1,4	14,4	58,7	4,1	123,9	453,1
Grundschulen	1.306,6	2,6	6,1	60,9	319,2	13,4	565,0	2.273,8
Weiterführende Schulen	1.630,3	2,9	10,0	99,6	683,3	26,1	509,6	2.961,9
Berufsschulen	292,7	0,7	2,1	21,1	158,7	14,0	0,0	489,4
Sporthallen	712,7	2,2	3,7	36,8	41,1	10,0	0,0	806,4
Verwaltungsgebäude	321,9	0,8	2,2	22,4	8,3	11,1	0,0	366,8
Restcluster	628,0	2,7	3,2	33,0	147,8	11,1	159,2	985,1
Gesamtheit der Gebäude	5.142,1	12,9	28,8	288,1	1.417,2	89,7	1.357,7	8.336,5

Da die geplanten Neubauten im Zeitraum 2022 bis 2030 angesetzt wurden, ergeben sich deutlich reduzierte Treibhausgasemissionen aus der Gebäude- und Anlagentechnik für die Cluster Kindertagesstätten, Grundschulen, Weiterführende Schulen und das Restcluster in den Jahren 2031 bis 2035, siehe Tabelle 42. Der Materialaufwand für die energetische Sanierung der Gebäudehüllflächen, den Einbau der Wärmepumpen als neue Wärmeerzeuger und sonstiger Anlagentechnik in den sanierten Gebäuden verursacht in den Jahren 2031 bis 2035 insgesamt 6.979 t jährlich anfallende Treibhausgasemissionen.

Tabelle 42:
 Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die energetische Sanierung der städtischen Gebäude in Oldenburg für die Jahre 2031 bis 2035 gemäß Szenario 2.

Cluster	Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Jahre 2031 bis 2035 gemäß Szenario 2 [t/a]						
	Energetische Sanierung						
	Bauteile	Luft-Wasser-Wärmepumpen	Sole-Wasser-Wärmepumpen	Austausch der Heizkörper	Lüftung mit WRG	LED-Beleuchtung	Summe
Kindertagesstätten	249,8	0,9	1,4	14,4	58,7	4,1	329,3
Grundschulen	1.306,6	2,6	6,1	60,9	319,2	13,4	1.708,8
Weiterführende Schulen	1.630,3	2,9	10,0	99,6	683,3	26,1	2.452,3
Berufsschulen	292,7	0,7	2,1	21,1	158,7	14,0	489,4
Sporthallen	712,7	2,2	3,7	36,8	41,1	10,0	806,4
Verwaltungsgebäude	321,9	0,8	2,2	22,4	8,3	11,1	366,8
Restcluster	628,0	2,7	3,2	33,0	147,8	11,1	825,9
Gesamtheit der Gebäude	5.142,1	12,9	28,8	288,1	1.417,2	89,7	6.978,8

Summiert man die jährlich anfallenden Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik für die energetische Sanierung und die Neubauten über die Betrachtungsjahre 2022 bis 2035 (14 Jahre) auf, so erhält man die insgesamt gemäß Szenario 2 in diesem Bereich anfallenden Treibhausgasemissionen von 109.922 t, siehe Tabelle 43.

Für die Photovoltaikanlagen wird der nennleistungsbezogene Kennwert für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung aus Kapitel 2.10.3 mit der benötigten Nennleistung der Photovoltaik zur Erreichung der Klimaneutralität im Jahr 2035 multipliziert. Die damit entstehenden Treibhausgasemissionen für die Photovoltaik betragen 33.406 t und sind ebenfalls in Tabelle 32 eingetragen. Somit ergibt sich eine Gesamtsumme der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Gesamtheit der Gebäude von 143.329 t als Sockelbeitrag. Dieser wird im Gegensatz zu den betriebsbedingten Treibhausgasemissionen basierend auf der Endenergie im Jahr 2035 nicht klimaneutral gestellt.

Tabelle 43:
Summe der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik über die Betrachtungszeit 2022 bis 2035 für die Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 2.

Bereich		Summe der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Gesamtheit der Gebäude (2022 bis 2035) [t]
Energetische Sanierung	Bauteile	71.988,8
	Luft-Wasser-Wärmepumpen	180,3
	Sole-Wasser-Wärmepumpen	403,5
	Austausch der Heizkörper	4.033,4
	Lüftung mit WRG	19.840,8
	LED-Beleuchtung	1.256,5
Neubauten		12.219,0
Photovoltaik		33.406,2
Gesamtsumme		143.328,5

5.3 Fazit des Szenarios

Mit dem Szenario 2 mit dem Zieljahr 2035 kann der Endenergiebedarf der stadteigenen Gebäude von 54.169 MWh/a im Jahr 2021 auf 24.540 MWh/a im Jahr 2035 gesenkt werden. Das ist eine Reduzierung der Endenergie um 54,7 % innerhalb von 14 Jahren. Die PV-Anlagen zur Klimaneutralstellung erzeugen 24.428 MWh/a Strom im Jahr 2035. Trotz der erreichten Klimaneutralität bleiben noch 112 MWh/a Endenergie im Jahr 2035 übrig (0,2 % der Endenergie im Jahr 2021).

Die jährlichen Treibhausgasemissionen werden von 13.048 t auf 5.130 t durch die reine Sanierung vermindert, also um beträchtliche 60,7 %. Dazu tragen die sich innerhalb der 15 betrachteten Jahre verringerten CO₂-Äquivalente für den Strom, der Umstieg von Erdgas auf elektrisch betriebene Wärmepumpen sowie natürlich auch die Gebäudesanierungen bei. Um die verbleibenden Treibhausgasemissionen auszugleichen und damit den Betrieb der städtischen Gebäude inklusive Nutzerstrom klimaneutral zu stellen, werden Photovoltaikanlagen mit einer Nennleistung von 29.278 kW_p benötigt, die einer Modulfläche von 143.045 m² entsprechen. Damit müssen, ermittelt über die geeigneten Dachanteile der gewählten Typgebäude und bereits unter Berücksichtigung von Abständen zum Dachrand und zwischen den PV-Modulen, durchschnittlich

70,7 % der für PV geeigneten Dachflächen belegt werden. Die Treibhausgasemissionen im Jahr 2035 sind damit in der Jahresbilanz Null.

Für die Sanierung der Gesamtheit der stadteigenen Gebäude wird in Szenario 2 von Investitionskosten in den Kostengruppen 300 und 400 sowie den zugehörigen Nebenkosten (KG 700) ab 2022 von jährlich rund 25,1 Millionen Euro brutto ausgegangen. Für die Neubauten kommen in den Jahren 2022 bis 2030 weitere 190.300 Euro/a hinzu. Insgesamt entstehen in den 14 Jahren damit 353,6 Millionen Euro Investitions- und Planungskosten, die mit 35,8 Millionen Euro Kosten für die Investitionen und die Planung der Photovoltaik ergänzt werden müssen. Die Gesamtsumme der ermittelten Investitions- und Planungskosten beträgt somit 389,4 Millionen Euro. Die Energiekosten inklusive der Anrechnung des Photovoltaikstroms sinken von anfänglich 4,3 Millionen Euro/a (2021) auf 2,2 Millionen Euro/a brutto (2035).

Durch den Materialaufwand der Sanierung und der Instandhaltung der sanierten Gebäude sowie der Neubauten und der Photovoltaik ergeben sich zusätzlich anfallende Treibhausgasemission über den Zeitraum von 2022 bis 2035 von insgesamt 143.329 t.

Dividiert man die Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Instandhaltung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik mit den Treibhausgasemissionseinsparungen durch den verringerten Energiebedarf im Zieljahr gegenüber dem Ist-Zustand (13.048 t/a), so erhält man eine vereinfachte Ermittlung der Treibhausgas-Amortisationszeit der Materialaufwände. Das Ergebnis für Szenario 2 beträgt 11,0 Jahre und zeigt, dass die Mehraufwände für die Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik deutlich vor Ende der Lebensdauer der einzelnen Komponenten ausgeglichen werden können. Es besteht also keine Gefahr, dass höhere Treibhausgasemissionen durch die sogenannte graue Energie entstehen als über die Energieeinsparungen rückerwirtschaftet werden können. Dabei werden vereinfacht weder die leicht unterschiedlichen Treibhausgasemissionen in den unterschiedlichen Jahren im Betrieb noch aufgrund der fehlenden Datenlage der Einfluss der sich ändernden CO₂-Äquivalente auf die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik berücksichtigt. Würden alle Treibhausgasaufwände und -einsparungen im Jahr 2022 anfallen, d. h. theoretisch alle Sanierungen und Neubauten sowie die Photovoltaik im Jahr 2022 umgesetzt werden, so ergäbe sich eine etwas geringere Amortisationszeit von 10,1 Jahren.

6 Szenario 3

6.1 Beschreibung des Szenarios

Szenario 3 mit dem Zieljahr 2045 ist gekennzeichnet durch folgende Rahmenbedingungen:

- Die mittlere jährliche Sanierungsrate beträgt 4,17 %/a. Diese setzt sich zusammen aus zwei Phasen: Die 282 zu sanierenden Gebäude bis einschließlich Baujahr 2010 werden im gesamten Zeitraum 2022 bis 2045 saniert, die 21 zu sanierenden Gebäude mit Baujahren ab 2011 bis einschließlich 2017 im Zeitraum 2036 bis 2045. Damit werden durchschnittlich pro Jahr 12,6 Gebäude in Angriff genommen.
- Die angestrebte Sanierungsqualität entspricht Szenario 1 und Szenario 2 und ist für normale Sanierungen das EG 40 EE-Niveau (vergl. Tabelle 2). Für Gebäude, die unter Denkmalschutz stehen, wird ein reduziertes Dämmniveau festgelegt, siehe Tabelle 3. Die Energieerzeugung wird bei der Sanierung auf Außenluft-Wasser-Wärmepumpen (90 %) und Sole-Wasser-Wärmepumpen (10 %) umgestellt. Die Bestandsheizkörper werden bei der Sanierung durch neue ersetzt, die Heizungsverteilung wird beibehalten. Unterschiedliche Arten von Lüftungsanlagen und der Trinkwarmwasserbereitung werden entsprechend den Angaben der Stadt Oldenburg in Abhängigkeit von unterschiedlichen Raumnutzungen eingesetzt. Ähnliches gilt für die Gebäudeautomation. Die Beleuchtung wird bei der Sanierung komplett auf neue LED-Leuchten umgestellt.
- Die CO₂-Äquivalente der eingesetzten Energieträger entsprechen Szenario 1 und basieren auf der DIN V 18599-1:2018, siehe [6]. Für den Energieträger Strom und den eingespeisten Strom aus PV-Anlagen werden zeitlich veränderliche CO₂-Äquivalente gemäß IINAS eingesetzt, siehe Kapitel 2.6. Die gemäß DIN V 18599 ermittelten Endenergiekennwerte müssen für die Energieträger Erdgas und Biomasse zusätzlich mit dem Verhältnis Brennwert/Heizwert umgerechnet werden, bevor mit den CO₂-Äquivalenten multipliziert werden darf.

6.2 Szenarienergebnisse

6.2.1 Endenergiebedarf in der Betriebsphase

Die Szenarienergebnisse für den Endenergiebedarf im Betrieb werden im Folgenden aufgeteilt in die Cluster und für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude in einer Tabelle sowie in Diagrammen präsentiert. Für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude sind zwei Diagramme enthalten, die den Endenergiebedarf einmal aufgeteilt in die genutzten Energieträger und einmal aufgeteilt in die Gebäudecluster darstellen. Dabei werden zunächst die Endenergiebedarfswerte ohne Berücksichtigung des benötigten Photovoltaikstroms zur Erreichung der Klimaneutralität aufgezeigt.

Tabelle 44 enthält den berechneten Endenergiebedarf der Betriebsphase für die Jahre 2021 bis 2045. Dabei wird aus Platzgründen nur jedes zweite Jahr angezeigt. Während die Werte für die Energieträger Erdgas und Biomasse (eingesetzt bei den Berufsschulen und Gebäuden im Restcluster) über die Jahre sinken, erhöht sich andererseits der Netzstrombedarf, weil weitere elektrische Wärmepumpen eingesetzt werden und der Nutzerstrombedarf über die Jahre gleich hoch angesetzt wurde. Die Sanierungsrate verläuft bis zum Jahr 2035 konstant, ab dem Jahr 2036 kommen mit den Gebäuden mit Baujahr 2011 bis 2017 weitere zu sanierende Gebäude hinzu. Die geplanten Neubauten werden in der Studie in allen drei Szenarien nur auf die Jahre 2022 bis 2030 linear verteilt. Deshalb ergibt sich bei den Clustern kein ganz linearer Verlauf bei den Endenergiebedarfen.

Die Summe der Endenergie in Szenario 3 reduziert sich von 54.169 MWh/a im Jahr 2021 durch die Sanierungen auf 22.551 MWh/a im Zieljahr. Das Zieljahr in Szenario 3 ist das Jahr 2045 und nicht mehr das Jahr 2030 bzw. 2035. Die Reduzierung erfolgt damit auf 42 % des Ausgangsbedarfs. Dabei ist die weitere Reduzierung durch die Bilanzierung des über die Photovoltaik erzeugten Stroms noch nicht berücksichtigt.

Bild 17 enthält die Endenergiebedarfsverläufe für die sechs Gebäudecluster mit Typgebäuden für die Jahre 2021 bis 2045. Neben dem jeweils sinkenden Gesamtenergiebedarf sind auch die einzelnen Anteile der Energieträger zu erkennen, so auch, dass es nur im Cluster Berufsschule (und im nicht abgebildeten Restcluster) Biomasseanteile gibt. Aufgrund der durchgeführten baulichen Sanierungen und der Nutzung von erneuerbaren Energien durch die Wärmepumpen sinken der Erdgasbedarf und der Biomassebedarf stärker als der Netzstrombedarf steigt.

Tabelle 44:
 Jährliche Endenergiebedarfswerte je Energieträger von 2021 bis 2045 für den
 Betrieb der städtischen Gebäude gemäß Szenario 3 mit dem Zieljahr 2045.

Cluster	Energie- träger	Endenergiebedarf gemäß Szenario 3 [MWh/a]												
		2021	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045
Kinder- tages- stätten	Erdgas	2.180	2.045	1.909	1.773	1.637	1.502	1.366	1.230	1.043	855	668	480	293
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	669	723	777	832	886	930	964	997	1.052	1.107	1.161	1.216	1.271
	Summe	2.849	2.768	2.686	2.605	2.523	2.431	2.329	2.228	2.095	1.962	1.829	1.696	1.564
Grund- schulen	Erdgas	7.791	7.205	6.619	6.033	5.447	4.861	4.275	3.689	3.071	2.453	1.835	1.217	599
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	904	1.114	1.325	1.535	1.745	1.918	2.054	2.189	2.330	2.471	2.612	2.753	2.894
	Summe	8.695	8.319	7.943	7.568	7.192	6.779	6.328	5.878	5.401	4.924	4.448	3.971	3.494
Weiter- füh- rende Schulen	Erdgas	15.025	13.978	12.931	11.883	10.836	9.789	8.742	7.695	6.534	5.373	4.212	3.051	1.891
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	2.735	3.079	3.423	3.767	4.111	4.416	4.681	4.947	5.209	5.472	5.734	5.997	6.259
	Summe	17.760	17.057	16.353	15.650	14.947	14.205	13.423	12.642	11.743	10.845	9.947	9.048	8.150
Berufs- schulen	Erdgas	2.957	2.733	2.510	2.287	2.063	1.840	1.616	1.393	1.114	836	557	279	0
	Bio- masse	291	266	242	218	194	170	145	121	97	73	48	24	0
	Netz- strom	1.422	1.465	1.507	1.550	1.593	1.636	1.679	1.721	1.748	1.775	1.802	1.828	1.855
	Summe	4.669	4.464	4.260	4.055	3.850	3.645	3.440	3.235	2.959	2.683	2.407	2.131	1.855
Sport- hallen	Erdgas	5.340	4.933	4.526	4.120	3.713	3.306	2.900	2.493	2.037	1.581	1.125	669	213
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	1.391	1.457	1.523	1.589	1.655	1.721	1.787	1.853	1.921	1.990	2.059	2.127	2.196
	Summe	6.731	6.390	6.049	5.709	5.368	5.027	4.687	4.346	3.959	3.571	3.184	2.797	2.409
Verwal- tungs- ge- bäude	Erdgas	4.308	3.958	3.607	3.257	2.907	2.557	2.207	1.857	1.506	1.156	806	456	106
	Bio- masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz- strom	1.389	1.438	1.486	1.535	1.583	1.631	1.680	1.728	1.777	1.825	1.874	1.922	1.971
	Summe	5.697	5.395	5.094	4.792	4.490	4.188	3.887	3.585	3.283	2.982	2.680	2.378	2.077
Rest- cluster	Erdgas	5.788	5.306	4.824	4.341	3.859	3.376	2.894	2.412	1.929	1.447	965	482	0
	Bio- masse	426	417	407	397	387	377	367	357	286	214	143	71	0
	Netz- strom	1.554	1.675	1.796	1.916	2.037	2.158	2.279	2.400	2.520	2.641	2.762	2.883	3.003
	Summe	7.769	7.397	7.026	6.655	6.283	5.912	5.540	5.169	4.736	4.303	3.870	3.436	3.003
Ge- sam- theit der Ge- bäude	Erdgas	43.388	40.156	36.925	33.694	30.462	27.231	24.000	20.768	17.235	13.702	10.169	6.635	3.102
	Bio- masse	717	683	649	615	581	547	513	479	383	287	191	96	0
	Netz- strom	10.065	10.951	11.837	12.724	13.610	14.410	15.123	15.836	16.558	17.281	18.004	18.727	19.449
	Summe	54.169	51.790	49.411	47.033	44.654	42.188	39.635	37.083	34.176	31.270	28.364	25.458	22.551

Szenario 3: Endenergie Betrieb

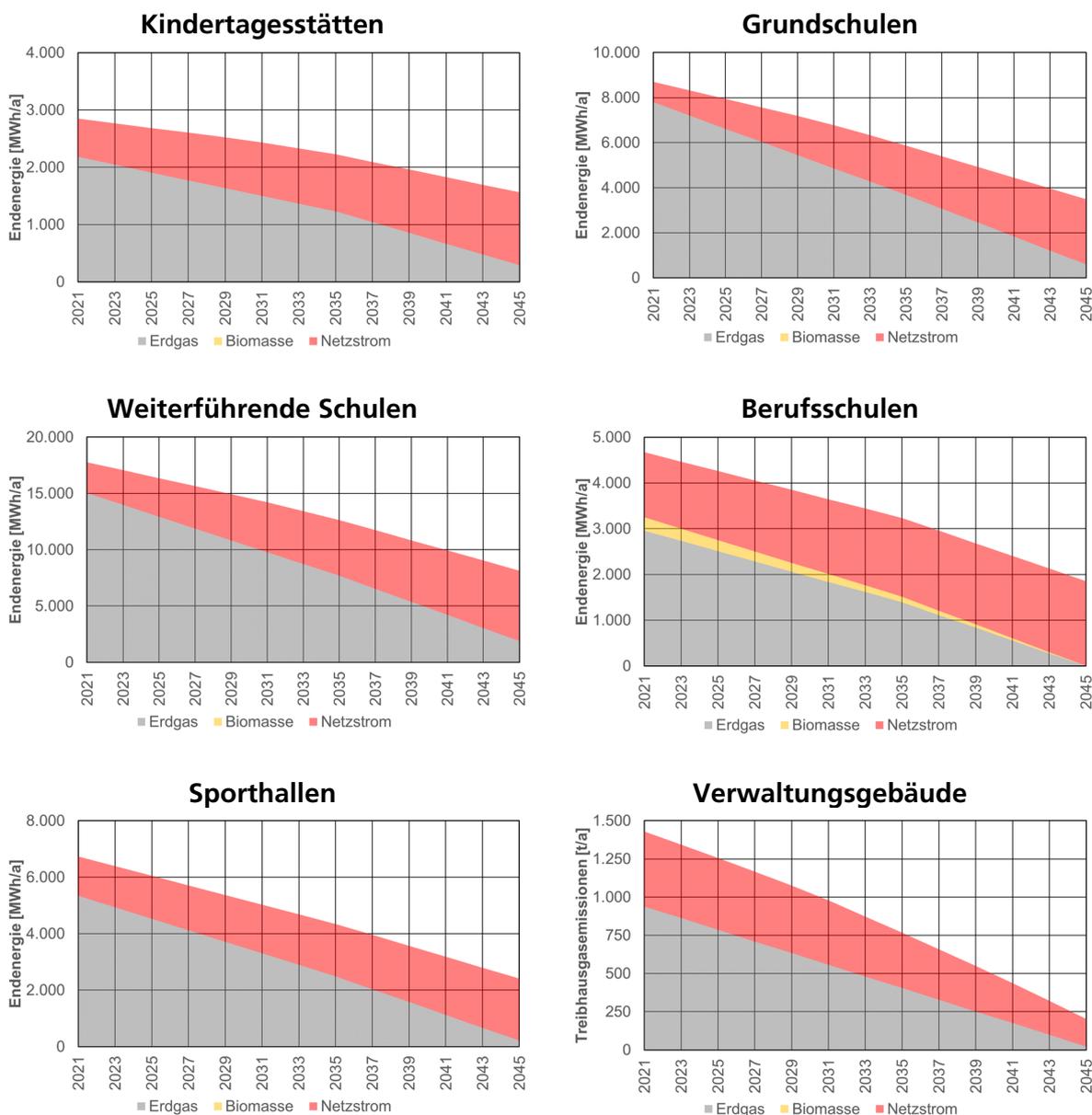


Bild 17:

Jährliche Endenergiebedarfswerte für den Betrieb der sechs spezifischen Gebäudecluster aufgeteilt in die genutzten Energieträger gemäß Szenario 3.

