

Anlage 2

ING+ARCH Partnerschaft mbB
Regner / Bodem
Beratende Ingenieurin / Architekt

■ Firmensitz:
90419 Nürnberg . Steinstr. 21
Fon: +49(0)911 59 31 90
Fax: +49(0)911 59 31 92

nuernberg@ingplusarch.eu
www.ingplusarch.eu

91725 Echingen . Kussenhof 2
Fon: +49(0)9836 97 09 06 - 0
Fax: +49(0)9836 97 09 06 - 99

Stadt Nürnberg – Konzept für einen klimaneutralen Gebäudebestand ab 2035 - Langfassung -

Auftraggeber:

Hochbauamt der Stadt Nürnberg

Marientorgraben 11
90402 Nürnberg

Erstellt:

ING+ARCH Part mbB
Mario Bodem Architecte DPLG / Jan Dorweiler Dipl.-Ing. Univ. / Claudia Dittmer Dipl.-Ing. (FH)
Steinstr. 21
90419 Nürnberg

Stand: 24.09.2021

Inhalt

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Zusammenfassung | 5 |
| 2 | Beschreibung der Aufgabe | 9 |
| 3 | Methodik | 10 |
| 4 | Klimaneutralität | 11 |
| 4.1 | Klimawandel und CO ₂ -Ausstoß | 11 |
| 4.2 | Strategien zur Klimaneutralität | 11 |
| 4.3 | Bilanzgrenzen | 16 |
| 5 | Grundsätze | 17 |
| 5.1 | Grundlagen und Grundsätze zur Energieerzeugung | 17 |
| 5.1.1 | Strom | 17 |
| 5.1.2 | Stromspeicher | 20 |
| 5.1.3 | Fernwärme | 22 |
| 5.1.4 | Sonstige Wärmeerzeuger (fossil) | 23 |
| 5.1.5 | Zertifikate und Importe - Regionalität | 23 |
| 5.2 | CO₂-Relevanz von Gebäuden; Herstellung und Betrieb | 24 |
| 5.2.1 | Betrieb von Gebäuden | 24 |
| 5.2.2 | Errichtung und Rückbau | 24 |
| 5.3 | Strategien zur Klimaneutralität im Gebäudesektor | 25 |
| 5.3.1 | Nachhaltige und netzdienliche Gebäudestandards | 26 |
| 5.3.2 | Energieerzeugung am Gebäude | 31 |
| 5.3.3 | CO ₂ -Neutrale Wärmeerzeugung und Energieträger | 33 |
| 6 | Bestandsanalyse | 35 |
| 6.1 | Datengrundlage | 35 |
| 6.1.1 | Verbrauchsdaten | 35 |
| 6.1.2 | Energieträger | 35 |
| 6.2 | Analyse der Datengrundlage | 36 |
| 6.2.1 | Wärmeversorgung | 36 |
| 6.2.2 | Sanierungspotential | 37 |
| 6.2.3 | Sanierungstiefe (Wärme und Strom) | 37 |
| 6.3 | Auswertung der Daten und Schlussfolgerungen | 38 |
| 7 | Maßnahmenentwicklung | 39 |
| 7.1 | Hypothese 1 - Power-to-Gas (PtG) | 41 |
| 7.2 | Hypothese 2 - Power-to-Gas + Kraft-Wärme-Kopplung (PtG+KWK) | 44 |
| 7.3 | Hypothese 3 - Biomasse + Kraft-Wärme-Kopplung (Bio + KWK) | 46 |
| 7.4 | Hypothese 4 – Energetische Sanierung | 48 |
| 7.5 | Hypothese 5 – Umrüstung auf hybride Heizsysteme BHKW + Wärmepumpe | 51 |
| 7.6 | Hypothese 6 – Nachrüstung von Wärmepumpen | 57 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 7.7 | Hypothese 7 – PV auf stadteigenen Gebäuden (mit Speicher) | 61 |
| 7.8 | Vergleich der Hypothesen | 64 |
| 7.9 | Synthese | 68 |
| 8 | Szenarien | 69 |
| 8.1 | Szenario 1: „Weiter wie bisher“ (Referenzszenario) | 70 |
| 8.1.1 | Annahmen für Szenario 1 „Weiter wie bisher“ | 70 |
| 8.1.2 | CO ₂ -Emissionen Szenario 1 „Weiter wie bisher“ | 71 |
| 8.1.3 | Kostenentwicklung Szenario 1 „Weiter wie bisher“ | 72 |
| 8.2 | Szenario 2: „moderat“ | 73 |
| 8.2.1 | Annahmen für Szenario 2 „moderat“ | 73 |
| 8.2.2 | CO ₂ -Emissionen Szenario 2 „moderat“ | 74 |
| 8.2.3 | Kostenentwicklung Szenario 2 „moderat“ | 75 |
| 8.2.4 | Szenario 2 - Vergleichsvariante | 76 |
| 8.3 | Szenario 3 „Zielszenario 2035 klimaneutrale Stadtverwaltung“ | 77 |
| 8.3.1 | Annahmen für Szenario 3 „Zielszenario 2035“ | 77 |
| 8.3.2 | CO ₂ -Emissionen Szenario 3 „Zielszenario 2035“ | 78 |
| 8.3.3 | Kostenentwicklung Szenario 3 „Zielszenario 2035“ | 79 |
| 8.3.4 | Szenario 3 - Vergleichsvariante | 80 |
| 9 | Empfehlung und Umsetzungsfahrplan | 81 |
| 9.1 | Bewertung der Szenarien und Varianten | 81 |
| 9.2 | Empfehlungen | 81 |
| 9.3 | Möglicher Umsetzungszeitplan | 82 |
| 9.4 | CO₂-Ausstoß bis 2050 | 83 |
| 9.5 | Kosten pro eingesparte Tonne CO₂ | 84 |
| 9.6 | Gesamtkostenentwicklung (Vollkosten) | 85 |
| 10 | Hindernisse | 86 |
| 11 | Anhang 1 - Szenarien ohne Preissteigerung | 88 |
| 12 | Anhang 2 - Quellen und Grundlagen | 91 |