In Bild 18 und Bild 19 ist der Endenergiebedarf der Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 2 dargestellt, aufgeteilt in die verwendeten Energieträger bzw. in die insgesamt sieben Gebäudecluster. Aus der Aufteilung in die Gebäudecluster ist ersichtlich, dass das Cluster „Weiterführende Schulen“ den höchsten Energiebedarf der Cluster hat, gefolgt von den Grundschulen.

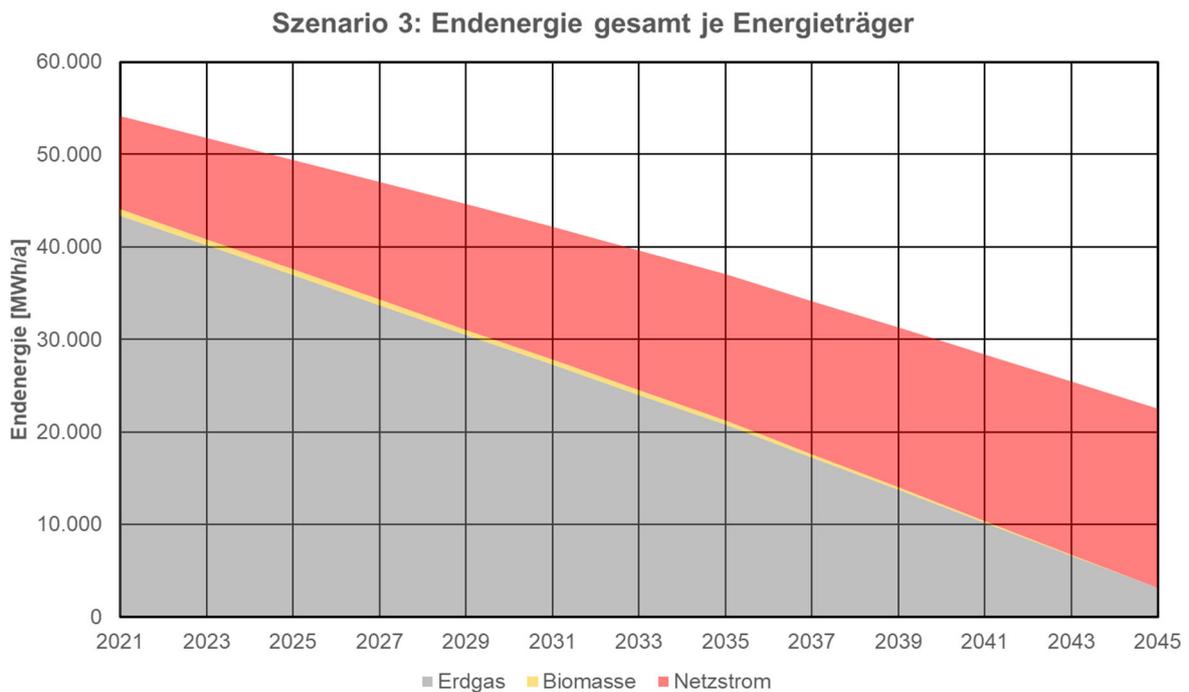


Bild 18:
 Jährliche Endenergiebedarfswerte für den Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Energieträger gemäß Szenario 3.

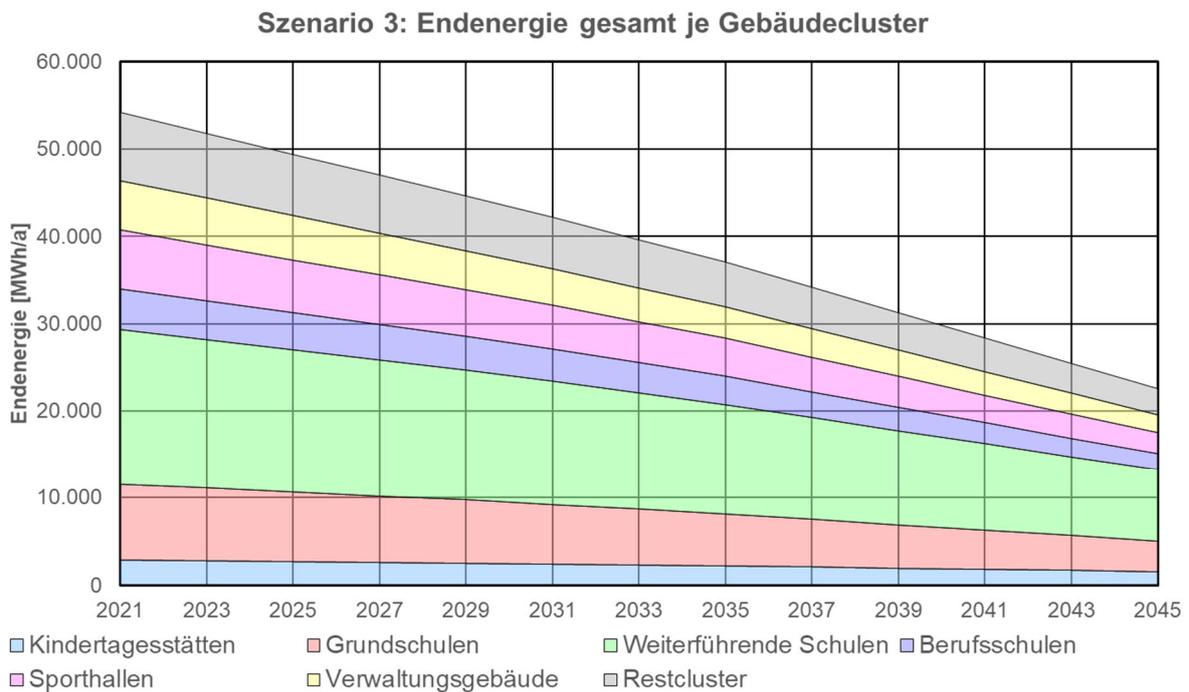


Bild 19:
 Jährliche Endenergiebedarfswerte für den Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Gebäudecluster gemäß Szenario 3.

6.2.2 Treibhausgasemissionen in der Betriebsphase

Auch die Szenarienergebnisse für die Treibhausgasemissionen aus der Betriebsphase werden aufgeteilt in die Cluster und für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude in einer Tabelle sowie in Diagrammen präsentiert. Dabei wird aus Platzgründen wie bei der Endenergie nur jedes zweite Jahr angezeigt. Für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude sind zwei Diagramme enthalten, die die Treibhausgasemissionen einmal aufgeteilt in die genutzten Energieträger und einmal aufgeteilt in die Gebäudecluster darstellen. Die Treibhausgasemissionen werden in den Tabellen und Bildern in der Einheit t (Tonnen) ausgewiesen, der verkürzten Version von $t_{\text{CO}_2\text{-Äq}}$. Die Ermittlung des benötigten Photovoltaikstroms für die Klimaneutralität wird im nächsten Kapitel zusammengefasst.

Tabelle 45 enthält die berechneten Treibhausgasemissionen der Betriebsphase für die Jahre 2021 bis 2045. Anders als bei den Szenarien 1 und 2 sinken jetzt die Werte für alle Energieträger (Erdgas, Biomasse und Netzstrombedarf). Durch die auf 2045 verlängerte Betrachtungszeit und die damit verbundenen niedrigeren CO_2 -Äquivalente für Strom werden die höheren Energiebedarfe durch den weiteren Einsatz von Wärmepumpen kompensiert. Der Verlauf der Treibhausgasemissionen ist nicht mehr linear, weil

- a) die geplanten Neubauten nur bis zum Jahr 2030 einberechnet werden,
- b) die Sanierungen ab 2036 um weitere Gebäude mit dem Baujahr 2011 bis 2017 ergänzt werden und
- c) weil die CO_2 -Äquivalente des Netzstroms ab 2030 nicht mehr linear absinkend ist.

Die Summe der Treibhausgasemissionen in Szenario 3 reduziert sich von 13.048 t/a im Jahr 2021 durch die Sanierungen auf 2.446 t/a im Jahr 2045 und damit auf 18,7 % der Ausgangsemissionen. Dabei ist die weitere Reduzierung durch die Bilanzierung des über die Photovoltaik erzeugten Stroms noch nicht berücksichtigt.

Bild 20 enthält die Treibhausgasemissionsverläufe für die sechs Gebäudecluster mit Typgebäuden für die Jahre 2021 bis 2045. Neben den jeweils sinkenden Gesamtemissionen sind auch die einzelnen Anteile der Energieträger zu erkennen, so auch, dass es nur im Cluster Berufsschule (und im nicht abgebildeten Restcluster) kleine Biomasseanteile gibt. Die Treibhausgasemissionen aller Energieträger (Erdgas, Biomasse und Netzstrom) sinken in den Jahren von 2021 bis 2045.

Tabelle 45:
 Jährliche Treibhausgasemissionen je Energieträger von 2021 bis 2045 für den Betrieb der städtischen Gebäude gemäß Szenario 3 mit dem Zieljahr 2045.

Cluster	Energie-träger	Treibhausgasemissionen gemäß Szenario 3 [t/a]												
		2021	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045
Kinder-tages-stätten	Erdgas	475	446	416	387	357	327	298	268	227	186	146	105	64
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	237	242	246	248	247	240	225	209	196	180	161	140	116
	Summe	712	688	662	634	604	567	523	478	423	367	307	245	180
Grund-schulen	Erdgas	1.698	1.571	1.443	1.315	1.187	1.060	932	804	669	535	400	265	131
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	320	373	419	457	487	495	481	460	433	403	363	317	263
	Summe	2.018	1.944	1.861	1.773	1.674	1.555	1.412	1.264	1.103	938	763	582	394
Weiter-füh-rende Schulen	Erdgas	3.275	3.047	2.819	2.591	2.362	2.134	1.906	1.678	1.424	1.171	918	665	412
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	968	1.031	1.082	1.123	1.147	1.139	1.095	1.039	969	892	797	690	570
	Summe	4.244	4.079	3.900	3.713	3.509	3.273	3.001	2.716	2.393	2.063	1.715	1.355	982
Berufs-schulen	Erdgas	645	596	547	498	450	401	352	304	243	182	121	61	0
	Bio-masse	11	10	9	8	7	6	5	4	4	3	1	1	0
	Netz-strom	503	491	476	462	444	422	393	362	325	289	250	210	169
	Summe	1.159	1.096	1.032	969	901	829	751	670	572	474	373	272	169
Sport-hallen	Erdgas	1.164	1.075	987	898	809	721	632	544	444	345	245	146	47
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	492	488	481	474	462	444	418	389	357	324	286	245	200
	Summe	1.657	1.564	1.468	1.372	1.271	1.165	1.050	933	802	669	531	391	246
Verwal-tungs-ge-bäude	Erdgas	939	863	786	710	634	557	481	405	328	252	176	99	23
	Bio-masse	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Netz-strom	492	482	470	457	442	421	393	363	330	298	260	221	179
	Summe	1.431	1.344	1.256	1.167	1.075	978	874	768	659	550	436	320	202
Rest-cluster	Erdgas	1.262	1.157	1.052	946	841	736	631	526	421	315	210	105	0
	Bio-masse	16	15	15	15	14	14	14	13	11	8	5	3	0
	Netz-strom	550	561	567	571	568	557	533	504	469	430	384	332	273
	Summe	1.828	1.733	1.634	1.532	1.424	1.307	1.178	1.043	900	754	599	439	273
Ge-samt-heit der Ge-bäude	Erdgas	9.459	8.754	8.050	7.345	6.641	5.936	5.232	4.528	3.757	2.987	2.217	1.447	676
	Bio-masse	27	25	24	23	21	20	19	18	14	11	6	4	0
	Netz-strom	3.563	3.669	3.741	3.792	3.797	3.718	3.539	3.326	3.080	2.817	2.503	2.154	1.770
	Summe	13.048	12.448	11.814	11.160	10.460	9.674	8.790	7.871	6.851	5.814	4.725	3.604	2.446

Szenario 3: Treibhausgasemissionen Betrieb

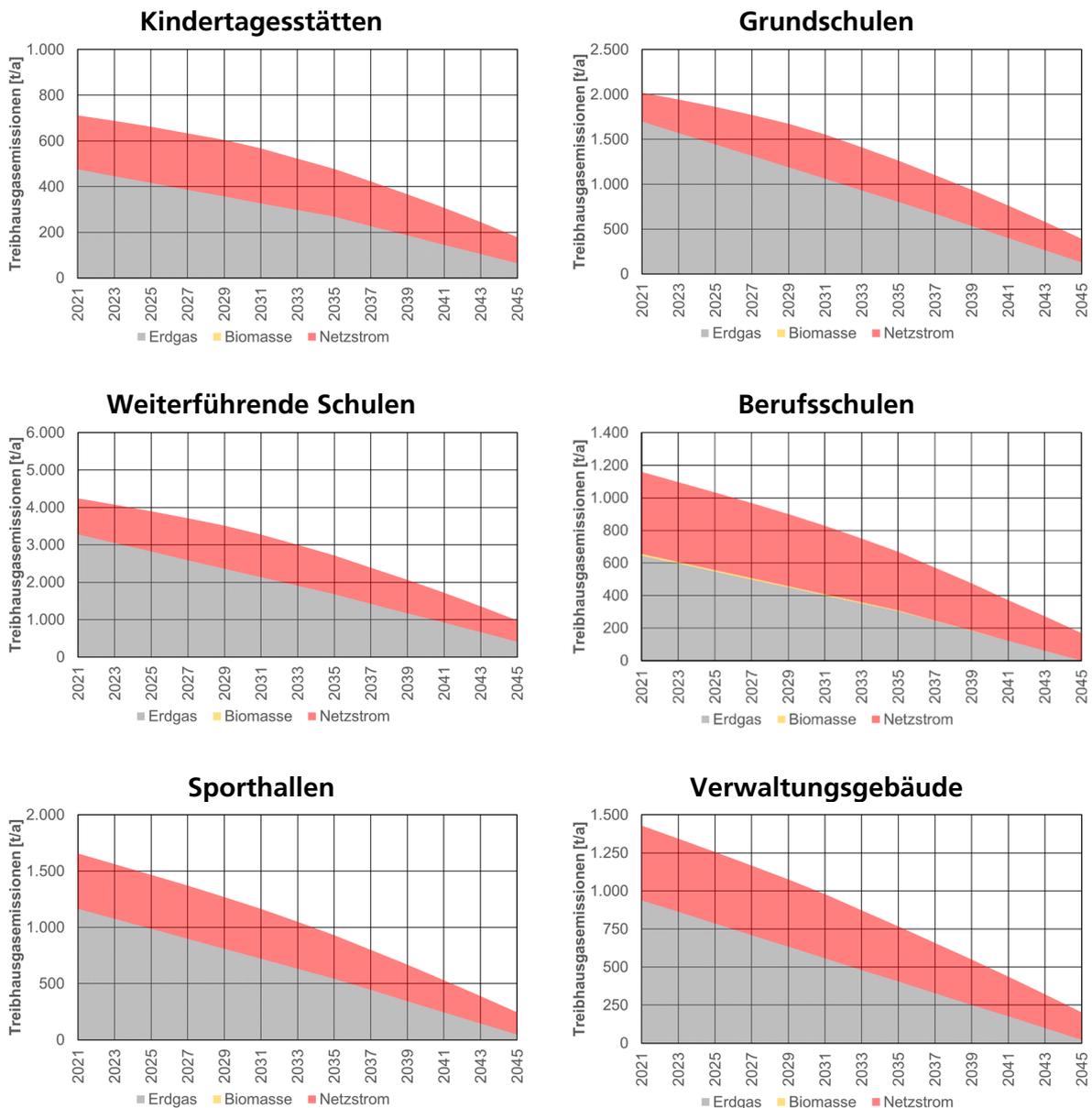


Bild 20:

Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der sechs spezifischen Gebäudecluster aufgeteilt in die genutzten Energieträger gemäß Szenario 3.

In Bild 21 und Bild 22 sind die Treibhausgasemissionen der Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 3 dargestellt, aufgeteilt in die verwendeten Energieträger bzw. in die insgesamt sieben Gebäudecluster. Aus der Aufteilung in die Gebäudecluster ist ersichtlich, dass das Cluster „Weiterführende Schulen“ die höchsten Treibhausgasemissionen der Cluster verursacht, gefolgt von den Grundschulen.

Szenario 3: Treibhausgasemissionen gesamt je Energieträger

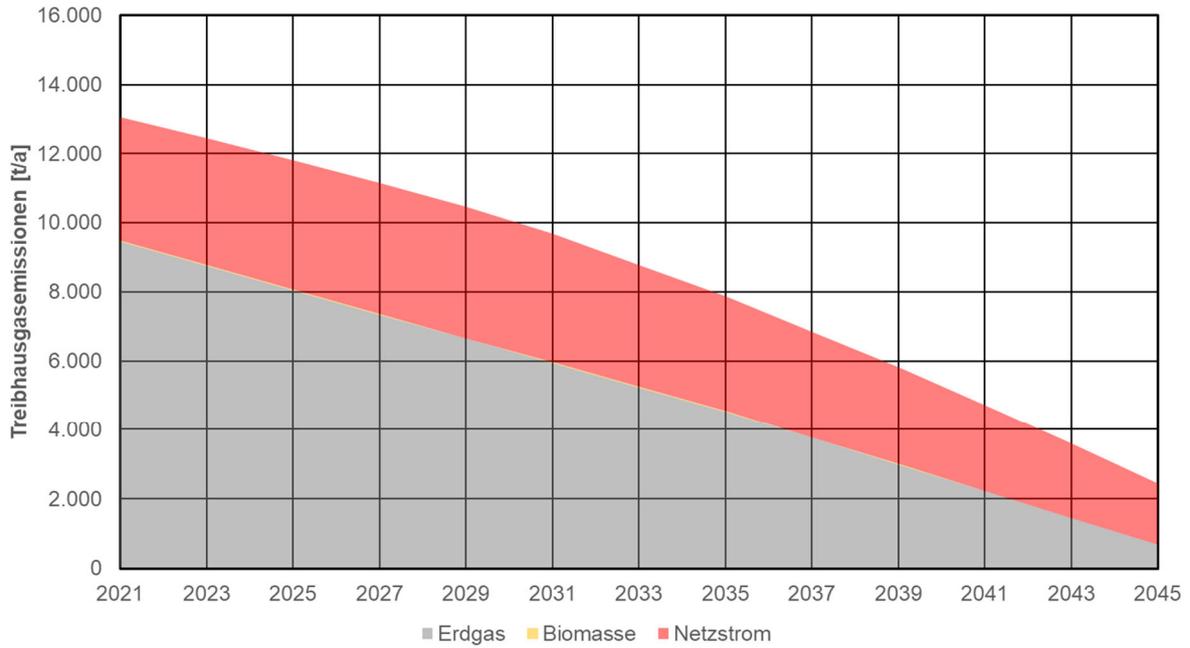


Bild 21:
Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Energieträger gemäß Szenario 3.

Szenario 3: Treibhausgasemissionen gesamt je Gebäudecluster

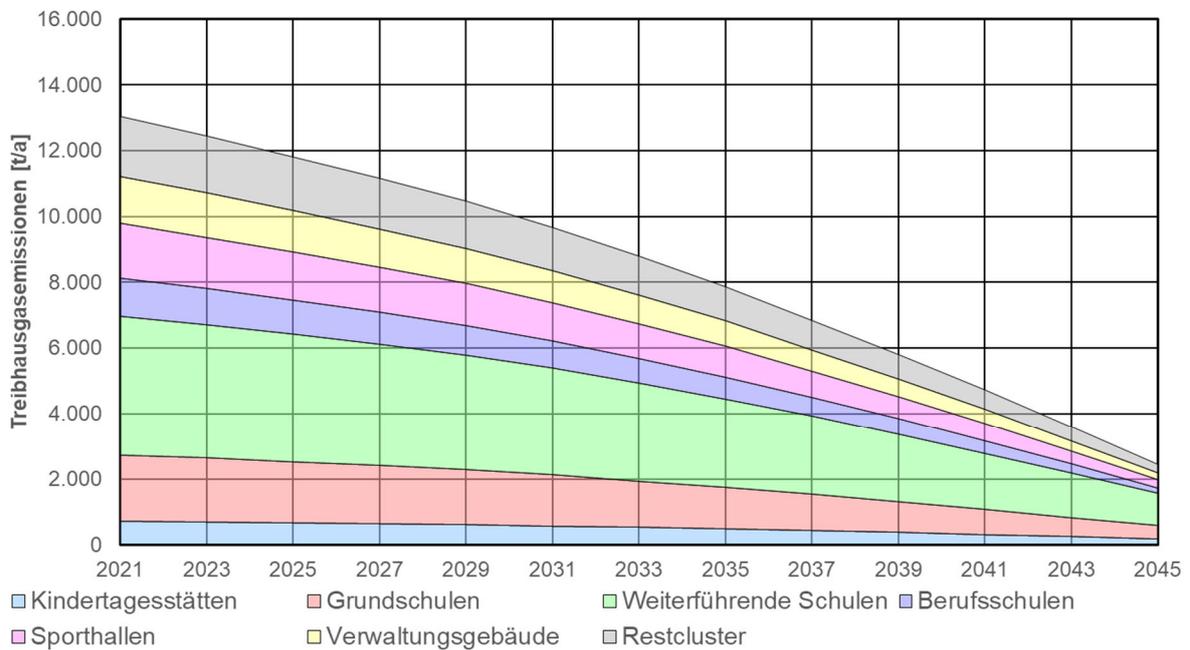


Bild 22:
Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude aufgeteilt in die Gebäudecluster gemäß Szenario 3.

6.2.3 Benötigter Photovoltaikstrom für die Klimaneutralität des Betriebs der städtischen Gebäude

Die im Jahr 2045 verbleibenden Treibhausgasemissionen von 2.446 t/a sollen durch die Erzeugung von Strom über PV-Module ausgeglichen werden und so der Betrieb der städtischen Gebäude in einer Jahresbilanz klimaneutral gestellt werden. Dafür werden bei einer CO₂-Äquivalente von -91 g/kWh für in das Stromnetz eingespeisten PV-Strom im Jahr 2045 insgesamt 26.881 MWh/a PV-Strom benötigt. Da die CO₂-Äquivalente für die Einspeisung von PV-Strom dem negativen Wert der CO₂-Äquivalente für den genutzten Strom aus dem Stromnetz entspricht, ist es bilanziell egal, ob der PV-Strom selbst genutzt oder eingespeist wird. Es sollte jedoch angestrebt werden, möglichst viel des PV-Stroms in den Gebäuden selbst zu nutzen, um das Stromnetz zu entlasten.

Mit dem Ansatz von 111 kWh PV-Strom pro m² Dachfläche und Jahr können die benötigte für Photovoltaik geeignete Dachfläche, die benötigte Modulfläche und die erforderliche Nennleistung in kW_p berechnet werden. Dieser Ansatz verwendet die Solarstrahlungsintensität in Oldenburg, berücksichtigt bereits die erforderlichen Abstände der Module zu den Dachrändern und zwischen den Modulreihen und beruht auf Modulen mit 350 W_p auf einer Fläche von 1,71 m², siehe auch Kapitel 2.7. Zusätzlich kann über die für PV geeigneten Dachflächen der Typgebäude der Anteil der davon benötigten Dachfläche ermittelt werden.

Damit ergeben sich folgende Kennwerte für die erforderliche Photovoltaik:

- Benötigte Dachfläche: 242.171 m²
- Benötigte Modulfläche: 157.411 m²
- Benötigte PV-Nennleistung: 32.219 kW_p
- Anteil der erforderlichen PV-Dachfläche an der für PV geeigneten Dachfläche: 77,8 %

Dabei kann nicht auf den Dächern jedes Gebäudeclusters die für das Gebäudecluster erforderliche PV-Strommenge erzeugt werden. Während dies basierend auf den gewählten Typgebäuden für die Grundschulen, Kindertagesstätten und Sporthallen leichter möglich ist, erscheint es vor allem für die Verwaltungsgebäude und die Weiterführenden Schulen als unmöglich. Deshalb werden die PV-Kennwerte in dieser Studie nur für die Gesamtheit der Gebäude bestimmt.

Wird dabei von einem linearen Zubau an PV-Fläche über die betrachteten Jahre ausgegangen, so ergeben sich die in Tabelle 46 zusammengestellten Kennwerte für die benötigte PV-Dachfläche, die Endenergie und die Treibhausgasemissionen inklusive Berücksichtigung des PV-Stroms.

Tabelle 46:

Benötigte Dachfläche für PV sowie Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen mit Berücksichtigung des PV-Stroms für die Klimaneutralität im Betrieb im Jahr 2045 gemäß Szenario 3.

Kennwert		2021	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045
Benötigte Dachfläche für PV [m²]		0	20.181	40.362	60.543	80.724	100.905	121.086	141.266	161.447	181.628	201.809	221.990	242.171
Endenergie inkl. PV-Strom [MWh/a]	Erdgas	43.388	40.156	36.925	33.694	30.462	27.231	24.000	20.768	17.235	13.702	10.169	6.635	3.102
	Biomasse	717	683	649	615	581	547	513	479	383	287	191	96	0
	Strombedarf	10.065	10.951	11.837	12.724	13.610	14.410	15.123	15.836	16.558	17.281	18.004	18.727	19.449
	PV-Strom	0	-2.240	-4.480	-6.720	-8.960	-11.200	-13.441	-15.681	-17.921	-20.161	-22.401	-24.641	-26.881
	Summe	54.169	49.550	44.931	40.312	35.693	30.987	26.195	21.402	16.256	11.110	5.963	817	-4.329
Treibhausgasemissionen inkl. PV-Strom [t/a]	Erdgas	9.459	8.754	8.050	7.345	6.641	5.936	5.232	4.528	3.757	2.987	2.217	1.447	676
	Biomasse	27	25	24	23	21	20	19	18	14	11	6	4	0
	Strombedarf	3.563	3.669	3.741	3.792	3.797	3.718	3.539	3.326	3.080	2.817	2.503	2.154	1.770
	PV-Strom	0	-750	-1.416	-2.003	-2.500	-2.890	-3.145	-3.293	-3.333	-3.286	-3.114	-2.834	-2.446
	Summe	13.048	11.698	10.399	9.157	7.960	6.785	5.645	4.578	3.518	2.528	1.612	770	0

Bild 23 zeigt den Verlauf der Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der stadteigenen Gebäude mit Berücksichtigung des erzeugten PV-Stroms über den Betrachtungszeitraum 2021 bis 2045 gemäß Szenario 3. Die Klimaneutralität wird erst im Zieljahr 2045 erreicht, in den Jahren zuvor verbleiben sich jährlich verringernde Treibhausgasemissionen.

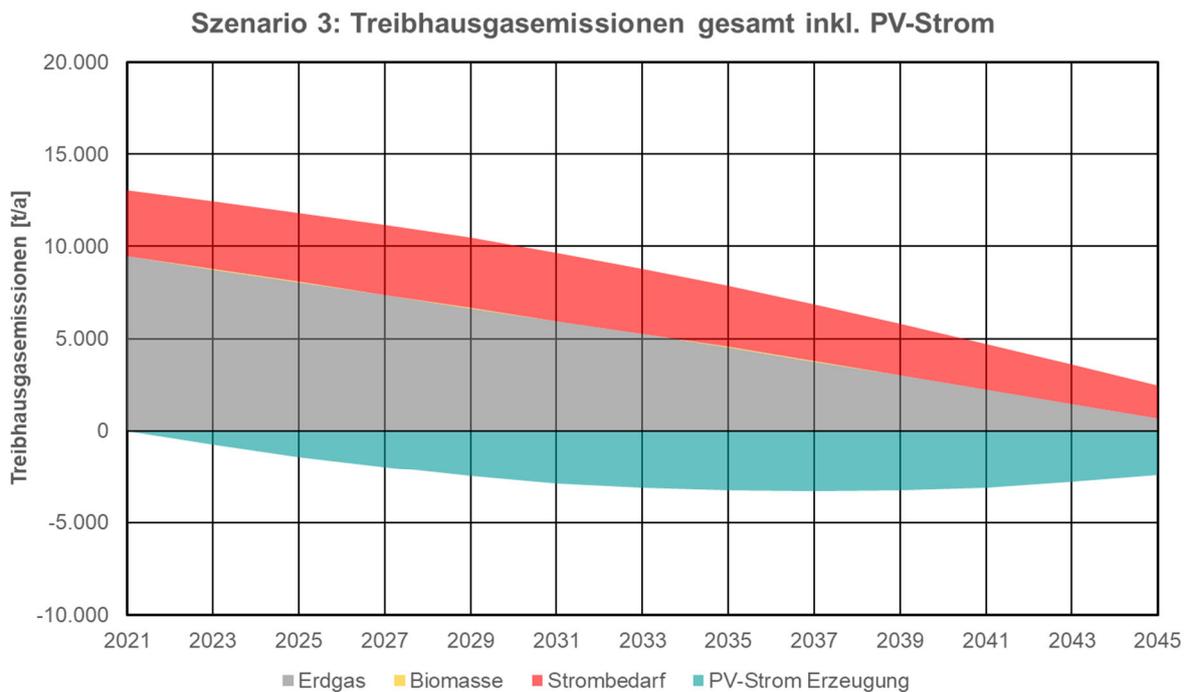


Bild 23:
 Jährliche Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude inklusive der benötigten PV-Stromerzeugung für das Ziel Klimaneutralität aufgeteilt in die Energieträger gemäß Szenario 3.

6.2.4 Kosten: Investitionskosten und Energiekosten

Die Investitionskosten für die Sanierungen der städtischen Gebäude und die Mehrkosten gegenüber dem derzeitigen Energiestandard für die geplanten Neubauten (KG 300 (Bauwerk) und KG 400 (Anlagentechnik)) betragen für die Jahre 2022 bis 2030 jährlich 11,9 Millionen Euro brutto. Die dafür veranschlagten Planungskosten (25 %) betragen jährlich 3,0 Millionen Euro brutto. Die Aufteilung auf die einzelnen Komponenten ist in Tabelle 47 ersichtlich. Dabei sind die Kosten für die Photovoltaik nicht enthalten. Die Mehrkosten der geplanten Neubauten gegenüber dem bereits derzeit durch die Stadt Oldenburg angewandten Passivhausstandard im Bereich der Wärmepumpen (siehe dazu Kapitel 2.9) sind als Anteil der Kosten getrennt in Tabelle 47 eingetragen.

Da die Neubaukosten nur für die Jahre 2022 bis 2030 anfallen, ergeben sich leicht reduzierte Kosten für die Cluster Kindertagesstätten, Grundschulen, Weiterführende Schulen und das Restcluster in den Jahren 2031 bis 2035, siehe Tabelle 48. Die Investitionskosten für die Sanierungen der städtischen Gebäude (KG 300 (Bauwerk) und KG 400 (Anlagentechnik)) betragen für die Jahre 2031 bis 2035 jährlich 11,7 Millionen Euro brutto. Die dafür veranschlagten Planungskosten (25 %) betragen jährlich 2,9 Millionen Euro brutto.

In Szenario 3 werden ab 2036 bis 2045 zusätzlich die Gebäude mit den Baujahren 2011 bis 2017 saniert. Dadurch entstehen in diesen Jahren gegenüber den

Jahren 2031 bis 2035 erhöhte Investitionskosten von 13,6 Millionen Euro und Planungskosten von 3,4 Millionen Euro, wie Tabelle 49 zeigt.

Tabelle 47:

Jährlich anfallende Investitions- und Nebenkosten für die Sanierung und die geplanten Neubauten ohne Berücksichtigung der Photovoltaikkosten für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 3.

Cluster	Kosten	Jährliche Investitions- und Nebenkosten für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 3 [T€/a] (brutto)							
		Energetische Sanierung der Bauteile	Gerüste	Einbau Luft-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Sole-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Lüftung mit WRG	Einbau LED-Beleuchtung	Ersatz der Heizkörper	Summe
Kindertagesstätten	KG 300 & KG 400	374,5	13,2	53,9	13,9	62,0	19,6	23,0	560,0
	KG 700 (25 %)	93,6	3,3	13,5	3,5	15,5	4,9	5,8	140,0
	Summe	468,2	16,4	67,4	17,3	77,5	24,5	28,8	700,0
	<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	0	0	17,3	5,0	0	0	0	22,3
Grundschulen	KG 300 & KG 400	1.495,0	56,1	190,8	52,1	329,7	63,8	97,5	2.285,0
	KG 700 (25 %)	373,8	14,0	47,7	13,0	82,4	15,9	24,4	571,2
	Summe	1.868,8	70,1	238,5	65,1	412,1	79,7	121,8	2.856,2
	<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	0	0	63,0	20,9	0	0	0	83,9
Weiterführende Schulen	KG 300 & KG 400	2.921,7	102,0	222,8	61,9	700,4	124,6	159,4	4.292,9
	KG 700 (25 %)	730,4	25,5	55,7	15,5	175,1	31,2	39,8	1.073,2
	Summe	3.652,1	127,5	278,5	77,4	875,6	155,8	199,2	5.366,1
	<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	0	0	42,7	13,6	0	0	0	56,3
Berufsschulen	KG 300 & KG 400	379,6	33,7	43,2	11,3	162,9	67,0	33,7	731,5
	KG 700 (25 %)	94,9	8,4	10,8	2,8	40,7	16,8	8,4	182,9
	Summe	474,5	42,1	54,0	14,1	203,6	83,8	42,2	914,3
	<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
Sporthallen	KG 300 & KG 400	1.182,5	22,2	100,8	24,9	46,4	47,8	58,8	1.483,4
	KG 700 (25 %)	295,6	5,5	25,2	6,2	11,6	11,9	14,7	370,8
	Summe	1.478,1	27,7	126,0	31,1	58,0	59,7	73,5	1.854,2
	<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
Verwaltungsgebäude	KG 300 & KG 400	784,9	23,6	47,8	12,3	9,0	52,8	35,8	966,3
	KG 700 (25 %)	196,2	5,9	12,0	3,1	2,3	13,2	8,9	241,6
	Summe	981,1	29,5	59,8	15,4	11,3	66,0	44,7	1.207,8
	<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	0	0	0	0	0	0	0	0
Restcluster	KG 300 & KG 400	1.106,1	31,9	124,3	33,1	160,7	52,8	52,9	1.561,8
	KG 700 (25 %)	276,5	8,0	31,1	8,3	40,2	13,2	13,2	390,5
	Summe	1.382,7	39,9	155,3	41,4	200,9	66,1	66,1	1.952,3
	<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	0	0	21,4	6,6	0	0	0	28,0
Gesamtheit der Gebäude	KG 300 & KG 400	8.244,4	282,7	783,6	209,4	1.471,1	428,4	461,1	11.880,8
	KG 700 (25 %)	2.061,1	70,7	195,9	52,4	367,8	107,1	115,3	2.970,2
	Summe	10.305,5	353,3	979,5	261,8	1.838,9	535,5	576,4	14.851,0
	<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	0	0	144,4	45,9	0	0	0	190,3

Tabelle 48:
 Jährlich anfallende Investitions- und Nebenkosten für die Sanierung ohne Berücksichtigung der Photovoltaikkosten für die Jahre 2031 bis 2035 gemäß Szenario 3.

Cluster	Kosten	Jährliche Investitions- und Nebenkosten für die Jahre 2031 bis 2035 gemäß Szenario 3 [T€/a] (brutto)							
		Energetische Sanierung der Bauteile	Gerüste	Einbau Luft-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Sole-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Lüftung mit WRG	Einbau LED-Beleuchtung	Ersatz der Heizkörper	Summe
Kindertagesstätten	KG 300 & KG 400	374,5	13,2	40,0	9,9	62,0	19,6	23,0	542,2
	KG 700 (25 %)	93,6	3,3	10,0	2,5	15,5	4,9	5,8	135,5
	Summe	468,2	16,4	50,0	12,4	77,5	24,5	28,8	677,7
Grundschulen	KG 300 & KG 400	1.495,0	56,1	140,5	35,3	329,7	63,8	97,5	2.217,9
	KG 700 (25 %)	373,8	14,0	35,1	8,8	82,4	15,9	24,4	554,5
	Summe	1.868,8	70,1	175,6	44,2	412,1	79,7	121,8	2.772,4
Weiterführende Schulen	KG 300 & KG 400	2.921,7	102,0	188,7	51,1	700,4	124,6	159,4	4.247,9
	KG 700 (25 %)	730,4	25,5	47,2	12,8	175,1	31,2	39,8	1.062,0
	Summe	3.652,1	127,5	235,8	63,9	875,6	155,8	199,2	5.309,9
Berufsschulen	KG 300 & KG 400	379,6	33,7	43,2	11,3	162,9	67,0	33,7	731,5
	KG 700 (25 %)	94,9	8,4	10,8	2,8	40,7	16,8	8,4	182,9
	Summe	474,5	42,1	54,0	14,1	203,6	83,8	42,2	914,3
Sporthallen	KG 300 & KG 400	1.182,5	22,2	100,8	24,9	46,4	47,8	58,8	1.483,4
	KG 700 (25 %)	295,6	5,5	25,2	6,2	11,6	11,9	14,7	370,8
	Summe	1.478,1	27,7	126,0	31,1	58,0	59,7	73,5	1.854,2
Verwaltungsbäude	KG 300 & KG 400	784,9	23,6	47,8	12,3	9,0	52,8	35,8	966,3
	KG 700 (25 %)	196,2	5,9	12,0	3,1	2,3	13,2	8,9	241,6
	Summe	981,1	29,5	59,8	15,4	11,3	66,0	44,7	1.207,8
Restcluster	KG 300 & KG 400	1.106,1	31,9	107,2	27,8	160,7	52,8	52,9	1.539,5
	KG 700 (25 %)	276,5	8,0	26,8	7,0	40,2	13,2	13,2	384,9
	Summe	1.382,7	39,9	134,0	34,8	200,9	66,1	66,1	1.924,3
Gesamtheit der Gebäude	KG 300 & KG 400	8.244,4	282,7	668,1	172,7	1.471,1	428,4	461,1	11.728,5
	KG 700 (25 %)	2.061,1	70,7	167,0	43,2	367,8	107,1	115,3	2.932,1
	Summe	10.305,5	353,3	835,2	215,9	1.838,9	535,5	576,4	14.660,6

Tabelle 49:
 Jährlich anfallende Investitions- und Nebenkosten für die Sanierung ohne Berücksichtigung der Photovoltaikkosten für die Jahre 2036 bis 2045 gemäß Szenario 3.

Cluster	Kosten	Jährliche Investitions- und Nebenkosten für die Jahre 2036 bis 2045 gemäß Szenario 3 [T€/a] (brutto)							
		Energetische Sanierung der Bauteile	Gerüste	Einbau Luft-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Sole-Wasser-Wärmepumpen	Einbau Lüftung mit WRG	Einbau LED-Beleuchtung	Ersatz der Heizkörper	Summe
Kindertagesstätten	KG 300 & KG 400	543,6	21,8	66,6	16,5	103,2	32,6	38,3	822,7
	KG 700 (25 %)	135,9	5,5	16,7	4,1	25,8	8,2	9,6	205,7
	Summe	679,5	27,3	83,3	20,6	129,1	40,8	47,9	1.028,4
Grundschulen	KG 300 & KG 400	1.540,0	59,4	148,5	37,4	349,9	67,6	103,0	2.305,7
	KG 700 (25 %)	385,0	14,8	37,1	9,3	87,5	16,9	25,7	576,4
	Summe	1.925,0	74,2	185,6	46,7	437,4	84,5	128,7	2.882,2
Weiterführende Schulen	KG 300 & KG 400	3.168,3	113,3	209,4	56,7	778,6	138,6	176,8	4.641,5
	KG 700 (25 %)	792,1	28,3	52,3	14,2	194,6	34,6	44,2	1.160,4
	Summe	3.960,3	141,6	261,7	70,9	973,2	173,2	221,0	5.801,9
Berufsschulen	KG 300 & KG 400	725,3	63,0	81,1	21,2	305,9	125,9	63,4	1.385,8
	KG 700 (25 %)	181,3	15,7	20,3	5,3	76,5	31,5	15,8	346,4
	Summe	906,7	78,7	101,4	26,5	382,4	157,3	79,2	1.732,2
Sporthallen	KG 300 & KG 400	1.275,7	25,1	113,7	28,1	53,1	53,3	66,3	1.615,3
	KG 700 (25 %)	318,9	6,3	28,4	7,0	13,3	13,3	16,6	403,8
	Summe	1.594,7	31,3	142,1	35,1	66,4	66,6	82,9	2.019,1
Verwaltungsgebäude	KG 300 & KG 400	784,9	23,6	47,8	12,3	9,0	52,8	35,8	966,3
	KG 700 (25 %)	196,2	5,9	12,0	3,1	2,3	13,2	8,9	241,6
	Summe	981,1	29,5	59,8	15,4	11,3	66,0	44,7	1.207,8
Restcluster	KG 300 & KG 400	1.331,8	42,3	141,3	36,7	214,6	66,5	69,6	1.902,7
	KG 700 (25 %)	333,0	10,6	35,3	9,2	53,6	16,6	17,4	475,7
	Summe	1.664,8	52,9	176,6	45,9	268,2	83,1	86,9	2.378,4
Gesamtheit der Gebäude	KG 300 & KG 400	9.369,6	348,4	808,4	208,9	1.814,4	537,1	553,1	13.640,0
	KG 700 (25 %)	2.342,4	87,1	202,1	52,2	453,6	134,3	138,3	3.410,0
	Summe	11.712,0	435,5	1.010,5	261,1	2.268,0	671,4	691,4	17.050,0

Die Summen der Investitions- und Planungskosten (ohne Photovoltaikkosten) für die Gesamtheit der Gebäude über die 24 Betrachtungsjahre 2022 bis 2045 sind in Tabelle 50 zusammengestellt und betragen 377,46 Millionen Euro.

Die Kosten für die Photovoltaik zum Erreichen des Klimaneutralitätszieles betragen jährlich 1,30 Millionen Euro und insgesamt 31,25 Millionen Euro. Letztere sind ebenfalls in Tabelle 50 eingetragen. Bei einem Ansatz von ebenfalls 25 %

Nebenkosten für die Photovoltaik ergeben sich weitere 7,8 Millionen Euro als Nebenkosten für die Photovoltaik.

Die Gesamtsumme der Investitions- und Nebenkosten inklusive der Photovoltaik zur Erreichung der Klimaneutralität in der Betriebsphase in Szenario 3 ergibt sich somit zu 416,5 Millionen Euro.

Tabelle 50:

Summe der anfallenden Investitions- und Nebenkosten für die Sanierung und die geplanten Neubauten sowie Summe der Kosten für die Photovoltaikanlagen über die Betrachtungszeit 2022 bis 2045 für die Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 3.

Kostenbereich	Summe der Investitions- und Nebenkosten für die Gesamtheit der Gebäude (2022 bis 2045) gemäß Szenario 3 [T€] (brutto)
KG 300 (Bauwerk)	216.559
KG 400 (Anlagentechnik ohne Photovoltaik)	85.411
KG 700 (Nebenkosten)	75.493
Summe KG 300, KG 400, KG 700	377.462
<i>davon Mehrkosten Neubauten</i>	<i>1.713</i>
Photovoltaikkosten (KG 400)	31.252
Nebenkosten Photovoltaik (KG 700)	7.813
Gesamtsumme	416.527

Für die Ermittlung der Energiekosten werden die Tarife der Stadt Oldenburg und weitere Quellen gemäß Kapitel 2.9.3 verwendet. Dabei müssen die Endenergieverbräuche aus Kapitel 4.2.1 für folgende Energieträger weiter unterteilt werden:

- Biomasse: Aufteilung in Holzpellet, Holzhackschnitzel und Scheitholz
- Netzstrom: Aufteilung in Wärmepumpenstrom und sonstigen Strom

Abgesehen davon, dass der Wärmepumpenstrom zu einem niedrigeren Tarif als der sonstige Netzstrom abgerechnet wird, kann auch nur der sonstige Strom durch selbst genutzten PV-Strom ersetzt werden. Tabelle 51 enthält die jährlichen Energiekosten für die einzelnen Gebäudecluster sowie die Gesamtheit der Gebäude ohne Berücksichtigung des erzeugten PV-Stroms. Dabei wird aus Platzgründen wie bei der Endenergie und den Treibhausgasemissionen nur jedes zweite Jahr angezeigt.