1 Zusammenfassung

Das Ziel, einen CO₂-neutralen kommunalen Gebäudestand bis 2035 zu realisieren, ist sehr ambitioniert und bedarf intensiver Überlegungen, Anstrengungen und Investitionen in vielen Bereichen.

Hierzu muss vorrangig gebäudeseitig der Verbrauch reduziert und es müssen technische Lösungen eingesetzt werden, die den CO₂-Ausstoß reduzieren. Dies lässt sich bereits heute wirtschaftlich umsetzen.

Zur Reduzierung des Verbrauches sind jedoch vielfältige planungs- und arbeitsintensive Maßnahmen direkt an den Gebäuden erforderlich. Bei Gebäuden handelt es sich um langlebige Wirtschaftsgüter, deren Umbau sich nicht in beliebig kurzer Zeit umsetzen lässt.

Ein beschleunigter Umbau (bzw. Sanierung) erfordert zusätzliche Kapazitäten auf Seiten der Stadtverwaltung, der Planungsbüros und der ausführenden Baufirmen. Diese Kapazitäten sind jedoch begrenzt. Bis 2035 lassen sich schon deshalb kaum alle Maßnahmen an den Gebäuden vollständig umsetzen.

Das Ziel der CO₂-Neutralität kann also nicht alleine durch eine Verbrauchsreduzierung erreicht werden. Parallel muss der verbleibende Energiebedarf durch Energieträger gedeckt werden, die sukzessive auf CO₂-Neutralität umgestellt werden.

Diese Umstellung ist zunächst mit relativ hohen Kosten verbunden und erfordert erhebliche Anstrengungen von Seiten des Energieversorgers.

Die Ergebnisse dieser Studie haben gezeigt, dass die Maßnahmen an den Gebäuden (Sanierung, Heizungsumstellung, PV) deutlich kostengünstiger umzusetzen sind, als die Umstellung der Energieträger (Strom, Gas, Fernwärme) auf CO₂-Neutralität.

Die wirtschaftlichste Vorgehensweise ist daher:
„erst den Bedarf maximal senken und dann mit CO₂-neutralen Energieträgern decken“.

Mit zunehmender Kopplung der Sektoren (Wärme, Strom) ist neben der Reduzierung des CO₂-Ausstoßes auch auf die Netzdienlichkeit der Maßnahmen zu achten. Ohne diese kann der weitere Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromnetz erschwert werden. Hierbei ist eine systemische Betrachtung der Sektoren erforderlich.

Gebäudesektor:

Die in diesem Konzept untersuchten Technologie-Hypothesen zeigen, dass der kostengünstigste Weg zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes (wärmeseitig) die energetische Sanierung ist. Daher ist eine deutliche Erhöhung der Sanierungsquote von heute ca. 0,7% auf 1,4%, oder besser auf 2,0%, zu empfehlen.

Beginnend mit einer Sanierungsquote von 2% ab 2025 könnten bis 2035 ca. 20% der Gebäude saniert werden.

Eine weitere Erhöhung wäre zwar wirtschaftlich sinnvoll, aber aus Kapazitätsgründen voraussichtlich nur schwer umsetzbar.

Neben der energetischen Sanierung sollten die CO₂-Emissionen der Wärmeerzeugung reduziert werden.

Bei fernwärmeversorgten Gebäuden muss dies von Seiten des Energieversorgers erfolgen.

Bei unsanierten Gebäuden, die nicht mit Fernwärme versorgt werden, sollte sukzessive auf Wärmepumpen in Kombination mit Blockheizkraftwerken umgestellt werden. Dadurch kann der CO₂-Ausstoß um fast 40% gesenkt und die Netzdienlichkeit erhöht werden.

In bereits sanierten Gebäuden oder Neubauten sollten Wärmepumpen nachgerüstet werden. Hierdurch lässt sich der CO₂-Ausstoß um 50% bis 70% senken.

Zur Reduzierung der stromseitigen CO₂-Emissionen ist der verstärkte Ausbau von PV-Anlagen auf stadteigenen Gebäuden zu empfehlen. Zusätzlich sollten Stromspeicher nachgerüstet werden, um den Anteil des PV-Stroms, der direkt im Gebäude genutzt werden kann, zu erhöhen und die Netzdienlichkeit zu verbessern.

Vorgenannte Umrüstungen zur Wärme- und Stromversorgung lassen sich bis 2035 realisieren.

Energieversorgung:

Die Umstellung der Energieträger (Strom, Gas, Fernwärme) auf CO₂-Neutralität muss von Seiten des Energieversorgers erfolgen.

Der Anteil des Stroms aus erneuerbaren Energien muss sukzessive weiter gesteigert werden. Vor allem im Winter und bei sogenannten Dunkelflauten müssen synthetische Gase („grüner“ Wasserstoff bzw. Methan) zur saisonalen Speicherung eingesetzt werden.

Gleiches gilt für die Umstellung der Fernwärme auf CO₂-neutrale Energieträger, sowie für eine zunehmende Beimischung von „grünen“ synthetischen Gasen im Gasnetz.

Diese Maßnahmen führen jedoch zu signifikanten Preissteigerungen bei den Energieträgern.

CO₂-Ausstoß und Kosten:

Da die erforderlichen Technologien heute noch vergleichsweise teuer sind, in Zukunft aber günstiger werden, führt eine kurzfristige, schnelle Umstellung bei den Energieträgern zu höheren Kosten als eine spätere Umstellung. Mit einer späteren Umstellung ist aber wiederum ein erhöhter kumulierter CO₂-Ausstoß verbunden, der zulasten des verfügbaren „CO₂-Restbudgets“ geht.

Energetische Maßnahmen an den Gebäuden sind im Vergleich dazu kostengünstiger und sollten möglichst zeitnah und so umfangreich wie möglich erfolgen.

Bei einer Realisierung der Klimaneutralität bis 2045 (Szenario 2 „moderat“) ist mit Mehrkosten von ca. 5 Mio. € pro Jahr gegenüber dem Referenzszenario (Szenario 1) zu rechnen. Hierbei würde sich ein kumulierter CO₂-Ausstoß von ca. 412.000 Tonnen bis 2050 ergeben. Dies ist mit erheblich geringeren Mehrkosten gegenüber dem Referenzszenario (Szenario 1) verbunden als eine Umsetzung bis 2035 (Szenario 3 „Zielszenario“). Allerdings wird hierbei das angestrebte Ziel des Stadtratsbeschlusses nicht fristgerecht erreicht.

Die Realisierung des Ziels der Klimaneutralität bis 2035 kann durch die Umsetzung von Szenario 3 („Zielszenario 2035“) erreicht werden. Hierbei ist mit Kosten von bis zu ca. 10 Mio. € pro Jahr zu rechnen. Der kumulierte CO₂-Ausstoß bis 2050 würde sich auf 306.000 Tonnen belaufen und damit etwa ein Viertel weniger als im Szenario 2 „moderat“ bedeuten.