Tabelle 51:
 Jährliche Energiekosten je Energieträger von 2021 bis 2045 für den Betrieb der städtischen Gebäude gemäß Szenario 3 ohne Berücksichtigung des PV-Stroms.

Cluster	Energie-träger	Energiekosten ohne Berücksichtigung des PV-Stroms gemäß Szenario 3 [T€/a] (brutto)												
		2021	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045
Kinder-tages-stätten	Erdgas	96,6	90,6	84,6	78,5	72,5	66,5	60,5	54,5	46,2	37,9	29,6	21,3	13,0
	Bio-masse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netz-strom	152,1	163,9	175,7	187,5	199,3	208,9	216,1	223,4	235,2	246,9	258,6	270,3	282,1
	Summe	248,7	254,5	260,3	266,1	271,8	275,4	276,7	277,9	281,4	284,8	288,2	291,6	295,0
Grund-schulen	Erdgas	345,1	319,2	293,2	267,2	241,3	215,3	189,4	163,4	136,0	108,7	81,3	53,9	26,6
	Bio-masse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netz-strom	210,5	256,6	302,6	348,6	394,7	432,4	461,7	491,0	521,5	552,0	582,5	613,1	643,6
	Summe	555,6	575,7	595,8	615,9	636,0	647,7	651,0	654,4	657,6	660,7	663,8	667,0	670,1
Weiter-füh- rende Schulen	Erdgas	665,6	619,2	572,8	526,4	480,1	433,7	387,3	340,9	289,5	238,0	186,6	135,2	83,8
	Bio-masse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netz-strom	637,6	713,6	789,7	865,7	941,7	1.009,0	1.067,3	1.125,7	1.183,0	1.240,3	1.297,5	1.354,8	1.412,1
	Summe	1.303,1	1.332,8	1.362,5	1.392,1	1.421,8	1.442,6	1.454,6	1.466,6	1.472,4	1.478,3	1.484,1	1.490,0	1.495,9
Berufs-schulen	Erdgas	131,0	121,1	111,2	101,3	91,4	81,5	71,6	61,7	49,4	37,0	24,7	12,3	0,0
	Bio-masse	11,0	10,1	9,1	8,2	7,3	6,4	5,5	4,6	3,7	2,7	1,8	0,9	0,0
	Netz-strom	329,5	338,9	348,2	357,6	366,9	376,3	385,6	394,9	400,4	405,8	411,2	416,6	422,0
	Summe	471,5	470,0	468,6	467,1	465,6	464,1	462,7	461,2	453,4	445,5	437,7	429,9	422,0
Sport-hallen	Erdgas	236,5	218,5	200,5	182,5	164,5	146,5	128,5	110,4	90,2	70,1	49,9	29,7	9,5
	Bio-masse	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Netz-strom	324,3	337,1	350,0	362,9	375,8	388,7	401,6	414,5	427,7	440,9	454,2	467,4	480,6
	Summe	560,8	555,7	550,6	545,4	540,3	535,2	530,1	525,0	518,0	511,0	504,0	497,0	490,0
Verwal-tungs-ge-bäude	Erdgas	190,8	175,3	159,8	144,3	128,8	113,3	97,8	82,2	66,7	51,2	35,7	20,2	4,7
	Bio-masse	36,0	34,5	33,0	31,5	30,0	28,5	27,0	25,5	20,4	15,3	10,2	5,1	0,0
	Netz-strom	322,9	332,5	342,2	351,8	361,5	371,2	380,8	390,5	400,1	409,8	419,5	429,1	438,8
	Summe	549,6	542,3	535,0	527,6	520,3	512,9	505,6	498,3	487,3	476,3	465,4	454,4	443,5
Rest-cluster	Erdgas	256,4	235,0	213,7	192,3	170,9	149,6	128,2	106,8	85,5	64,1	42,7	21,4	0,0
	Bio-masse	25,0	24,4	23,8	23,3	22,7	22,1	21,5	21,0	16,8	12,6	8,4	4,2	0,0
	Netz-strom	362,3	386,9	412,8	438,7	464,7	490,8	516,9	542,9	568,7	594,6	620,3	646,1	671,9
	Summe	643,7	646,3	650,3	654,3	658,4	662,5	666,6	670,7	671,0	671,2	671,5	671,7	671,9
Ge-samt-heit der Ge-bäude	Erdgas	1.922,1	1.778,9	1.635,8	1.492,6	1.349,5	1.206,3	1.063,2	920,0	763,5	607,0	450,5	294,0	137,4
	Bio-masse	36,0	34,5	33,0	31,5	30,0	28,5	27,0	25,5	20,4	15,3	10,2	5,1	0,0
	Netz-strom	2.339,1	2.529,5	2.721,2	2.912,9	3.104,7	3.277,1	3.430,0	3.583,0	3.736,6	3.890,3	4.043,9	4.197,5	4.351,1
	Summe	4.297,1	4.342,9	4.389,9	4.437,0	4.484,2	4.511,9	4.520,2	4.528,6	4.520,6	4.512,6	4.504,6	4.496,5	4.488,5

Aufgrund des Wechsels von den kostengünstigeren Energieträgern Erdgas und Biomasse auf den Strom für die Wärmepumpen erhöhen sich die Energiekosten ohne die Berücksichtigung des PV-Stroms trotz der Sanierungen von 4,3 Millionen Euro/a im Jahr 2021 auf knapp 4,5 Millionen Euro/a im Jahr 2045.

Da die Photovoltaik gemäß Tabelle 50 nur für die Gesamtheit der Gebäude bestimmt wurde und in dieser Studie nicht auf die einzelnen Gebäudecluster aufgeteilt wurde, kann auch die Nutzung des PV-Stroms nicht auf die Gebäudecluster verteilt werden. Für die Gesamtheit der Gebäude wurde der erzeugte PV-Strom jedoch unterteilt in selbst genutzten Strom, der entsprechend vom Netzstrom abgezogen wurde, und eingespeisten Strom ins Netz, für den der Einspeisetarif gemäß Tabelle 13 angerechnet wird. Dabei wurden basierend auf den Erfahrungen mit den Effizienzhaus Plus-Bildungsbauten [25] und den Plusenergieschulen aus EnEff:Schule [26] folgende maximale Anteile als selbst genutzter Strom angerechnet:

- Selbst genutzter PV-Strom ist maximal 50 % des sonstigen Netzstroms (ohne Wärmepumpenstrom).
- Selbst genutzter PV-Strom ist maximal 50 % des gesamten erzeugten PV-Stroms.

Von diesen beiden Werten wird jeweils der kleinere Wert ermittelt und als selbst genutzter PV-Strom angerechnet, d. h. vom Netzstrom abgezogen. Der restliche erzeugte PV-Strom wird als eingespeister Strom angesetzt und mit dem Einspeisetarif vergütet. Damit ergeben sich die Energiekosten aus Tabelle 52. Bei Berücksichtigung des selbst genutzten und eingespeisten PV-Stroms reduzieren sich die Energiekosten von 4,3 Millionen Euro/a im Jahr 2021 auf 2,0 Millionen Euro/a im Jahr 2045. Summiert man die Kosten für den Sanierungszeitraum 2022 bis 2045 (24 Jahre), so ergeben sich Energiekosten von 69,9 Millionen Euro.

Tabelle 52:
 Jährliche Energiekosten je Energieträger von 2021 bis 2045 für den Betrieb der Gesamtheit der städtischen Gebäude gemäß Szenario 3 mit Berücksichtigung des PV-Stroms.

Energieträger	Energiekosten für die Gesamtheit der Gebäude mit Berücksichtigung des PV-Stroms gemäß Szenario 3 [T€/a] bzw. für die Summe 2022 bis 2045 [T€] (jeweils brutto)													
	2021	2023	2025	2027	2029	2031	2033	2035	2037	2039	2041	2043	2045	Summe 2022 bis 2045
Erdgas	1.922,1	1.778,9	1.635,8	1.492,6	1.349,5	1.206,3	1.063,2	920,0	763,5	607,0	450,5	294,0	137,4	24.290
Biomasse	36,0	34,5	33,0	31,5	30,0	28,5	27,0	25,5	20,4	15,3	10,2	5,1	0,0	540,0
Netzstrom	2.339,1	2.268,4	2.199,0	2.129,7	2.060,4	2.009,7	2.145,8	2.282,2	2.426,1	2.570,2	2.714,2	2.858,3	3.002,3	57.000,8
PV-Stromein- speisung	0,0	-59,0	-118,1	-177,1	-236,1	-303,7	-418,0	-532,3	-648,1	-764,0	-879,9	-995,8	-1.111,7	-11.932,0
Summe	4.297,1	4.022,8	3.749,7	3.476,7	3.203,7	2.940,8	2.818,0	2.695,5	2.561,9	2.428,4	2.295,0	2.161,5	2.028,0	69.898,64

6.2.5 Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik

Der Materialaufwand für die energetische Sanierung der Gebäudehüllflächen, den Einbau der Wärmepumpen als neue Wärmeerzeuger und sonstiger Anlagentechnik sowie für die Neubauten verursacht entsprechend den jährlichen Sanierungen und Neubauten in den Jahren 2022 bis 2030 insgesamt 5.429 t/a anfallende Treibhausgasemissionen und ist in Tabelle 53 aufgeschlüsselt.

Tabelle 53:
Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die energetische Sanierung und die Neubauten der städtischen Gebäude in Oldenburg für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 3.

Cluster	Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Jahre 2022 bis 2030 gemäß Szenario 3 [t/a]							
	Energetische Sanierung						Neubauten	Summe
	Bauteile	Luft-Wasser-Wärmepumpen	Sole-Wasser-Wärmepumpen	Austausch der Heizkörper	Lüftung mit WRG	LED-Beleuchtung		
Kindertagesstätten	145,7	0,5	0,8	8,4	34,2	2,4	123,9	315,9
Grundschulen	762,2	1,5	3,6	35,5	186,2	7,8	565,0	1.561,8
Weiterführende Schulen	951,0	1,7	5,9	58,1	398,6	15,2	509,6	1.940,1
Berufsschulen	170,7	0,4	1,2	12,3	92,6	8,2	0,0	285,5
Sporthallen	415,8	1,3	2,1	21,4	24,0	5,8	0,0	470,4
Verwaltungsgebäude	187,8	0,5	1,3	13,0	4,9	6,5	0,0	214,0
Restcluster	366,3	1,6	1,9	19,3	86,2	6,5	159,2	641,0
Gesamtheit der Gebäude	2.999,5	7,5	16,8	168,1	826,7	52,4	1.357,7	5.428,6

Da die geplanten Neubauten im Zeitraum 2022 bis 2030 angesetzt wurden, ergeben sich deutlich reduzierte Treibhausgasemissionen aus der Gebäude- und Anlagentechnik für die Cluster Kindertagesstätten, Grundschulen, Weiterführende Schulen und das Restcluster in den Jahren 2031 bis 2035, siehe Tabelle 54. Der Materialaufwand für die energetische Sanierung der Gebäudehüllflächen, den Einbau der Wärmepumpen als neue Wärmeerzeuger und sonstiger Anlagentechnik in den sanierten Gebäuden verursacht in den Jahren 2031 bis 2035 insgesamt 4.071 t jährlich anfallende Treibhausgasemissionen.

Tabelle 54:
 Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die energetische Sanierung der städtischen Gebäude in Oldenburg für die Jahre 2031 bis 2035 gemäß Szenario 3.

Cluster	Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Jahre 2031 bis 2035 gemäß Szenario 3 [t/a]						
	Energetische Sanierung						
	Bauteile	Luft-Wasser-Wärmepumpen	Sole-Wasser-Wärmepumpen	Austausch der Heizkörper	Lüftung mit WRG	LED-Beleuchtung	Summe
Kindertagesstätten	145,7	0,5	0,8	8,4	34,2	2,4	192,1
Grundschulen	762,2	1,5	3,6	35,5	186,2	7,8	996,8
Weiterführende Schulen	951,0	1,7	5,9	58,1	398,6	15,2	1.430,5
Berufsschulen	170,7	0,4	1,2	12,3	92,6	8,2	285,5
Sporthallen	415,8	1,3	2,1	21,4	24,0	5,8	470,4
Verwaltungsgebäude	187,8	0,5	1,3	13,0	4,9	6,5	214,0
Restcluster	366,3	1,6	1,9	19,3	86,2	6,5	481,8
Gesamtheit der Gebäude	2.999,5	7,5	16,8	168,1	826,7	52,4	4.071,0

In Szenario 3 werden ab 2036 bis 2045 zusätzlich die Gebäude mit den Baujahren 2011 bis 2017 saniert. Dadurch entstehen in diesen Jahren gegenüber den Jahren 2031 bis 2035 erhöhte jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik von insgesamt 4.908,4 t/a, wie Tabelle 55 zeigt.

Tabelle 55:
 Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die energetische Sanierung der städtischen Gebäude in Oldenburg für die Jahre 2036 bis 2045 gemäß Szenario 3.

Cluster	Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Jahre 2036 bis 2045 gemäß Szenario 3 [t/a]						
	Energetische Sanierung						
	Bauteile	Luft-Wasser-Wärmepumpen	Sole-Wasser-Wärmepumpen	Austausch der Heizkörper	Lüftung mit WRG	LED-Beleuchtung	Summe
Kindertagesstätten	242,1	0,9	1,4	13,9	56,8	4,0	319,1
Grundschulen	807,7	1,6	3,8	37,5	197,5	8,2	1.056,4
Weiterführende Schulen	1.058,3	1,9	6,5	64,4	442,7	16,9	1.590,7
Berufsschulen	319,2	0,8	2,3	23,0	173,1	15,3	533,8
Sporthallen	491,2	1,4	2,4	24,1	27,5	6,6	553,2
Verwaltungsgebäude	187,8	0,5	1,3	13,0	4,9	6,5	214,0
Restcluster	488,1	2,1	2,5	25,3	114,9	8,6	641,4
Gesamtheit der Gebäude	3.594,5	9,2	20,1	201,3	1.017,3	66,0	4.908,4

Summiert man die jährlich anfallenden Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik für die energetische Sanierung und die Neubauten über die Betrachtungsjahre 2022 bis 2045 (24 Jahre) auf, so erhält man die insgesamt gemäß Szenario 3 in diesem Bereich anfallenden Treibhausgasemissionen von 118.297 t, siehe Tabelle 56.

Für die Photovoltaikanlagen wird der nennleistungsbezogene Kennwert für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung aus Kapitel 2.10.3 mit der benötigten Nennleistung der Photovoltaik zur Erreichung der Klimaneutralität im Jahr 2045 multipliziert. Die damit entstehenden Treibhausgasemissionen für die Photovoltaik betragen 36.762 t und sind ebenfalls in Tabelle 56 eingetragen. Somit ergibt sich eine Gesamtsumme der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Gesamtheit der Gebäude von 155.059 t als Sockelbeitrag. Dieser wird im Gegensatz zu den betriebsbedingten Treibhausgasemissionen basierend auf der Endenergie im Jahr 2045 nicht klimaneutral gestellt.

Tabelle 56:

Summe der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik über die Betrachtungszeit 2022 bis 2045 für die Gesamtheit der Gebäude gemäß Szenario 3.

Bereich		Summe der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik für die Gesamtheit der Gebäude (2022 bis 2045) [t]
Energetische Sanierung	Bauteile	77.938,3
	Luft-Wasser-Wärmepumpen	196,8
	Sole-Wasser-Wärmepumpen	436,6
	Austausch der Heizkörper	4.365,6
	Lüftung mit WRG	21.747,2
	LED-Beleuchtung	1.393,4
Neubauten		12.219,0
Photovoltaik		36.761,9
Gesamtsumme		155.058,8

6.3 Fazit des Szenarios

Mit dem Szenario 3 mit dem Zieljahr 2045 kann der Endenergiebedarf der stadteigenen Gebäude von 54.169 MWh/a im Jahr 2021 auf 22.551 MWh/a im Jahr 2045 gesenkt werden. Das ist eine Reduzierung der Endenergie um 58,4 % innerhalb von 24 Jahren. Die PV-Anlagen zur Klimaneutralstellung erzeugen 26.881 MWh/a Strom im Jahr 2045. Somit ergeben sich in der Jahresbilanz -4.329 MWh/a Endenergie im Jahr 2045. Das Portfolio der städtischen Gebäude von Oldenburg weist dann einen Endenergieüberschuss in der Jahresbilanz auf.

Die jährlichen Treibhausgasemissionen werden von 13.048 t auf 2.446 t durch die reine Sanierung vermindert, also um beträchtliche 81,3 %. Dazu tragen die sich innerhalb der 25 betrachteten Jahre verringernden CO₂-Äquivalente für den Strom, der Umstieg von Erdgas auf elektrisch betriebene Wärmepumpen sowie natürlich auch die Gebäudesanierungen bei. Um die verbleibenden Treibhausgasemissionen auszugleichen und damit den Betrieb der städtischen Gebäude inklusive Nutzerstrom klimaneutral zu stellen, werden Photovoltaikanlagen mit einer Nennleistung von 32.219 kW_p benötigt, die einer Modulfläche von 157.411 m² entsprechen. Damit müssen, ermittelt über die geeigneten Dachanteile der gewählten Typgebäude und bereits unter Berücksichtigung von Abständen zum Dachrand und zwischen den PV-Modulen, durchschnittlich

77,8 % der für PV geeigneten Dachflächen belegt werden. Die Treibhausgasemissionen im Jahr 2045 sind damit in der Jahresbilanz Null.

Für die Sanierung der Gesamtheit der stadteigenen Gebäude wird in Szenario 3 von Investitionskosten in den Kostengruppen 300 und 400 sowie den zugehörigen Nebenkosten (KG 700) ab 2022 bis 2035 von jährlich rund 14,7 Millionen Euro brutto ausgegangen. Für die Neubauten kommen in den Jahren 2022 bis 2030 weitere 190.300 Euro/a hinzu. In den Jahren 2036 bis 2045 betragen die Investitions- und Planungskosten für die Sanierungen jährlich 17,1 Millionen Euro. Insgesamt entstehen in den 24 Jahren damit 377,5 Millionen Euro Investitions- und Planungskosten, die mit 39,1 Millionen Euro Kosten für die Investitionen und die Planung der Photovoltaik ergänzt werden müssen. Die Gesamtsumme der ermittelten Investitions- und Planungskosten beträgt somit 416,5 Millionen Euro. Die Energiekosten inklusive der Anrechnung des Photovoltaikstroms sinken von anfänglich 4,3 Millionen Euro/a (2021) auf 2,0 Millionen Euro/a brutto (2045).

Durch den Materialaufwand der Sanierung und der Instandhaltung der sanierten Gebäude sowie der geplanten Neubauten und der Photovoltaik ergeben sich zusätzlich anfallende Treibhausgasemission über den Zeitraum von 2022 bis 2045 von insgesamt 155.059 t.

Dividiert man die Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Instandhaltung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik mit den Treibhausgasemissionseinsparungen durch den verringerten Energiebedarf im Zieljahr gegenüber dem Istzustand (13.048 t/a), so erhält man eine vereinfachte Ermittlung der Treibhausgas-Amortisationszeit der Materialaufwände. Das Ergebnis für Szenario 3 beträgt 11,9 Jahre und zeigt, dass die Mehraufwände für die Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik deutlich vor Ende der Lebensdauer der einzelnen Komponenten ausgeglichen werden können. Es besteht also keine Gefahr, dass höhere Treibhausgasemissionen durch die sogenannte graue Energie entstehen als über die Energieeinsparungen rückerwirtschaftet werden können. Dabei werden vereinfacht weder die leicht unterschiedlichen Treibhausgasemissionen in den unterschiedlichen Jahren im Betrieb noch aufgrund der fehlenden Datenlage der Einfluss der sich ändernden CO₂-Äquivalente auf die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik berücksichtigt. Würden alle Treibhausgasaufwände und -einsparungen im Jahr 2022 anfallen, d. h. theoretisch alle Sanierungen und Neubauten sowie die Photovoltaik im Jahr 2022 umgesetzt werden, so ergäbe sich eine etwas geringere Amortisationszeit von 10,3 Jahren.

7 Vergleich der Szenarien

In diesem Kapitel werden die drei Szenarien untereinander verglichen. Dabei werden sowohl die Endenergien und die Treibhausgasemissionen in der Betriebsphase als auch die resultierenden Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Instandhaltung der Baukonstruktionen und Anlagentechnik und die Investitionskosten und Energiekosten für die Gesamtheit der Gebäude einander gegenübergestellt. Tabelle 57 hebt zum besseren Verständnis die wichtigsten Merkmale der drei Szenarien noch einmal hervor. Weitere Informationen zu den Randbedingungen sind den Kapiteln der Szenarien zu entnehmen.

Tabelle 57:
Vergleich von unterschiedlichen Einflussgrößen in den drei Szenarien.

Merkmal	Szenario 1 Zieljahr 2030	Szenario 2 Zieljahr 2035	Szenario 3 Zieljahr 2045
Jährliche Sanierungsrate	11,11 %/a	7,14 %/a	4,17 %/a
Anzahl zu sanierender Gebäude pro Jahr	31,3	20,1	12,6
Anzahl insgesamt zu sanierender Gebäude	282	282	303
Energetisches Niveau der „normalen“ Sanierungen und Neubauten	EG 40 EE-Standard gemäß Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) [7]		
Energetisches Niveau der Sanierungen bei denkmalgeschützten Gebäuden	Dach: U-Wert 0,20 W/m ² K oberste Geschossdecke: U-Wert 0,14 W/m ² K Fenster: U-Wert 1,1 W/m ² K Kellerdecke: U-Wert 0,23 W/m ² K Bodenplatte: U-Wert 0,37 W/m ² K Etwas geringere Anforderungen an Wärmebrücken und Luftdichtheit als bei den normalen Sanierungen (U-Werte in Absprache mit der Stadt Oldenburg)		
Anlagentechnik	Heizenergieerzeuger: 90 % Außenluft-Wasser-Wärmepumpe 10 % Erdreich-Wasser-Wärmepumpe Sanierung: Ersatz der Bestandheizkörper durch neue Heizkörper, aber Weiternutzung der Heizungsverteilung Lüftungsanlagen, Trinkwarmwasserbereitung, Kühlung von einzelnen Räumen und Gebäudeautomatisierung entsprechend den Angaben der Stadt Oldenburg Umrüstung auf LED durch neue LED-Leuchten PV-Anlagen in einer Größe, die die verbleibenden Treibhausgasemissionen im Zieljahr ausgleicht		
Verwendete CO ₂ -Äquivalente	Erdgas, Biomasse: CO ₂ -Äquivalente aus der DIN V 18599-1:2018 [6] Strom: zeitlich veränderbare CO ₂ -Äquivalente gemäß IINAS [9], PV-Strom als negativer Kennwert der CO ₂ -Äquivalente des Stroms		

7.1 Betriebsphase

7.1.1 Endenergiebedarf

Für die Betriebsphase werden in einem ersten Schritt die verbleibenden Endenergiebedarfe des gesamten stadteigenen Gebäudebestands in den Jahren 2030, 2035 und 2045 gemäß der drei Szenarien miteinander und mit dem Ist-Zustand im Jahr 2021 verglichen, der Verlauf der Endenergiebedarfe über die Jahre 2021 bis 2045 aufgezeigt und danach die kumulierten Endenergieeinsparungen über die drei Betrachtungsdauern einander gegenübergestellt, siehe Tabelle 58 und Tabelle 59 und Bild 24 bis Bild 27.

Tabelle 58:

Vergleich des verbleibenden Endenergiebedarfs in den Jahren 2021, 2030, 2035 und 2045 für den Betrieb des gesamten stadteigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien.

	Endenergiebedarf [MWh/a]									
	im Jahr 2021	im Jahr 2030			im Jahr 2035			im Jahr 2045		
	Ist-Zustand	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erdgas	43.388	4.791	18.576	28.847	4.791	4.791	20.768	4.791	4.791	3.102
Biomasse	717	357	486	564	357	357	479	357	357	0
Strombedarf	10.065	19.391	16.339	14.010	19.391	19.391	15.836	19.391	19.391	19.449
PV-Strom Erzeugung	0	-23.316	-15.704	-10.080	-23.316	-24.428	-15.681	-23.316	-24.428	-26.881
Summe	54.169	1.224	19.697	33.340	1.224	112	21.402	1.224	112	-4.329

Der Endenergiebedarf für die gesamten stadteigenen Gebäude im Jahr 2030 beträgt

- gemäß Szenario 1 noch 1.224 MWh/a (2,3 % des Endenergiebedarfs im Startjahr 2021),
- gemäß Szenario 2 noch 19.697 MWh/a (36,4 %) und
- gemäß Szenario 3 noch 33.340 MWh/a (61,5 %).

Im Jahr 2035 beträgt der Endenergiebedarf

- gemäß Szenario 1 ebenfalls noch 1.224 MWh/a (2,3 % des Endenergiebedarfs im Startjahr 2021),
- gemäß Szenario 2 noch 112 MWh/a (0,2 %) und
- gemäß Szenario 3 noch 21.402 MWh/a (39,5 %).

Im Jahr 2045 beträgt der Endenergiebedarf

- gemäß Szenario 1 immer noch 1.224 MWh/a (2,3 % des Endenergiebedarfs im Startjahr 2021),
- gemäß Szenario 2 ebenfalls noch 112 MWh/a (0,2 %) und
- gemäß Szenario 3 jetzt -4.329 MWh/a (-8,0 %). Damit werden im Szenario 3 zwischen 2021 und 2045 insgesamt 58.499 MWh/a eingespart und eine negative Endenergiebilanz erreicht.

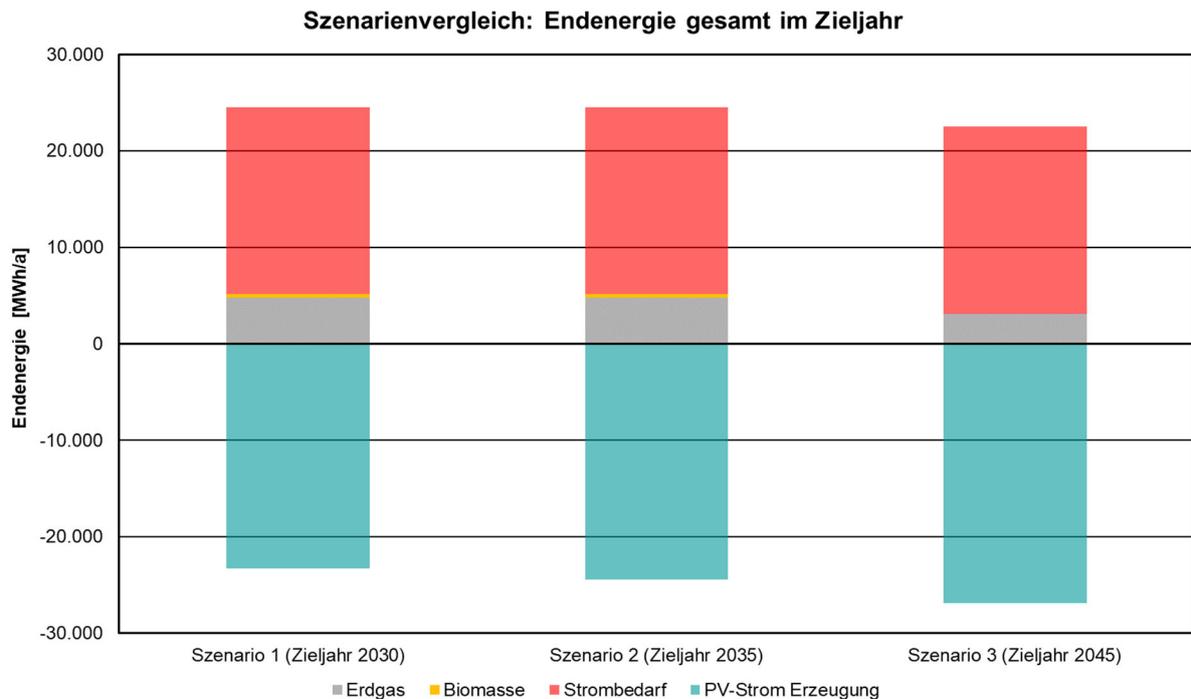


Bild 24:

Vergleich des verbleibenden Endenergiebedarfs für den Betrieb des gesamten stadteigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien im jeweiligen Zieljahr. In der Summe betragen die Endenergiebedarfe für Szenario 1 (Zieljahr 2030) 1.224 MWh/a, für Szenario 2 (Zieljahr 2035) 112 MWh/a und für Szenario 3 (Zieljahr 2045) -4.329 MWh/a.

Bild 25 zeigt die Höhe des verbleibenden Endenergiebedarfs der drei Szenarien in den drei Zieljahren 2030, 2035 und 2045. Bild 25 stellt den Verlauf des Endenergiebedarfs über die Jahre 2021 bis 2045 dar. Das Diagramm verdeutlicht, dass die Endenergiebedarfe in Szenario 1 am schnellsten abgesenkt werden, gefolgt von Szenario 2. Den geringsten Endenergiebedarf im Jahr 2045 weist Szenario 3 auf.

Der Endenergiebedarf in Szenario 2 ist nur aufgrund der leicht größeren (für die Klimaneutralität im Jahr 2035 benötigten) Photovoltaikfläche geringer als der in Szenario 1 für die Jahre ab 2035. Grundsätzlich ist jedoch eine schnellere Sanierung (Szenario 1 gegenüber Szenario 2) zu bevorzugen, da dann über die Jahre aufkumuliert mehr Energie eingespart wird.

Aufgrund der sich über die Jahre verändernden CO₂-Äquivalente für den Netzstrom und den eingespeisten Photovoltaikstrom ergibt sich trotz Klimaneutralität in allen jeweiligen Zieljahren der Szenarien nur für Szenario 3 im Zieljahr 2045 ein negativer Gesamtenergiebedarf.

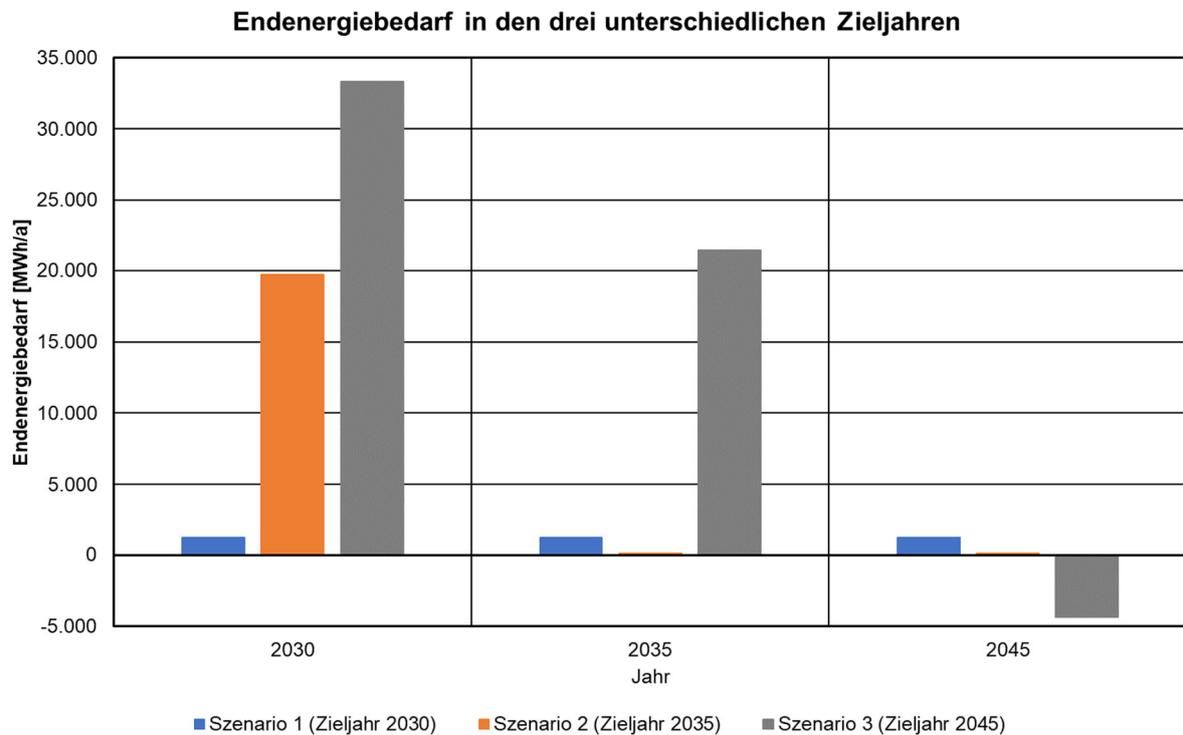


Bild 25:
Vergleich des verbleibenden Endenergiebedarfs für den Betrieb des gesamten städteigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien in den drei Zieljahren.

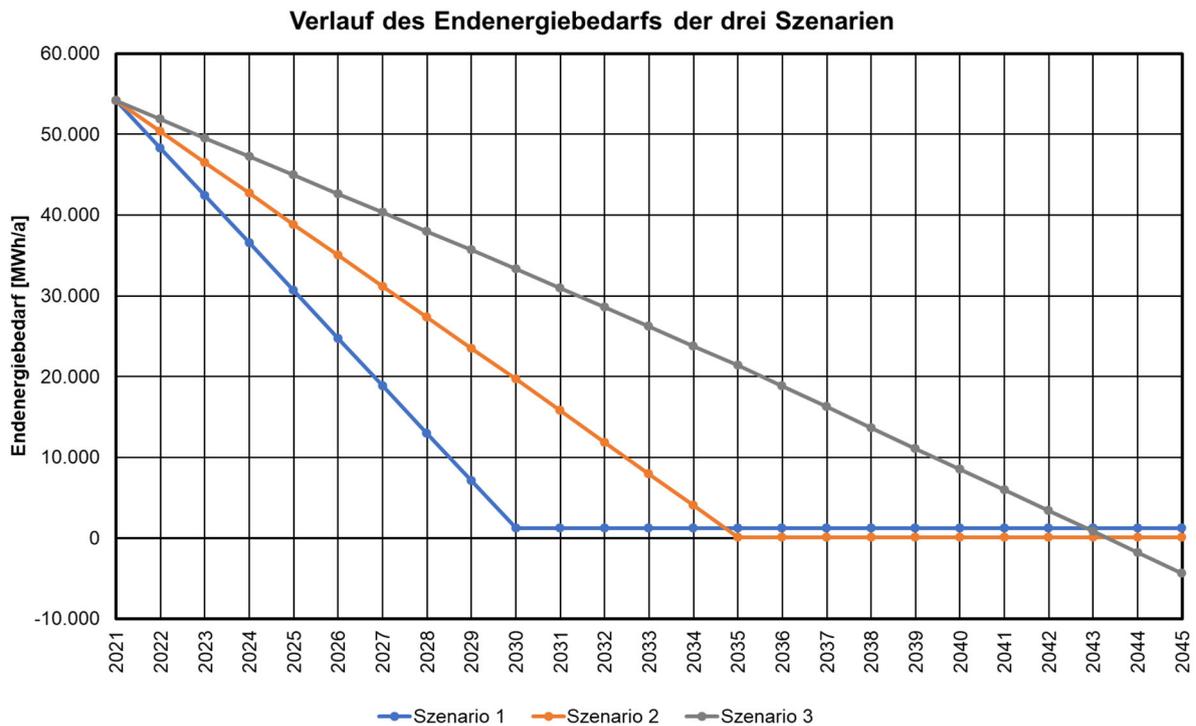


Bild 26:
Verlauf des Endenergiebedarfs der drei Szenarien über die Jahre 2021 bis 2045.

Tabelle 59 und Bild 27 enthalten die kumulierten Endenergieeinsparungen zu den drei Zieljahren. Dabei ist zu sehen, dass Szenario 1 aufgrund der schnellsten Umsetzung der Sanierungen und auch der PV-Anlagen die höchsten Endenergieeinsparungen zu allen drei Betrachtungsjahren aufweist. Bis zum Jahr 2045 weist Szenario 1 z. B. 49 % mehr kumulierte Endenergieeinsparungen auf als Szenario 3. Szenario 2 weist bis 2045 32 % mehr Endenergieeinsparungen auf.

Tabelle 59:
Kumulierte Endenergieeinsparungen für den Betrieb in den Jahren 2030, 2035 und 2045 im Betrieb des gesamten stadteigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien.

	Kumulierte Endenergieeinsparung [MWh]		
	im Jahr 2030	im Jahr 2035	im Jahr 2045
Szenario 1	264.727	529.454	1.058.907
Szenario 2	172.361	403.477	944.051
Szenario 3	103.972	243.845	713.041

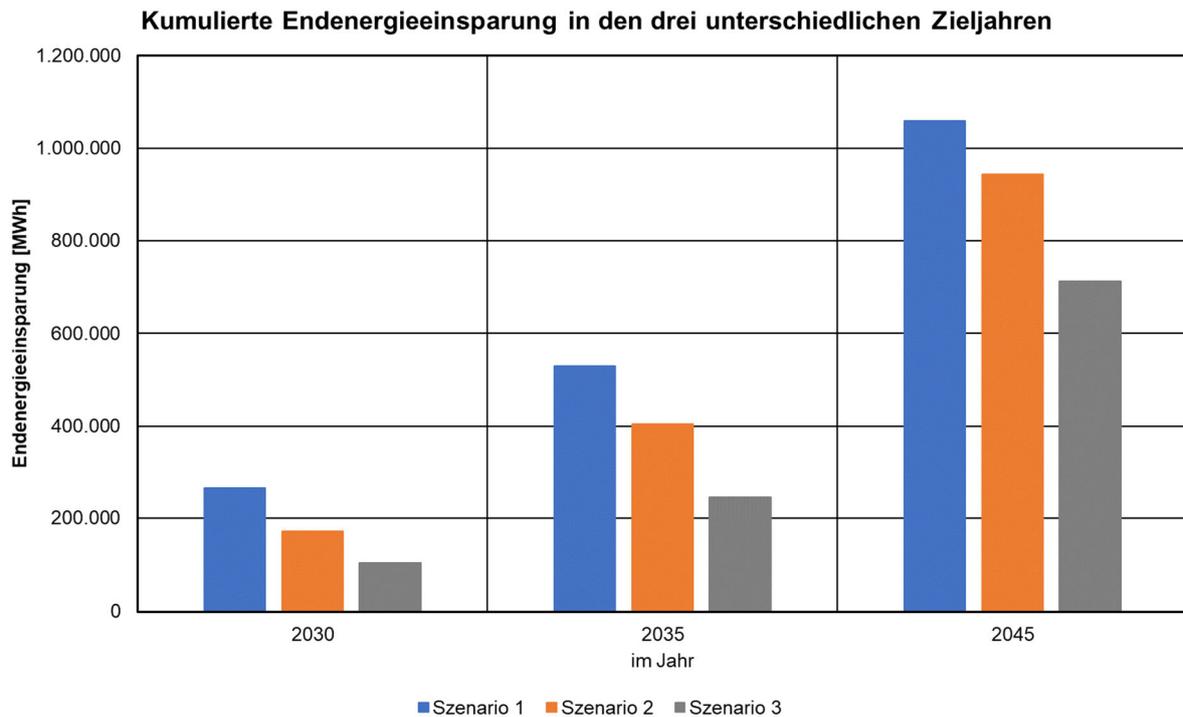


Bild 27:
Kumulierte Endenergieeinsparung für die drei Szenarien in den Jahren 2030, 2035 und 2045.

7.1.2 Treibhausgasemissionen

Auch die Treibhausgasemissionen des gesamten städteigenen Gebäudebestands werden in den Jahren 2030, 2035 und 2045 gemäß der drei Szenarien miteinander und mit dem Ist-Zustand im Jahr 2021 verglichen, der Verlauf der Treibhausgasemissionen über die Jahre 2021 bis 2045 aufgezeigt und danach die kumulierten Treibhausgaseinsparungen über die drei Betrachtungsdauern einander gegenübergestellt, siehe Tabelle 58 und Tabelle 59 und Bild 24 bis Bild 27.

Tabelle 60:
Vergleich der Treibhausgasemissionen in den Jahren 2021, 2030, 2035 und 2045 aus dem Betrieb des gesamten städteigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien.

	Treibhausgasemissionen [t/a]									
	im Jahr 2021	im Jahr 2030			im Jahr 2035			im Jahr 2045		
	Ist-Zustand	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erdgas	9.459	1.044	4.050	6.289	1.044	1.044	4.528	1.044	1.044	676
Biomasse	27	13	18	21	13	13	18	13	13	0
Netzstrom	3.563	5.226	4.403	3.758	4.072	4.072	3.326	1.765	1.765	1.770
PV-Strom Erzeugung	0	-6.284	-4.232	-2.695	-4.896	-5.130	-3.293	-2.122	-2.223	-2.446
Summe	13.048	0	4.239	7.372	234	0	4.578	701	599	0

Die Treibhausgasemissionen für die gesamten städteigenen Gebäude im Jahr 2030 betragen

- gemäß Szenario 1 Null (Zieljahr des Szenarios),
- gemäß Szenario 2 noch 4.239 t/a (32,5 % der Treibhausgasemissionen im Startjahr 2021) und
- gemäß Szenario 3 noch 7.372 t/a (56,5 %).

Im Jahr 2035 betragen die Treibhausgasemissionen

- gemäß Szenario 1 wieder 234 t/a (1,8 % Treibhausgasemissionen im Startjahr 2021),
- gemäß Szenario 2 Null (Zieljahr des Szenarios) und
- gemäß Szenario 3 noch 4.578 t/a (35,1 % der Treibhausgasemissionen im Startjahr 2021).

Im Jahr 2045 betragen die Treibhausgasemissionen

- gemäß Szenario 1 wieder 701 t/a (5,4 % der Treibhausgasemissionen im Startjahr 2021),
- gemäß Szenario 2 wieder 599 t/a (4,6 %) und
- gemäß Szenario 3 Null (Zieljahr des Szenarios).

Da sich die CO₂-Äquivalente des Netzstroms und damit auch der PV-Stromeinspeisung über die Jahre verringern, jedoch die CO₂-Äquivalente von Erdgas und Biomasse konstant bleibt, weisen die zu ihren Zieljahren jeweils klimaneutralen

Szenarien 1 und 2 in den darauffolgenden Jahren wieder kleinere Mengen an Treibhausgasemissionen auf. Dem könnte durch weitere PV-Flächen entgegen- gewirkt werden.