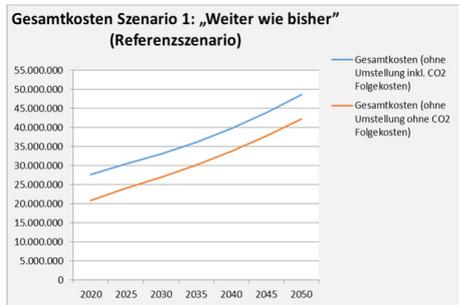


Abb. 1: Gesamtkosten Szenario 1

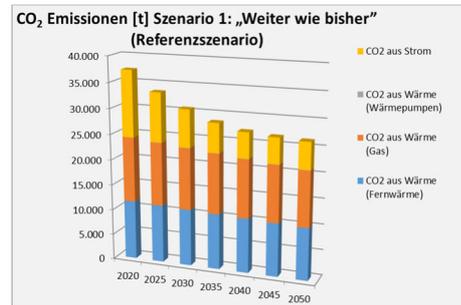


Abb. 2: CO₂-Emissionen Szenario 1

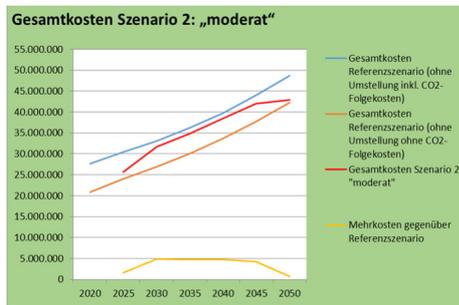


Abb. 3: Gesamtkosten Szenario 2

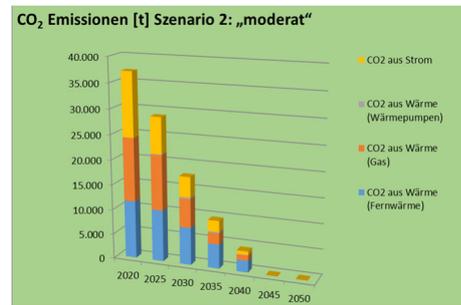


Abb. 4: CO₂-Emissionen Szenario 2

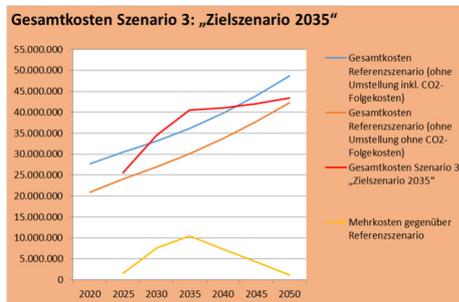


Abb. 5: Gesamtkosten Szenario 3

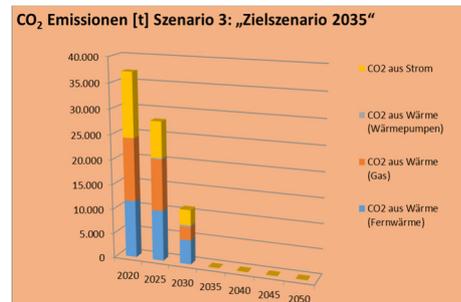


Abb. 6: CO₂-Emissionen Szenario 3

2 Beschreibung der Aufgabe

Das Ziel dieses Konzeptes ist es, Maßnahmen und einen Umsetzungsfahrplan zu entwickeln, die es ermöglichen, den vorhandenen stadteigenen Gebäudebestand (Nichtwohngebäude) so zu ertüchtigen, dass ab 2035 ein nahezu klimaneutraler Betrieb möglich ist (Stadtratsbeschlüsse vom 24.07.2019 und 17.06.2020). Darüber hinaus sollen stadtweite strategische Maßnahmen benannt werden, die zur Zielerreichung signifikant beitragen können oder dazu Voraussetzung sind [z.B. Einsatz von synthetischem-Gas, Ausbau der Photovoltaik etc.].

Inhalt der Konzeptentwicklung ist, Erreichungskriterien für Klimaneutralität zu definieren [bilanziell, tatsächlich, etc.], die energetische und bauliche Ausgangslage des Gebäudebestands zu erfassen, Teilziele sowie Maßnahmenpakete zur Zielerreichung zu entwickeln und daraus einen Sanierungsfahrplan abzuleiten. Dieser soll als Grundlage für die Projektierung und finanzielle Planung dienen können. Bei der Maßnahmenentwicklung ist zu berücksichtigen, dass eine relativ hohe Zahl der stadteigenen Gebäude denkmalgeschützt ist und daher nur unter besonderen Auflagen energetisch ertüchtigt werden kann.