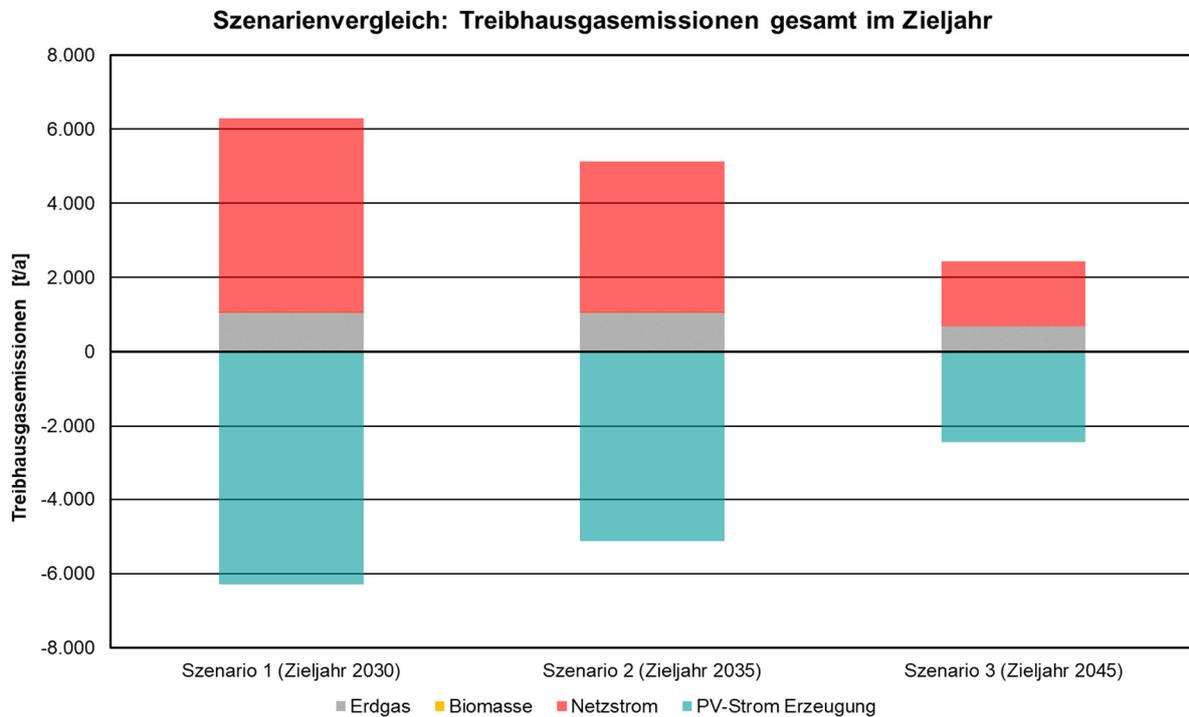


Bild 28: Vergleich der Treibhausgasemissionen für den Betrieb des gesamten stadt-eigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien im jeweiligen Zieljahr. Durch die Bilanzierung des generierten PV-Stroms ist der Betrieb der stadt-eigenen Gebäude in allen drei Szenarien im Zieljahr entsprechend der Zielvorgabe klima-neutral.

Bild 29 zeigt die Höhe der Treibhausgasemissionen der drei Szenarien in den drei Zieljahren 2030, 2035 und 2045. Bild 30 stellt den Verlauf der Treibhausgasemissionen über die Jahre 2021 bis 2045 dar. Das Diagramm verdeutlicht, dass die Treibhausgasemissionen in Szenario 1 am schnellsten abgesenkt werden, gefolgt von Szenario 2. Die geringsten Treibhausgasemissionen im Jahr 2045 weist Szenario 3 auf (null Tonnen entsprechend der Zielvorgabe).

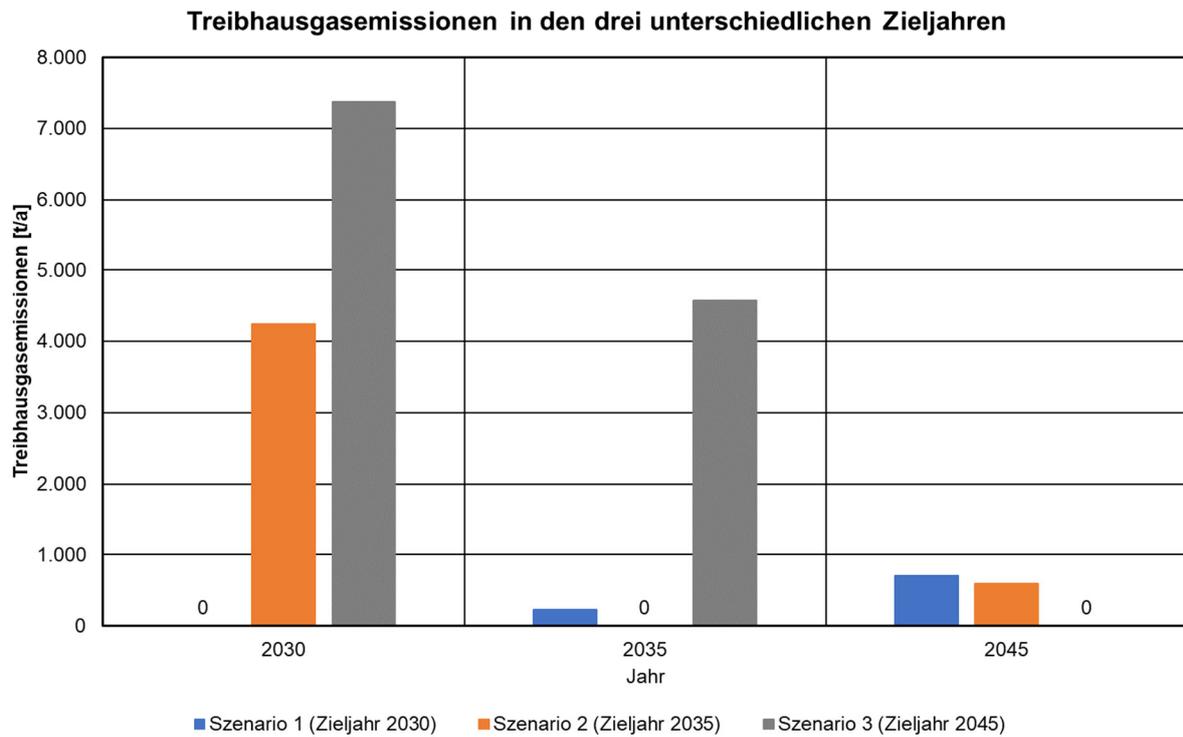


Bild 29:
 Vergleich der Treibhausgasemissionen für den Betrieb des gesamten stadteigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien in den drei Zieljahren.

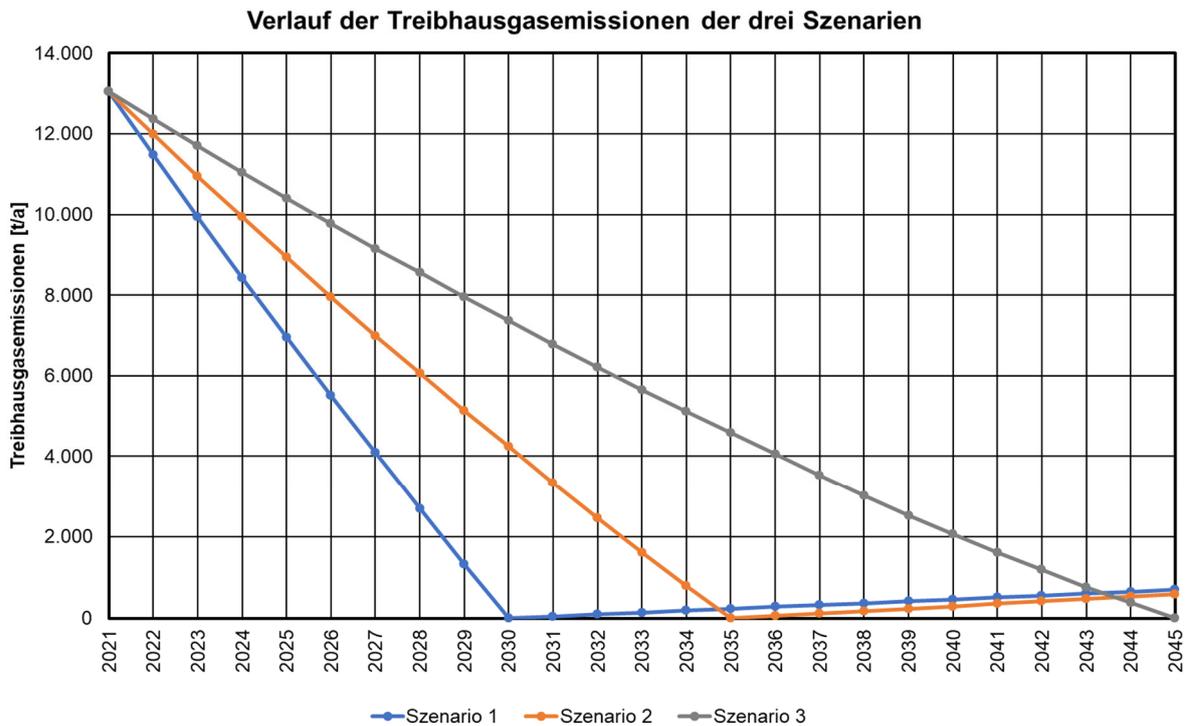


Bild 30:
Verlauf der Treibhausgasemissionen der drei Szenarien über die Jahre 2021 bis 2045.

Tabelle 59 und Bild 31 enthalten die kumulierten Treibhausgaseinsparungen zu den drei Zieljahren. Dabei ist zu sehen, dass Szenario 1 aufgrund der schnellsten Umsetzung der Sanierungen und auch der PV-Anlagen die höchsten Treibhausgaseinsparungen zu allen drei Betrachtungsjahren aufweist.

Tabelle 61:
Kumulierte Treibhausgaseinsparungen für den Betrieb in den Jahren 2030, 2035 und 2045 im Betrieb des gesamten städteigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien.

	Kumulierte Treibhausgaseinsparung [t]		
	im Jahr 2030	im Jahr 2035	im Jahr 2045
Szenario 1	66.998	131.541	257.126
Szenario 2	45.234	102.268	229.463
Szenario 3	29.089	65.996	177.330

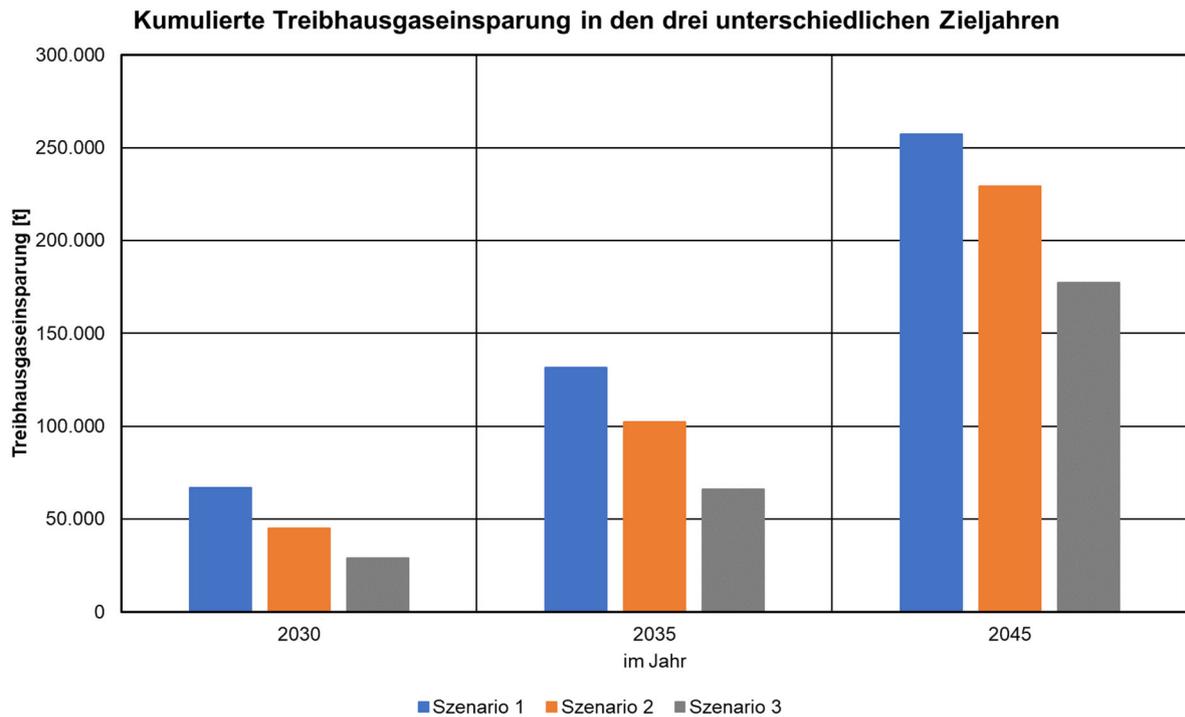


Bild 31:
Kumulierte Treibhausgaseinsparung für die drei Szenarien in den Jahren 2030, 2035 und 2045.

Setzt man die kumulierten Treibhausgaseinsparungen zu den unterschiedlichen Zeitpunkten zueinander ins Verhältnis (bezogen auf das Szenario 3), so erhält man:

- im Jahr 2030:
 - für Szenario 1 eine 2,30-fache Treibhausgaseinsparung gegenüber Szenario 3.
 - für Szenario 2 eine 1,56-fache Treibhausgaseinsparung gegenüber Szenario 3.
- im Jahr 2035:
 - für Szenario 1 eine 1,99-fache Treibhausgaseinsparung gegenüber Szenario 3.
 - für Szenario 2 eine 1,55-fache Treibhausgaseinsparung gegenüber Szenario 3.

- im Jahr 2045:
 - für Szenario 1 eine 1,45-fache Treibhausgaseinsparung gegenüber Szenario 3.
 - für Szenario 2 eine 1,29-fache Treibhausgaseinsparung gegenüber Szenario 3.

7.1.3 Benötigte Photovoltaikanlage für die Klimaneutralität in der Betriebsphase

Da die drei Szenarien zu unterschiedlichen Zieljahren Klimaneutralität in der Betriebsphase erreichen sollen und im Szenario 3 weitere Sanierungen in den Jahren 2036 bis 2045 eingeplant werden, ergeben sich unterschiedlich große Photovoltaikanlagen. Szenario 1 und 2 unterscheiden sich dabei nur durch das unterschiedliche Zieljahr und dadurch leicht unterschiedliche CO₂-Äquivalente für die Energieträger Netzstrom und Photovoltaikstrom. Die entsprechenden Kennwerte der Photovoltaikanlagen sind in Tabelle 62 vergleichend für die drei Szenarien zusammengestellt. Die benötigte Dachfläche berücksichtigt bereits Abstände zwischen den Photovoltaikreihen und zum Dachrand. Bild 32 zeigt den grafischen Vergleich der benötigten PV-Nennleistung der drei Szenarien.

Tabelle 62:
Kennwerte der Photovoltaikanlagen zur Klimaneutralstellung der Betriebsphase in den drei Szenarien.

	Photovoltaikkennwerte		
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Generierte Endenergie durch Photovoltaik [MWh/a]	23.316	24.428	26.881
Nennleistung [kW _p]	27.946	29.278	32.219
Modulfläche [m ²]	136.534	143.045	157.411
Benötigte Dachfläche [m ²]	210.052	220.270	242.171
Belegter Anteil der geeigneten Dachfläche [%]	67,5	70,7	77,8

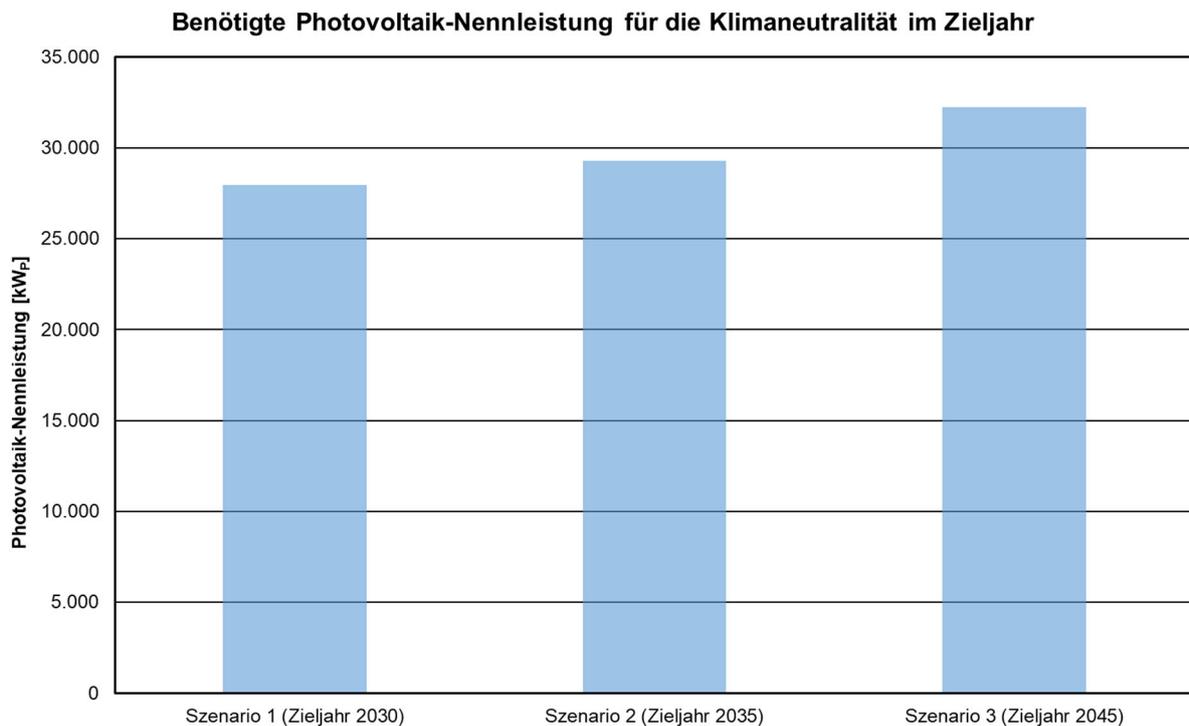


Bild 32:

Benötigte Photovoltaik-Nennleistung für die Klimaneutralität der Betriebsphase in jeweiligen Zieljahr der drei Szenarien.

Damit müssen in Szenario 1 jährlich 3.105 kW_p Photovoltaik zugebaut werden, in Szenario 2 jährlich 2.091 kW_p und in Szenario 3 jährlich 1.342 kW_p.

7.2 Investitionskosten und Energiekosten

7.2.1 Investitions- und Planungskosten

Die für die Umsetzung der Szenarien erforderlichen Investitions- und Planungskosten in den Kostengruppen 300, 400 und 700 sind für die drei betrachteten Szenarien in Tabelle 63 dargestellt, getrennt nach jährlich erforderlichen Investitions- und Planungskosten sowie als Summe bis zum jeweiligen Zieljahr (2030, 2035 bzw. 2045). Für Szenario 2 ergeben sich zwei unterschiedliche Phasen (2022 bis 2030 mit geplanten Neubauten, 2031 bis 2035 ohne bisher geplante Neubauten). Für Szenario 3 ergeben sich drei unterschiedliche Phasen (2022 bis 2030 mit geplanten Neubauten, 2031 bis 2035 ohne geplante Neubauten, 2036 bis 2045 ohne geplante Neubauten aber mit zusätzlichen Sanierungen von Gebäuden mit Baujahr 2011 bis 2017).

Tabelle 63:
Vergleich der jährlich erforderlichen Investitions- und Planungskosten KG 300, KG 400 und KG 700 (brutto) und die Summe der erforderlichen Investitions- und Planungskosten für den gesamten stadteigenen Gebäudebestand für die drei Szenarien (Jahre 2022 bis 2030 bzw. 2035 bzw. 2045).

	Investitions- und Planungskosten (brutto)								
	Jährliche Kosten [T€/a]						Summe der Kosten [T€]		
	Szenario 1 (2022-2030)	Szenario 2 (2022-2030)	Szenario 2 (2031-2035)	Szenario 3 (2022-2030)	Szenario 3 (2031-2035)	Szenario 3 (2036-2045)	Szenario 1 (2022-2030)	Szenario 2 (2022-2035)	Szenario 3 (2022-2045)
Kostengruppe 300	22.739	14.618	14.618	8.526	8.527	9.718	204.649	204.649	216.559
Kostengruppe 400	8.690	5.641	5.512	3.354	3.201	3.922	78.206	78.206	85.411
Kostengruppe 700	7.857	5.065	5.033	2.970	2.932	3.410	70.714	70.714	75.493
Photovoltaik: KG 400	3.052	2.045	2.045	1.302	1.302	1.302	27.470	28.634	31.252
Photovoltaik: KG 700	763	511	511	326	326	326	6.868	7.159	7.813
Summe	43.101	27.880	27.719	16.479	16.288	18.678	387.906	389.361	416.528

Die höchsten jährlichen Investitions- und Planungskosten weist aufgrund der schnellsten Umsetzung das Szenario 1 mit insgesamt 43,1 Millionen Euro auf. Szenario 2 folgt mit 27,7 bis 27,9 Millionen Euro auf Rang zwei. Szenario 3 ist bezogen auf das Jahr gesehen die günstigste Variante mit 16,3 bis 18,7 Millionen Euro.

Die Gesamtsumme der Investitions- und Planungskosten ist durch die weiteren Sanierungen in Szenario 3 mit 416,5 Millionen Euro die höchste, gefolgt von Szenario 2 mit 389,4 Millionen Euro und Szenario 1 mit 387,9 Millionen Euro. Szenario 1 und Szenario 2 unterscheiden sich in der Summe der Kosten nur durch die etwas größere benötigte Photovoltaikfläche zur Klimaneutralität in Szenario 2 (Bei den Investitions- und Planungskosten wurden ebenso wie bei den Energiekosten in Absprache mit der Stadt Oldenburg keine Preissteigerungen angesetzt).