3 Methodik

Auf Basis der vom Hochbauamt der Stadt Nürnberg zur Verfügung gestellten Datengrundlagen wurde zunächst der Ist-Zustand analysiert und die Gebäude in Kategorien unterteilt, deren Verbräuche analysiert und das Optimierungspotential ermittelt.

Es wurde unterschieden nach Gebäuden, deren Wärmeerzeugung am Bauwerk selbst erfolgt und damit direkt im Einflussbereich der kommunalen Verwaltung liegt und in solche, die durch Fernwärme versorgt werden, deren Wärmeerzeugung nicht direkt beeinflusst werden kann.

Im Weiteren wurden verschiedene Technologien verglichen, die den CO₂-Ausstoß der Liegenschaften reduzieren können: Zum einen wurden Verfahren zur Bedarfsreduzierung durch Verbesserung der Effizienz, zum anderen Technologien, die eine CO₂ - neutrale Wärme- und Stromversorgung gewährleisten, untersucht. Hierfür wurden überschlägig Kosten aus heutiger Sicht ermittelt, aber auch deren zu erwartende Entwicklung in der Zukunft betrachtet.

Anschließend wurde geprüft, welche Technologien sich für die kommunalen Liegenschaften eignen und realistisch bis 2035 umsetzbar sind. Hierzu wurden Kosten, Kapazitäten, Zuständigkeiten und weitere Rahmenbedingungen berücksichtigt.

Auf Basis der vorgenannten Betrachtungen wurden Szenarien und Empfehlungen erarbeitet, wie der Pfad zur Klimaneutralität beschritten werden kann und welche Ziele bis 2035 realistisch umgesetzt werden können.

Es handelt sich um Abschätzungen und Annahmen auf Basis der verfügbaren Informationen. Einzelbetrachtungen für individuelle Objekte wurden nicht vorgenommen. Dies ist im Rahmen der weiteren Planungen durchzuführen.

Dieses Konzept soll als Entscheidungshilfe zur Festlegung konkreter Umsetzungsstrategien dienen.

4 Klimaneutralität

4.1 Klimawandel und CO₂-Ausstoß

Das Übereinkommen von Paris vom 12. Dezember 2015 sieht die Begrenzung der menschengemachten globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten vor.

Deshalb sind Entscheidungen, die den langfristigen CO₂-Ausstoß beeinflussen, unter diesem Aspekt zu bewerten. Dies gilt in hohem Maße für Entscheidungen im Bausektor, da hier Nutzungszeiträume von 50 Jahren und mehr zu erwarten sind.

Gemäß dem Sonderbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) vom Oktober 2018 können noch knapp 420 Gigatonnen (Gt) CO₂ (gerechnet ab Ende 2017) ausgestoßen werden, um das 1,5-Grad-Ziel nicht zu verfehlen.

Bei einem aktuellen weltweiten Ausstoß von circa 42 Gt pro Jahr dürfte dieses Budget in etwa 7 Jahren aufgebraucht sein.

(siehe auch CO₂-Uhr des MCC: <https://www.mcc-berlin.net/forschung/co2-budget.html>)

Daher ist der Beschluss des Nürnberger Stadtrates „als Stadtverwaltung Klimaneutralität anzustreben, mit der Zielsetzung, dies bis 2035 zu erreichen“ ein wichtiger Baustein zur Erreichung der gesetzten Klimaziele.

4.2 Strategien zur Klimaneutralität

Gemäß einer Definition des Europäischen Parlaments bedeutet Klimaneutralität:

„ein Gleichgewicht zwischen Kohlenstoffemissionen und der Aufnahme von Kohlenstoff aus der Atmosphäre in Kohlenstoffsinken herzustellen. Um Netto-Null-Emissionen zu erreichen, müssen alle Treibhausgasemissionen weltweit durch Kohlenstoffbindung ausgeglichen werden“.

Um dieses Ziel zu erreichen, müssen die Treibhausgas-Emissionen drastisch und dauerhaft gesenkt werden. Verbleibende, unvermeidbare Emissionen (z.B. Methanemissionen von Tieren) müssen durch den dauerhaften Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre kompensiert werden.

Da zum Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre zum heutigen Zeitpunkt keine kostengünstigen und zuverlässigen Technologien zur Verfügung stehen, ist der entscheidende Faktor die Reduzierung der Emissionen. Für alle Sektoren gilt es, langfristig den Bedarf durch erneuerbare Energien zu decken.

Hierbei spielen drei Aspekte eine entscheidende Rolle:

- Reduzierung des Bedarfs/Verbrauchs
- Deckung des Bedarfs durch erneuerbare Energien
- Synchronisierung von Erzeugung und Bedarf (Netzdienlichkeit)

Erneuerbare Energien:

Es gibt verschiedene Szenarien für die Umstellung der Energieträger in allen Sektoren auf erneuerbare Energien. In allen Varianten spielen die erneuerbaren Energieträger Sonne (Photovoltaik) und Wind die entscheidende Rolle.

Regional können diese durch andere Quellen wie Biomasse, Wasserkraft und Geothermie ergänzt werden.

Sektorenkopplung:

Zur Deckung des Energiebedarfs über diese Energiequellen ist eine Kopplung der Sektoren (Strom, Wärme, Verkehr) und eine Verschiebung zu strombasierten Systemen erforderlich (Elektromobilität, Wärmepumpen etc.).

Entscheidend ist vor allem die Umstellung der Sektoren Wärme und Verkehr, die heute noch im Wesentlichen mit fossilen Energieträgern betrieben werden, auf CO₂-Neutralität (Dekarbonisierung).

Hierbei kommt der Wärmeversorgung über Nah- und Fernwärmenetze eine richtungweisende Bedeutung im urbanen Raum zu. Der Einsatz von Kraftwärmekopplung reduziert durch die Effizienzsteigerung den CO₂-Ausstoß zunächst erheblich. Durch den Einsatz klimaneutraler Energieträger kann dann sukzessive auf CO₂-Neutralität umgestellt werden.

Regionalität - Urbaner Raum und Metropolregion:

Der Energiebedarf der Ballungsräume kann i.d.R. nicht annähernd im urbanen Raum gedeckt werden. Daher ist eine Kooperation mit den umliegenden Regionen erforderlich (Metropolregion). Der städtische Raum bietet jedoch hohe Potentiale zur Reduktion des Energiebedarfs.

Dunkelflaute und Speicherung:

Die Energieerzeugung durch Solarenergie (PV) und Wind bilden die wesentlichen Säulen der regenerativen Energieerzeugung und ergänzen sich, da sie häufig komplementär auftreten. In sonnenreichen Jahreszeiten weht häufig wenig Wind, in windreichen Jahreszeiten ist meist wenig Solarenergie verfügbar.

An einigen Tagen (und Nächten) steht jedoch weder ausreichend Sonnen- noch Windenergie zur Bedarfsdeckung zur Verfügung. Dies wird als sogenannte Dunkelflaute bezeichnet.

Daher müssen auch in ausreichendem Maße Kurzzeitspeicher zur Kompensation von kurzfristiger Volatilität in der Erzeugung (z.B. Tag-Nacht) eingesetzt werden, um das Netz zu stabilisieren.

Für den Ausgleich der unterschiedlichen Erzeugungs- und Verbrauchswerte zwischen Sommer und Winter sind saisonale Speicher erforderlich.

Beide Systeme stehen heute kaum zur Verfügung und sind mit hohen spezifischen Kosten verbunden. Jedoch sinken hier die Preise mit zunehmender Skalierung erheblich (siehe z.B. Elektromobilität).

Effizienz und Suffizienz:

Neben der Erhöhung der Produktion durch regenerative Energieträger muss zur rechtzeitigen Erreichung der Ziele auch der Bedarf reduziert werden.

Durch die Verbesserung der **Effizienz** kann bei Gebäuden im Wärmesektor der Bedarf um bis zu 90% reduziert werden, bei gleichzeitiger Verbesserung des Komforts.

Durch die zunehmende Zahl stadteigener Gebäude und den Ausbau der technischen Gebäudeausstattung wird im Stromsektor der Verbrauch trotz steigender Effizienz jedoch insgesamt etwas zunehmen.

Eine Beschränkung auf die tatsächlich erforderliche technische Ausstattung und die Begrenzung der Flächen auf das nötige Maß (**Suffizienz**) ist ebenfalls ein wichtiger Baustein zur Erreichung der CO₂- Neutralität.