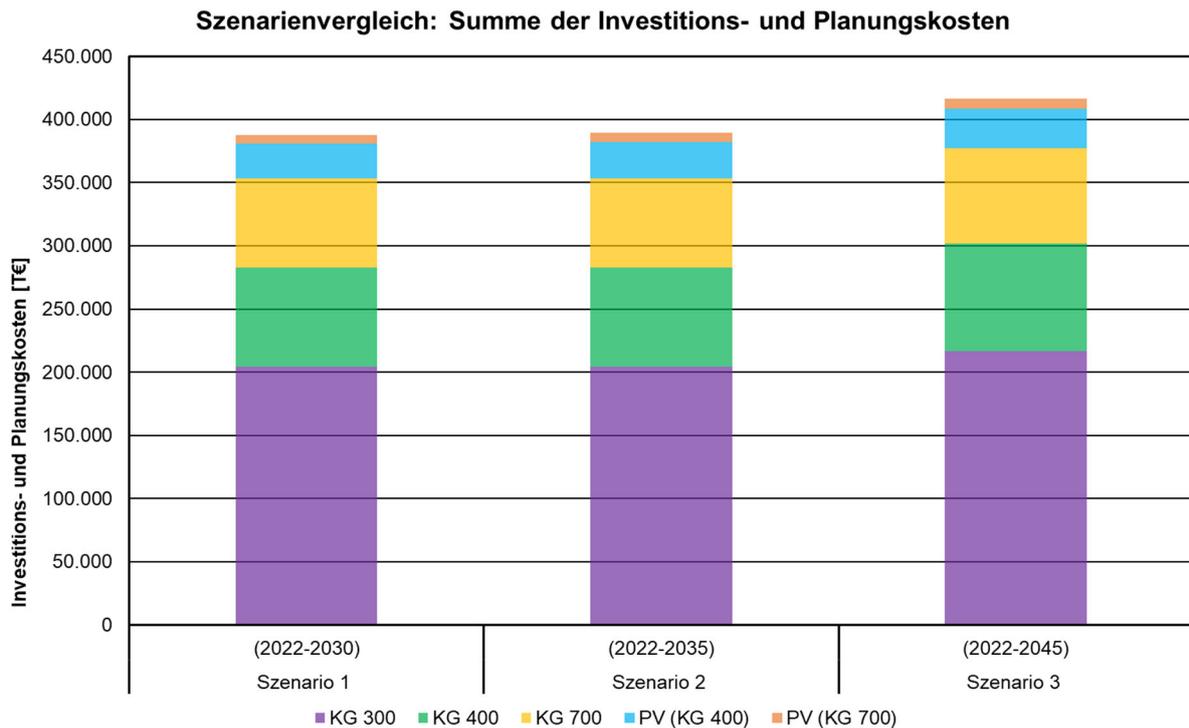


Bild 33:
Vergleich der Summen der Investitions- und Planungskosten für die drei Szenarien.

7.2.2 Energiekosten

Tabelle 64 und Bild 34 stellen die Summen der Energiekosten von 2022 bis 2030, von 2022 bis 2035 und von 2022 bis 2045 für die drei Szenarien einander gegenüber. Szenario 1 weist dabei in allen drei Zieljahren die kostengünstigste Variante bei den Energiekosten auf, weil die Reduzierung der Energiekosten hier am frühesten eintritt. Obwohl Szenario 3 im Zieljahr 2045 aufgrund der zusätzlichen Sanierungen und der größten Photovoltaikanlage die geringsten Endenergiebedarfe aufweist, überschreitet es jeweils die Summe der Energiekosten der anderen Szenarien. (Bei den Energiekosten wurden ebenso wie bei den Investitions- und Planungskosten in Absprache mit der Stadt Oldenburg keine Preissteigerungen angesetzt).

Tabelle 64:
Vergleich der Summe der Energiekosten für den Betrieb des gesamten stadt-eigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien von 2022 bis 2030, von 2022 bis 2035 und von 2022 bis 2045.

	Summe der Energiekosten [T€]								
	von 2022 bis 2030			von 2022 bis 2035			von 2022 bis 2045		
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Erdgas	8.750	11.803	14.078	9.811	14.085	19.394	11.933	16.208	24.290
Biomasse	249	275	290	353	391	425	563	600	540
Netzstrom	21.427	19.659	19.489	36.243	33.306	30.219	65.874	62.937	57.001
PV-Stromeinspeisung	-3.962	-2.296	-1.332	-8.543	-6.282	-3.422	-17.705	-16.031	-11.932
Summe	26.463	29.441	32.525	37.864	41.499	46.615	60.665	63.715	69.899

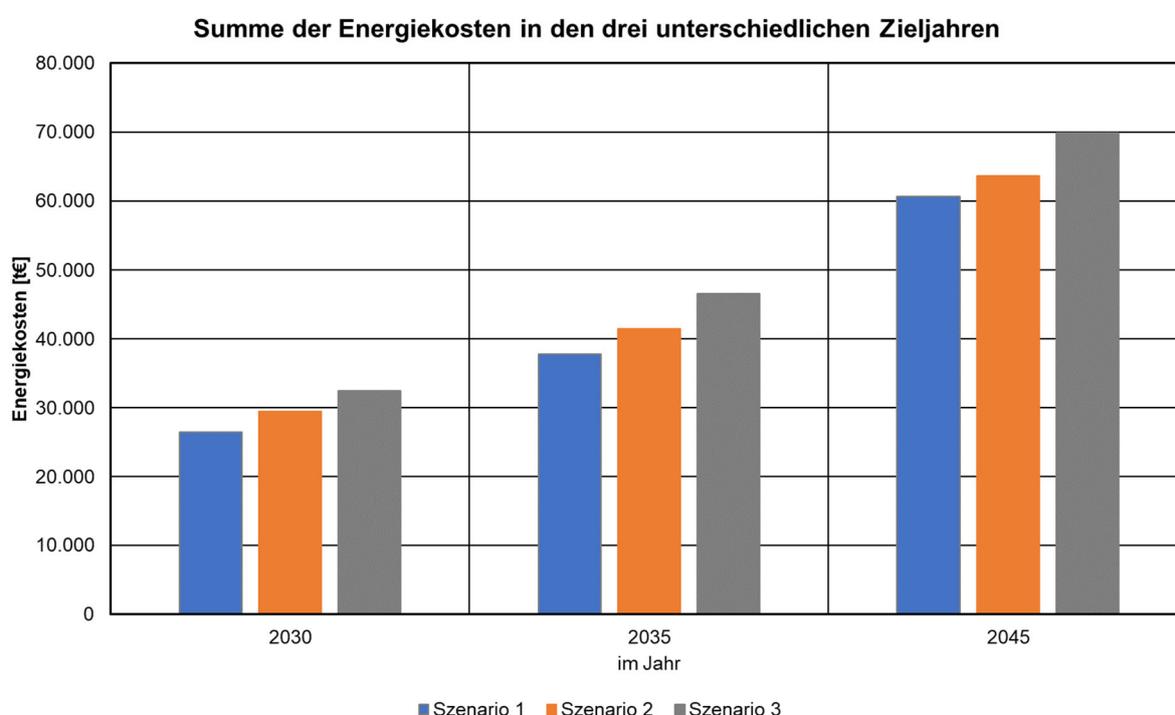


Bild 34:
Vergleich der Summen der Energiekosten für die drei Szenarien von 2022 bis zu den Zieljahren 2030, 2035 und 2045.

7.3 Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Baukonstruktionen und der Anlagentechnik

Für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Baukonstruktion und Anlagentechnik bei Sanierungen und Neubauten werden Materialien benötigt, deren Herstellung Treibhausgasemissionen verursacht. Zur Verdeutlichung dieses Beitrags, welcher oft unter dem Begriff „Graue Energie“ zusammengefasst wird, sind die Treibhausgasemissionen für die verschiedenen Komponenten und Szenarien in Tabelle 65 und Bild 35 dargestellt. Innerhalb der Studie werden

diese Treibhausgasemissionen als Sockelbetrag ermittelt und mitbetrachtet. Sie werden aber im Gegensatz zu den Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der städtischen Gebäude nicht klimaneutral gestellt.

Obwohl die Betrachtungszeiten der drei Szenarien unterschiedlich sind, ist die Summe der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung in der Studie im Zieljahr des jeweiligen Szenarios gleich hoch wie im Jahr 2045, da in den Szenarien 1 (Zieljahr 2030) und 2 (Zieljahr 2035) keine zusätzlichen Materialaufwände zwischen Zieljahr und dem Jahr 2045 anfallen bzw. betrachtet werden. Die Treibhausgasemissionen für die Materialien fallen jeweils von 2022 bis zum Zieljahr an. In den Szenarien 2 und 3 sind die jährlichen Treibhausgasemissionen über den jeweiligen Betrachtungszeitraum nicht konstant aufgrund der unterschiedlichen Neubau- und Sanierungsphasen. Für die Szenarien 2 und 3 enthält Tabelle 65 die über die Betrachtungszeit gemittelten jährlichen Treibhausgasemissionen. Die genauen Werte für die unterschiedlichen Phasen innerhalb der Betrachtungszeiten sind Tabelle 41 und Tabelle 42 bzw. Tabelle 53 bis Tabelle 55 zu entnehmen.

Tabelle 65:

Vergleich der jährlich anfallenden Treibhausgasemissionen aufgrund der Herstellung und Instandhaltung der Baukonstruktion und Anlagentechnik sowie die dadurch über die jeweilige Betrachtungszeit aufsummierten Treibhausgasemissionen für den gesamten städteigenen Gebäudebestand für die drei Szenarien.

Bereich		Jährlich anfallende Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik [t/a]			Summe der Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik (2022 – 2045) [t]		
		Szenario 1	Szenario 2 (Mittelwert über 14 Jahre)	Szenario 3 (Mittelwert über 24 Jahre)	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Energetische Sanierung	Bauteile	7.998,8	5.142,1	3.247,4	71.988,8	71.988,8	77.938,3
	Luft-Wasser-Wärmepumpen	20,0	12,9	8,2	180,3	180,3	196,8
	Sole-Wasser-Wärmepumpen	44,8	28,8	18,2	403,5	403,5	436,6
	Austausch der Heizkörper	448,2	288,1	181,9	4.033,4	4.033,4	4.365,6
	Lüftung mit WRG	2.204,5	1.417,2	906,1	19.840,8	19.840,8	21.747,2
	LED-Beleuchtung	139,6	89,8	58,1	1.256,5	1.256,5	1.393,4
Neubauten		1.357,7	872,8	509,1	12.219,0	12.219,0	12.219,0
Photovoltaik		3.542,8	2.386,2	1.531,7	31.885,2	33.406,2	36.761,9
Summe		15.756,4	10.237,7	6.460,8	141.807,5	143.328,5	155.058,8

Die Summe der Treibhausgasemissionen, die sich aus der Gebäudekonstruktion und der Anlagentechnik durch die Sanierung und den Neubau ergeben, variieren insgesamt nicht stark. Die Unterschiede sind durch die zusätzlichen Sanierungen in Szenario 3 und die unterschiedlich großen Photovoltaikanlagen bedingt.

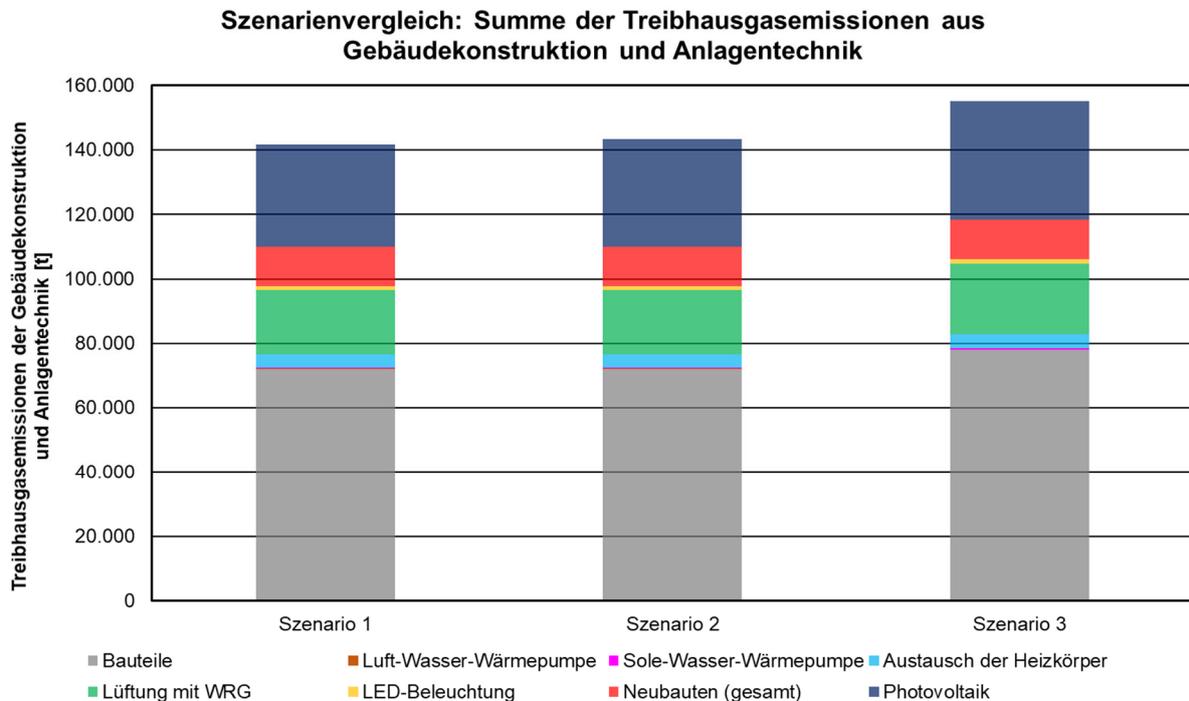


Bild 35: Vergleich der Summe der Treibhausgasemissionen aufgrund der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Baukonstruktion und Anlagentechnik des gesamten städteigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien.

Die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik sind deutlich geringer als die sich durch die Sanierungstätigkeit ergebenden Treibhausgasemissionseinsparungen im Gebäudebetrieb (vgl. Tabelle 61). Vergleicht man hier die kumulierte Treibhausgasemissionseinsparung im Jahr 2045 („Einsparung“) mit den entstehenden Treibhausgasemissionen für die Materialien („Aufwand“), so ergeben sich folgende Verhältnisse, die auch in Bild 36 veranschaulicht werden:

- Szenario 1: Einsparung zu Aufwand: 1,81 : 1
- Szenario 2: Einsparung zu Aufwand: 1,60 : 1
- Szenario 3: Einsparung zu Aufwand: 1,14 : 1

Szenario 3 hat hier nur einen geringen Faktor, weil die Betrachtungszeit genau mit dem Ende der Sanierung zusammenfällt. Die beiden anderen Szenarien können bereits länger von den gesamten Einsparungen profitieren.

Verlängert man die Betrachtungszeit um zehn Jahre (bis 2055) so ergeben sich aufgrund der längeren Einsparungen im Betrieb bei gleichbleibendem Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der eingesetzten Baukonstruktion und Anlagentechnik folgende Faktoren:

- Szenario 1: Einsparung zu Aufwand: 2,67 : 1
- Szenario 2: Einsparung zu Aufwand: 2,45 : 1
- Szenario 3: Einsparung zu Aufwand: 1,96 : 1

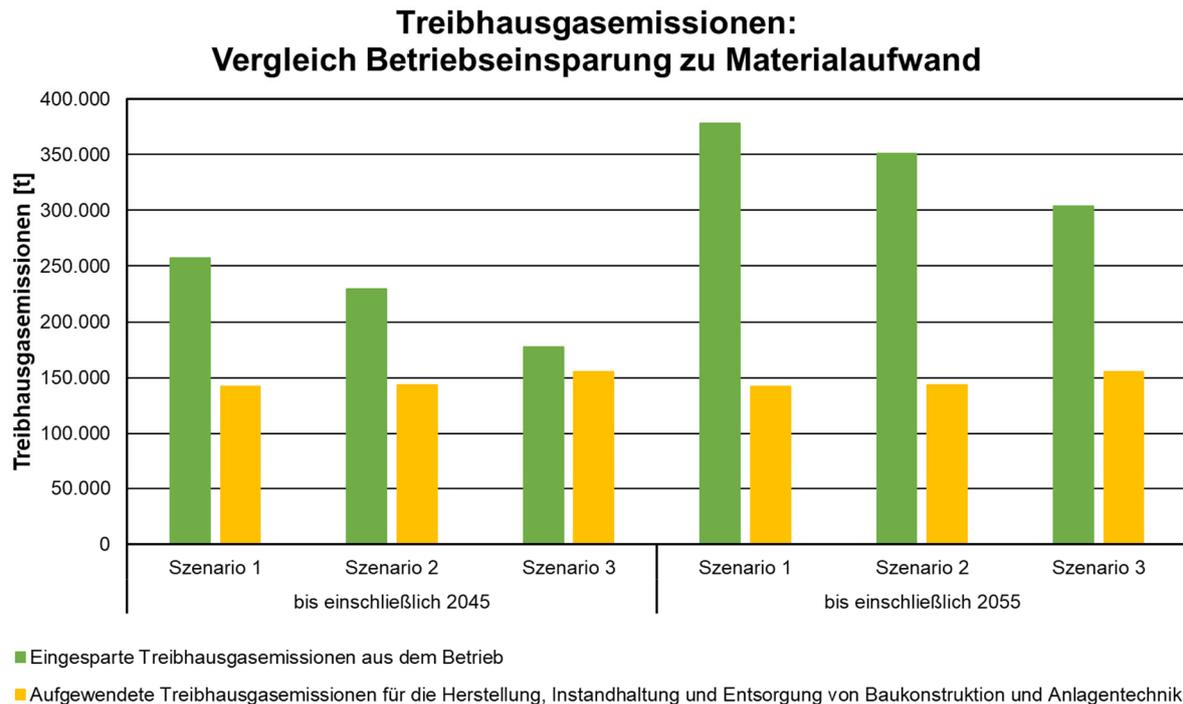


Bild 36:

Vergleich der eingesparten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2045 bzw. bis zum Jahr 2055 mit der Summe der entstandenen Treibhausgasemissionen aufgrund der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung von Baukonstruktion und Anlagentechnik des gesamten städteigenen Gebäudebestands für die drei Szenarien.

Eine alternative Betrachtung ist die Anzahl der Jahre nach Ende der Sanierungen, die es benötigt, die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäudekonstruktion und Anlagentechnik durch Treibhausgaseinsparungen im Gebäudebetrieb auszugleichen. Diese betragen bei

- Szenario 1: 10,9 Jahre
- Szenario 2: 11,0 Jahre

- Szenario 3: 11,9 Jahre

(siehe auch in den einzelnen Szenarienfazits). Das sind deutlich geringere Zeiten als die Lebensdauern der eingesetzten Komponenten.

Bitte beachten: Bei den Treibhausgasemissionseinsparungen im Betrieb wurden sich verringernde CO₂-Äquivalente über die Jahre beim Strom mitbetrachtet. Dies ist aufgrund der verfügbaren Datenlage bei den Kenndaten für die Aufwände zur Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Konstruktionen und Anlagentechnik nicht möglich. Die angegebenen Vergleichswerte bilden daher höhere Werte als in der Realität ab und können daher nur einen ersten Eindruck geben. Auf jeden Fall ist es so, dass im Betrieb mehr Treibhausgasemissionen eingespart werden als durch die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung durch die Sanierungen entstehen.

7.4 Zusammenfassung

Tabelle 66 vergleicht den Endenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen aus dem Gebäudebetrieb sowie die Energiekosten (bei dem abgesprochenen Ansatz von gleichbleibenden Energietarifen) für die Jahre 2021 und die Zieljahre der drei Szenarien. In Tabelle 67 sind die jeweiligen Einsparungen im Zieljahr der Szenarien gegenüber dem Jahr 2021 eingetragen.

- Szenario 1 spart im Jahr 2030 bei der Endenergie 97,7 % und bei den Treibhausgasemissionen 100 % gegenüber dem Jahr 2021 ein. Die Energiekosten reduzieren sich um 46,9 %.
- Szenario 2 spart im Jahr 2035 bei der Endenergie 99,8 % und bei den Treibhausgasemissionen 100 % gegenüber dem Jahr 2021 ein. Die Energiekosten reduzieren sich um 48,3 %.
- Szenario 3 spart im Jahr 2045 bei der Endenergie 108,0 % und bei den Treibhausgasemissionen 100 % gegenüber dem Jahr 2021 ein. Die Energiekosten reduzieren sich um 52,8 %.

Tabelle 66:
Vergleich der Kenngrößen Endenergiebedarf und Treibhausgasemissionen im Gebäudebetrieb und Energiekosten in den Jahren 2021 und den jeweiligen Zieljahren der drei Szenarien.

Kenngröße	Einheit	Jahr 2021	Szenario 1 im Zieljahr 2030	Szenario 2 im Zieljahr 2035	Szenario 3 im Zieljahr 2045
Endenergiebedarf für Gebäudebetrieb	MWh/a	54.169	1.224	112	-4.329
Treibhausgasemissionen aus Gebäudebetrieb	t/a	13.048	0	0	0
Energiekosten	T€/a	4.297,0	2.280,1	2.221,5	2.028,0

Tabelle 67:
Vergleich der Einsparungen beim Endenergiebedarf und bei den Treibhausgasemissionen im Gebäudebetrieb und bei den Energiekosten im jeweiligen Zieljahr gegenüber 2021 für die drei Szenarien.

Kenngröße	Einheit	Einsparungen gegenüber dem Jahr 2021		
		Szenario 1 im Zieljahr 2030	Szenario 2 im Zieljahr 2035	Szenario 3 im Zieljahr 2045
Endenergiebedarf für Gebäudebetrieb	MWh/a	52.945	54.057	58.499
	%	97,7	99,8	108,0
Treibhausgasemissionen aus Gebäudebetrieb	t/a	13.048	13.049	13.048
	%	100,0	100,0	100,0
Energiekosten	T€/a	2.016,9	2.075,5	2.269,1
	%	46,9	48,3	52,8

In Tabelle 68 sind die wichtigsten Kennwerte für die drei Szenarien aufsummiert über den Zeitraum von 24 Jahren (von 2022 bis 2045) zusammengestellt.