Carbon Capture (Kohlenstoffabscheidung):

Bestandteil vieler Klimakonzepte sind Technologien zur CO₂-Abscheidung aus der Atmosphäre. Diese Technologien stehen jedoch in absehbarer Zeit nicht großflächig und wirtschaftlich einsetzbar zur Verfügung. Versuchsanlagen können CO₂ zu Preisen von ca. 1.000 US\$ pro Tonne aus der Atmosphäre extrahieren. Wobei das Problem der dauerhaften Speicherung noch nicht gelöst ist.



Abb. 7: Versuchsanlage in der Schweiz zur CO₂-Abscheidung
Quelle: <https://www.sciencemag.org/news/2017/06/switzerland-giant-new-machine-sucking-carbon-directly-air>

Eine bewährte und natürliche Methode ist die Speicherung in Biomasse (z.B. Holz). Wenn die Biomasse langfristig dem Kreislauf entzogen wird, z.B. als Bauholz, kann dies als Kohlenstoffabscheidung betrachtet werden.

Weitere, heute zur Verfügung stehende Technologien sind Holz-Kraftwerke, die Strom und Wärme erzeugen und einen gewissen Teil des CO₂ als Feststoff in Form von Pflanzenkohle (Biochar) abscheiden. Pflanzenkohle ist stabil, bindet CO₂ sehr langfristig und ist anderweitig als Rohstoff einsetzbar.



Abb. 8: Biomasse-BHKW mit CO₂-Abscheidung durch Pflanzenkohle
Quelle: <https://www.syncraft.at/media/news/details/das-neue-schwarze-gold>



Abb. 9: Pflanzenkohle als CO₂-Senke. Kann zur Bodenverbesserung eingesetzt werden.
Quelle: <https://en.wikipedia.org/wiki/Biochar>

4.3 Bilanzgrenzen

In diesem Konzept sollen regionale Lösungsansätze betrachtet werden, die zeitnah (zunächst bis 2035) umgesetzt werden können. Als Bilanzgrenze für Erzeugungsanlagen wurde die Metropolregion Nürnberg festgelegt.

Ziel ist es, Erzeugung und Verbrauch möglichst zur Deckung zu bringen. Der Energiebedarf soll im Wesentlichen mit Energieträgern aus der Region und Anlagen auf Basis erneuerbarer Energien, die innerhalb der Metropolregion liegen, gedeckt werden.

Die untersuchten Technologien und Ansätze sollten weitestgehend übertragbar auf andere Einheiten oder Kommunen in der Metropolregion sein. Ferner sollten sie möglichst den Nachhaltigkeitskriterien bezüglich des Ressourcenverbrauchs genügen, damit sie auch in größerem Umfang umsetzbar und skalierbar sind.

Auch die Ressourcen „Fläche“ (für PV) und „Biomasse“ stehen in der Metropolregion nur begrenzt zur Verfügung und müssen daher möglichst effizient genutzt werden.

Ein massiver Einsatz von regionaler Biomasse wird als nicht nachhaltig betrachtet, da dieser nicht zu einer vollständigen Deckung führen kann und damit nicht skalierbar ist. Auch besteht die Gefahr der Monokultur und der Konkurrenz zur Nahrungsmittelerzeugung.

Gleiches gilt für den Bezug von Ökostrom aus Biomasse.

Auch der Zukauf von Ökostrom aus erneuerbaren Energiequellen, kann nur soweit angerechnet werden, wie er zeitgleich zum Bedarf erzeugt wird (z.B. PV-Strom). Eine bilanzielle Anrechnung z.B. über Zertifikate wird hinsichtlich des Ziels der CO₂-Neutralität daher nicht als zielführend betrachtet.

5 Grundsätze

5.1 Grundlagen und Grundsätze zur Energieerzeugung

5.1.1 Strom

Als Basiswert der CO₂-Emissionen für den Strom wird der aktuelle Strommix der N-ERGIE (2019) zu Grunde gelegt. Dieser enthält derzeit einen Anteil von 60,5% erneuerbare Energien.

Zertifikate für Öko- bzw. regionalen Strom werden nicht berücksichtigt (siehe Pkt. 5.1.5).

Für die weitere Entwicklung des erneuerbaren Anteils wurde der Strommix den aktuellen Vorgaben der Bundesregierung bis 2045 sukzessive angepasst.

Bei der Maßnahmenbetrachtung zur Erreichung der CO₂-Neutralität im Stromsektor wird der nicht erneuerbare Anteil im Strommix der N-ERGIE Schritt für Schritt durch Strom aus regenerativen Quellen ersetzt, um so bis 2035 möglichst CO₂-Neutralität im Stromsektor zu erreichen.