Alle kumulierten Einsparungen (Endenergie und Treibhausgasemissionen im Betrieb und Energiekosten) sinken von Szenario 1 über Szenario 2 bis Szenario 3 ab. Hier wirkt sich die zeitlich frühere Fertigstellung der Sanierungen aus. Die Investitionskosten und die Treibhausgasemissionen aus der Baukonstruktion und der Anlagentechnik steigen leicht von Szenario 1 bis Szenario 3. Dies ist auf die zunehmende PV-Fläche und bei Szenario 3 auch auf die zusätzlichen Sanierungen zurückzuführen. Vergleicht man die kumulierten Treibhausgaseinsparungen aus dem Gebäudebetrieb mit den kumulierten Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Instandhaltung der Baustoffe (Baukonstruktion und Anlagentechnik), so sieht man, dass die Einsparung durch den Betrieb den Aufwand für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Baustoffe in allen drei Szenarien übertrifft. Dabei ist bei der Treibhausgasbilanz der Baustoffe noch nicht berücksichtigt, dass sich auch hier die CO₂-Äquivalente im Laufe der kommenden Jahre aufgrund Änderungen bei der Stromerzeugung für die Produktion, etc. reduzieren werden. Zusätzlich werden die Treibhausgasemissions-einsparungen im Betrieb auch weiterhin während der Lebenszeit der Gebäude

anfallen, wohingegen die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung und Instandhaltung der Baustoffe für diese Studie jeweils komplett im Jahr der Sanierung bzw. des Ersatzneubaus angerechnet werden. Damit sieht diese Bilanz in späteren Jahren noch positiver aus.

Tabelle 68:

Vergleich der wichtigsten Kenngrößen der drei Szenarien für den Zeitraum von 24 Jahren (2022 bis 2045) für die Gesamtheit der stadteigenen Gebäude.

Kenngröße	Einheit	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Kumulierte Endenergieeinsparung im Gebäudebetrieb über 24 Jahre (2022 – 2045)	MWh	1.058.907	944.051	713.041
Kumulierte Treibhausgasemissionseinsparung aus Gebäudebetrieb über 24 Jahre (2022 – 2045) ¹	t	257.126	229.463	177.330
Summe der Investitionskosten und Planungskosten über 24 Jahre (2022 – 2045) ²	T€	387.906	389.361	416.528
Energiekosteneinsparung über 24 Jahre (2022 – 2045)	T€	42.463	39.413	33.229
Summe der Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Baukonstruktion und Anlagentechnik über 24 Jahre (2022 – 2045) ^{1, 2}	t	141.808	143.329	155.059

¹ Während die Treibhausgaseinsparungen aus dem Gebäudebetrieb über das Jahr 2045 hinaus (in der weiteren Betriebsphase) weiterhin anwachsen, sind die Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Baukonstruktion und Anlagentechnik komplett (bereits für den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes) enthalten.

² Die Investitions- und Planungskosten und die Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Baukonstruktion und Anlagentechnik fallen jeweils in den Jahren der Sanierung bzw. der Neubauten je Szenario an; damit für Szenario 1 von 2022 bis 2030, für Szenario 2 von 2022 bis 2035 und für Szenario 3 von 2022 bis 2045. Sie erhöhen sich aber für die Szenarien 1 und 2 bis zum Jahr 2045 nicht mehr.

8 Gesamtfazit

Auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Daten zu den Energieverbräuchen, Grundflächen und Nutzungen der stadteigenen Gebäude und Liegenschaften der Stadt Oldenburg wurden die Gebäude aufgrund ihrer Nutzung sechs unterschiedlichen Clustern und einem Restcluster zugeordnet und danach für die Cluster jeweils repräsentative reale Typgebäude ausgewählt. Anhand dieser Typgebäude wurden drei Entwicklungsszenarien für die Sanierung der Gebäude auf einen klimaneutralen Gebäudebestand zu jeweils unterschiedlichen Zieljahren – und damit unterschiedlichen Sanierungsraten – mithilfe von DIN V 18599-Berechnungen energetisch bewertet und auf den gesamten Gebäudebestand für die Jahre 2021 bis zum jeweiligen Zieljahr und jeweils auch bis zum Jahr 2045 hochgerechnet. Auch für bereits geplante Neubauten wurden die Energiebedarfe ermittelt. Mittels mit der Stadt Oldenburg abgestimmten CO₂-Äquivalenten wurden daraus die Treibhausgasemissionen für den Gebäudebetrieb ermittelt.

Zusätzlich wurden die für die Szenarien benötigten energiebedingten Investitions- und Planungskosten, die resultierenden Energiekosten und die Treibhausgasemissionen für die Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der eingesetzten Baumaterialien und technischen Anlagen bestimmt. Die Klimaneutralität wird in der Studie für den Betrieb der städtischen Gebäude angestrebt, die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung werden zwar als Sockelbetrag mit ausgewiesen, aber nicht durch erzeugte Energien aus erneuerbaren Quellen (Photovoltaikstrom) ausgeglichen. Ein Ausgleich über Zertifikate wird nicht einberechnet.

Die Sanierungstiefe und die energetische Neubauqualität wurden basierend auf einer Vorstudie mit dem EG 40 EE-Standard gemäß Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) festgelegt. Beim EG 40 EE-Niveau muss der Primärenergiebedarf des Referenzgebäudes gemäß Gebäudeenergiegesetz (GEG) um 60 % unterschritten werden. Die Bezeichnung „EE“ und damit auch eine erhöhte Förderquote erhält ein Gebäude, wenn mehr als 55 % der Wärme- und Kälteversorgung eines Gebäudes auf erneuerbaren Energien basiert. Die geplanten Gebäudequalitäten in der Sanierung und im Neubau sind in allen drei Szenarien gleich.

Im **Szenario 1 mit dem Zieljahr 2030** für die Klimaneutralität ergibt sich eine Sanierungsfrequenz von 11,11 % der Gebäude pro Jahr (und damit 31,3 Gebäude pro Jahr) die gleichmäßig über die neun Betrachtungsjahre 2022 bis 2030 umgesetzt wird. Die Neubauten entstehen ebenfalls gleichmäßig verteilt über die neun Betrachtungsjahre.

Im **Szenario 2 mit dem Zieljahr 2035** für die Klimaneutralität wird die Sanierungsfrequenz auf 7,14 %/a reduziert (und damit 20,1 Gebäude pro Jahr). Die Neubauten werden weiterhin für die Jahre 2022 bis 2030 geplant.

Im **Szenario 3 mit dem Zieljahr 2045** für die Klimaneutralität wird die Sanierungsfrequenz auf im Mittel 4,17 %/a reduziert (und damit 12,6 Gebäude pro Jahr). In den Jahren 2036 bis 2045 erfolgt zusätzlich eine Sanierung von städtischen Gebäuden mit den Baujahren von 2011 bis 2017. Die Neubauten werden auch hier in den Jahren 2022 bis 2030 geplant.

Mit einer hohen Anzahl an jährlich zu sanierenden Gebäuden ergeben sich neben hohen Investitions- und Planungskosten auch noch weitere Herausforderungen. So müssen sowohl innerhalb der Stadt Oldenburg neue Personalstellen geschaffen werden, um die Sanierungsprojekte zu bearbeiten, als auch genügend Planer und Handwerker in Oldenburg und Umgebung zur Verfügung stehen, um die zahlreichen Projekte zu realisieren. Betrachtet man nur die stadteigenen Liegenschaften alleine, erscheint die Anzahl Gebäude in Bezug auf die Handwerker noch nicht sehr hoch. Die städtischen Projekte werden aber mit weiteren privaten Sanierungsmaßnahmen im Wohn- und Nichtwohngebäudebereich um Planer und vor allem Handwerker bei ohnehin schon reger Bautätigkeit in der Region Oldenburg konkurrieren müssen. Die Aufgabe Klimaschutz wird mit großer Sicherheit in den nächsten Jahren drängender und die Forderungen und Förderungen der Stadt, des Bundeslands und des Bundes werden hier weitere starke Anreize und hohe Bedarfe schaffen. Studien zeigen auf, dass zusätzliche Erwerbstätige im Handwerksberuf dringend benötigt werden, so geht z. B. [27] bei einer Verdoppelung der Sanierungsrate von einem bundesweiten Mangel von mindestens 100.000 Fachkräften in den relevanten Gewerken aus.

Die ermittelten energiebedingten (statisch berechneten) Investitions- und Planungskosten betragen

- im Szenario 1: 43,1 Millionen Euro pro Jahr (für die Jahre 2022 bis 2030),
- im Szenario 2: 27,9 Millionen Euro pro Jahr (für die Jahre 2022 bis 2030) und 27,7 Millionen Euro pro Jahr (für die Jahre 2031 bis 2035),
- im Szenario 3: 16,5 Millionen Euro pro Jahr (für die Jahre 2022 bis 2030), 16,3 Millionen Euro pro Jahr (für die Jahre 2031 bis 2035) und 18,7 Millionen Euro pro Jahr (für die Jahre 2036 bis 2045).

Damit reduzieren sich die jährlichen Investitions- und Planungskosten aus Szenario 1 im Szenario 2 auf ca. 64 % und im Szenario 3 auf ca. 40 %. Die gesamten Investitions- und Planungskosten unterscheiden sich mit 387,9 Millionen Euro (Szenario 1) bis 416,5 Millionen Euro (Szenario 3) nur gering aufgrund der etwas größeren PV-Anlagen in den Szenarien 2 und 3 und um die zusätzlichen Sanierungen in Szenario 3.

Die Energiekosten im Zieljahr können im Vergleich zur Ausgangssituation von 4,3 Millionen Euro pro Jahr auf 2,3 Millionen Euro pro Jahr im Szenario 1, auf 2,2 Millionen Euro pro Jahr in Szenario 2 bzw. auf 2,0 Millionen Euro pro Jahr

in Szenario 3 gesenkt werden. Dabei ist zu beachten, dass in der Studie mit konstanten Investitions- und Planungskosten sowie Energiepreisen gerechnet wurde.

Die Entscheidung für ein Szenario darf jedoch keine reine Wirtschaftlichkeitsabwägung sein, sondern ist der Versuch, die definierten Klimaschutzziele der Stadt Oldenburg im Bereich der stadteigenen Liegenschaften umzusetzen und damit beispielgebend für andere Kommunen, für andere Sektoren sowie für die Einwohner Oldenburgs und die gesamte Gesellschaft zu agieren. Insofern empfiehlt es sich, ein früheres Zieljahr anzustreben und damit über den Zeitraum 2022 bis 2045 in Summe mehr Treibhausgasemissionen einzusparen:

- Szenario 1 mit dem Zieljahr 2030 erreicht bis einschließlich 2045 kumulierte Treibhausgaseinsparungen von 257.126 t.
- Szenario 2 mit dem Zieljahr 2035 erzielt bis einschließlich 2045 kumulierte Treibhausgaseinsparungen von 229.463 t.
- Für Szenario 3 mit dem Zieljahr 2045 wurden bis einschließlich 2045 kumulierte Treibhausgaseinsparungen von 177.330 t ermittelt.

Damit kann die Umsetzung von Szenario 1 eine 1,45-fache Treibhausgaseinsparung im Betrieb bis zum Jahr 2045 erreichen im Vergleich zu Szenario 3. Szenario 2 kann eine 1,29-fache Treibhausgaseinsparung gegenüber Szenario 3 erzielen.

In allen drei Szenarien ergibt sich in den Zieljahren eine Klimaneutralität für den Betrieb der städtischen Gebäude, die Treibhausgasemissionen in den Jahren 2030 (Szenario 1), 2035 (Szenario 2) und 2045 (Szenario 3) werden komplett durch den erneuerbaren Strom aus Photovoltaikanlagen ausgeglichen. Die Klimaschutzziele der Bundesregierung [28] sehen im Vergleich dazu für das Jahr 2030 eine Reduzierung der CO₂-äquivalenten Emissionen von 65 % gegenüber 1990 vor, für das Jahr 2040 eine Reduzierung von 88 %. Bis zum Jahr 2045 soll Deutschland Treibhausgasneutralität erreichen.

Verlauf der Treibhausgasemissionen

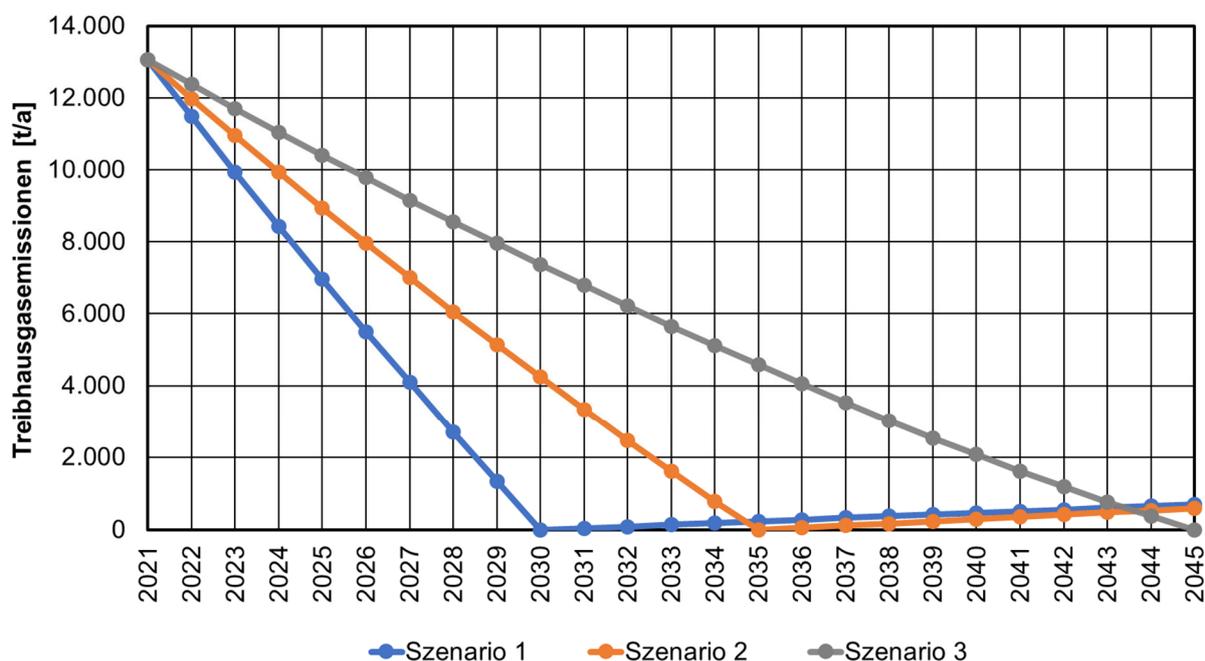


Bild 37:

Verlauf der jährlichen Treibhausgasemissionen aus dem Betrieb der städtischen Gebäude für das Szenario 1 mit dem Klimaneutralitätszieljahr 2030, das Szenario 2 mit dem Klimaneutralitätszieljahr 2035 und für das Szenario 3 mit dem Klimaneutralitätszieljahr 2045. Szenario 1 und Szenario 2 sind zum jeweiligen Zieljahr klimaneutral, in den Jahren danach ergeben sich aber wieder kleine Treibhausgasemissionen, da sich die CO₂-Äquivalente der Energieträger Netzstrom und Stromeinspeisung über die Zeit weiter verringern.

Die Zielerreichung der Klimaneutralität erfordert in allen drei Szenarien große PV-Anlagen auf den Dächern mit Nennleistungen von insgesamt 27.945 kW_P bei Szenario 1, 29.278 kW_P bei Szenario 2 und 32.219 kW_P bei Szenario 3. Auf Basis der gewählten Typgebäude wurden Belegungsanteile der für Photovoltaik geeigneten Dachflächen von insgesamt 67,5 % (Szenario 1), 70,7 % (Szenario 2) und 77,8 % (Szenario 3) ermittelt. Dies sind hohe Kennzahlen und in der tatsächlichen Umsetzung muss geprüft werden, ob diese Zahlen im Durchschnitt realisiert werden können. Zu beachten ist auch, dass einige Typgebäude und Cluster für sich alleine keine Klimaneutralität durch Photovoltaik auf dem Dach erreichen können und zwischen den Clustern und Gebäuden ausgeglichen werden muss. Gegebenenfalls müssen auch Fassadenflächen für Photovoltaik oder Photovoltaikfreiflächenanlagen genutzt werden.

Da in den ersten Jahren des Betrachtungszeitraums die zusätzlichen Gelder zunächst bewilligt und die entsprechenden Stellen in der Verwaltung der Stadt Oldenburg geschaffen und danach das Personal eingestellt werden müssen, kann anders wie in den Szenarien nicht von einem fast linearen Erfolg bei den

Einsparungen ausgegangen werden. Dies kann zumindest teilweise kompensiert werden, indem zunächst die „Hochverbraucher“ in den Liegenschaften für die Sanierungen priorisiert werden. Allerdings müssen durch die Stadt Oldenburg auch andere Priorisierungsgründe wie der Bedarf, das Baurecht und der Bauzustand in Betracht gezogen werden.

Eine Nachverfolgung der Szenarienumsetzung mit ihrer Auswirkung auf den Endenergieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen sollte nach einem Drittel bis zur Hälfte des Umsetzungszeitraums 2022 bis 2030/2035/2045 in Angriff genommen werden, um ggf. für die Zielerreichung nachkorrigieren zu können.

9 Literatur

- [1] Kobiela, G. et al.: CO₂-neutral bis 2035: Eckpunkte eines deutschen Beitrags zur Einhaltung der 1,5-°C-Grenze. Bericht des Wuppertal Instituts. 2020. Verfügbar unter https://fridaysforfuture.de/wp-content/uploads/2020/10/FFF-Bericht_Ambition2035_Endbericht_final_20201011-v.3.pdf.
- [2] Stadt Oldenburg: Datenbank „Anlage_02_Liegenschaften“. Letzte Version vom 21. Juli 2021.
- [3] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchskennwerte und der Vergleichswerte im Nichtwohngebäudebestand vom 30. Juli 2009.
- [4] Bundesregierung: Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 29. April 2009. Verfügbar unter https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Archiv/EnEV/EnEV2009/Download/EnEV2009.pdf;jsessionid=0F4C67260F5620BBDF4A1E3C1B9F8E61.live21302?_blob=publicationFile&v=1.
- [5] Bundesregierung: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 28. Oktober 2015. Verfügbar unter https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Archiv/EnEV/EnEV2013/Download/Lesefassung_EnEV2013.pdf?_blob=publicationFile&v=1.
- [6] Beuth Verlag GmbH: DIN V 18599:2018-09 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie: Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude – Nichtwohngebäude (BEG NWG) vom 16. September 2021. Verfügbar unter https://www.deutschland-machts-effizient.de/KAENEF/Redaktion/DE/PDF-Anlagen/BEG/bundesfoerderung-f%C3%BCr-effiziente-gebaeude-nichtwohngebaeude-20210916.pdf?_blob=publicationFile&v=3.
- [8] Deutscher Bundestag: Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz – GEG) vom 8. August 2020. Bundesgesetzblatt I, Seite 1728 ff. Verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>.
- [9] Fritsche, U.; Greß, H. W.: der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2019 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050. Kurzstudie des Internationalen Instituts für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH (IINAS). 2020.
- [10] Valentin Software GmbH: PV*Sol – Die Planungs- und Simulationssoftware für Photovoltaik-Systeme. Verfügbar unter <https://valentin-software.com/produkte/pvsol/>.
- [11] Deutsche Energie-Agentur GmbH: dena-Gebäudereport kompakt 2019: Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. 2019. Verfügbar unter

https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2019/dena-GEBAEUDE-PORT_KOMPAKT_2019.pdf.

- [12] Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Szenarienbewertung für die energetische Sanierung der städtischen Liegenschaften der Stadt Oldenburg. Präsentation zur Besprechung am 14. Oktober 2021.
- [13] Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern: BKI Kostenplaner 2020.
- [14] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): EnEV 2017 – Vorbereitende Untersuchungen. BBSR-Online-Publikation 16/2017, Bonn, September 2017.
- [15] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) (Hrsg.): Kosten energierelevanter Bau- und technischer Anlagenteile bei der energetischen Sanierung von Nichtwohngebäuden/Bundesliegenschaften. BBSR-Online-Publikation 06/2014, Bonn, Mai 2014.
- [16] Umweltamt Wiesbaden: Energetisches Sanieren denkmalgeschützter Gebäude. Sanierungsrechner. Verfügbar unter <http://www.energie-denkmal-wiesbaden.de/>.
- [17] Klem, T.; Metzger, J.; Jachmann, H.: Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Abschlussbericht. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, Stuttgart, 2019.
- [18] Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk C.A.R.M.E.N: Marktpreise Hackschnitzel WG 20. Abgerufen am 19. November 2021 unter <https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktpreise-energieholz/marktpreisvergleich/>.
- [19] Fördersätze für Solaranlagen und Mieterstromzuschlag. Bundesnetzagentur, 2021. Abgerufen am 16. November 2021 unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/ZahlenDaten-Informationen/EEG_Registerdaten/start.html;jsessionid=E4314FE4B389AE7BEE0F31E35DCB9EB3#doc732052bodyText4.
- [20] Schulter, D.: Nachhaltige Gebäudesanierung durch lebenszyklusorientierte Bauproduktauswahl. Dissertation, 2013, TU Graz.
- [21] ÖKOBAUDAT (Version: 2021-I vom 4. Januar 2021). Herausgeber: Deutsches Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI). Abgerufen am 12. Oktober 2021 unter <https://www.oekobaudat.de/>.
- [22] Klinger, M. et al.: Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen. Bundesamt für Energie. Bern (CH), 2014.
- [23] Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen. Steckbriefe BNB-UN – Neubau V2017. Verfügbar unter <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/unterrichtsgebaeude/>.

- [24] Hengstler, J. et al.: Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Abschlussbericht. Herausgegeben vom Umweltbundesamt. 2021.
- [25] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung: Zukunft Bau – Effizienzhaus Plus Bildungsbauten. Webseite des Forschungsförderprogramms Effizienzhaus Plus, Bereich Bildungsbauten. Verfügbar unter <https://www.zukunftbau.de/effizienzhaus-plus/modellvorhaben/effizienzhaus-plus-bildungsbauten/>.
- [26] Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP: Energieeffiziente Schulen – Webseite der BMWi-Begleitforschung EnEff:Schule. Verfügbar unter www.eneff-schule.de.
- [27] Kenkmann, A.; Braungardt, S.: Das Handwerk als Umsetzung der Energiewende im Gebäudesektor. Policy Paper. Öko-Institut e.V., Freiburg, 2018.
- [28] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Lesefassung des Bundes-Klimaschutzgesetzes 2021 mit markierten Änderungen zur Fassung von 2019. Juli 2021. Verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/ksg_aendg_2021_3_bf.pdf.