Besonderes Augenmerk muss hier auf die Korrelation zwischen Erzeugung und Verbrauch gerichtet werden: Im Stromnetz muss zu jedem Zeitpunkt exakt die Menge erzeugt werden, die verbraucht wird.
Das Stromnetz ist kein Speicher!

Wegen der stark schwankenden Stromerzeugung bei Photovoltaik und Windkraft lässt sich damit allein keine stabile CO₂-neutrale Stromversorgung gewährleisten.

Eine Betrachtung des Strommixes auf Basis der Jahresbilanz ist eine zu starke Vereinfachung und zeigt nicht die Komplexität des Systems auf. Es muss auch die zeitliche Komponente betrachtet werden.

Mit steigendem Anteil der fluktuierenden erneuerbaren Energien wird es zunehmend schwieriger, Erzeugung und Verbrauch zur Deckung zu bringen.

Ab einem gewissen Ausbaugrad führt eine weitere Erhöhung der installierten Leistung nicht zu einer proportionalen Erhöhung des Ertrags. Der nutzbare Anteil sinkt, wenn mehr erzeugt wird, als gleichzeitig genutzt werden kann.

Daher müssen in zunehmendem Maße Speicher errichtet und/oder der Verbrauch der Erzeugung zeitlich besser angepasst werden.

Speicher sind heute noch sehr teuer, werden in Zukunft voraussichtlich aber erheblich günstiger werden.

Eine Anpassung des Verbrauchs (Netzdienlichkeit) ist nur in bedingtem Umfang möglich. Das Potential sollte aber - wo möglich - sinnvoll genutzt werden.

Die fortschreitende Dekarbonisierung von Verkehr und Wärme wird zu einer weiteren Erhöhung des Stromanteils am Gesamtenergiemix führen (E-Fahrzeuge und Wärmepumpen). Dadurch steigt der Strombedarf weiter an.

Beide Sektoren bieten jedoch auch erhebliches Potential zur Entkopplung von Bedarf und Erzeugung.

E-Fahrzeuge haben Speicher und bieten damit eine gewisse zeitliche Flexibilität bei der Beladung.

Gut gedämmte Gebäude wirken als Wärmespeicher und ermöglichen einen zeitlich flexiblen Einsatz von Wärmepumpen zur Beheizung. Heizungs-Pufferspeicher können zu einer weiteren Entkopplung beitragen.

Daher kann der Ausbau einer netzdienlichen Wärmeversorgung ein wichtiger Baustein in einem zukünftigen CO₂-neutralen Energiesystem werden. Dieses Potential sollte genutzt werden.

Aktueller Strommix in Deutschland:

Im Jahr 2020 lag der Anteil der erneuerbaren Energien im Bereich Strom erstmals bei ca. 50%. Das bedeutet jedoch nicht, dass bereits der „halbe Weg zum Ziel“ geschafft ist.

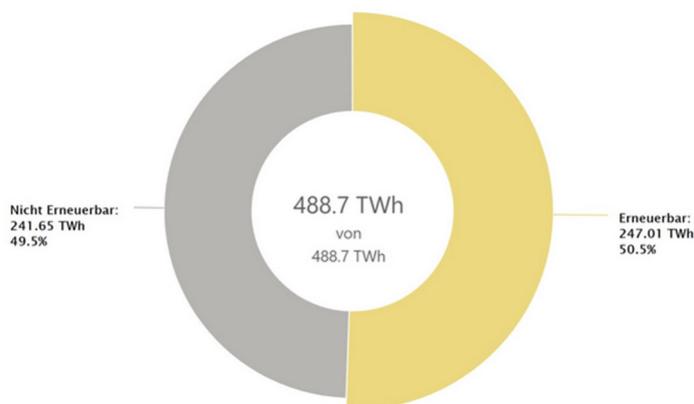


Abb. 10: Strommix Deutschland 2020, Quelle: ise.fraunhofer.de

Der Anteil der erneuerbaren Energien muss in den nächsten Jahren deutlich erhöht werden. Hierfür müssen Photovoltaik und Windkraft weiter stark ausgebaut werden.

Der Zubau von Windkraft ist in den letzten Jahren ins Stocken geraten und kann sich sogar rückläufig entwickeln, wenn Altanlagen das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben und nicht ersetzt werden (Repowering).

Sommerperiode:

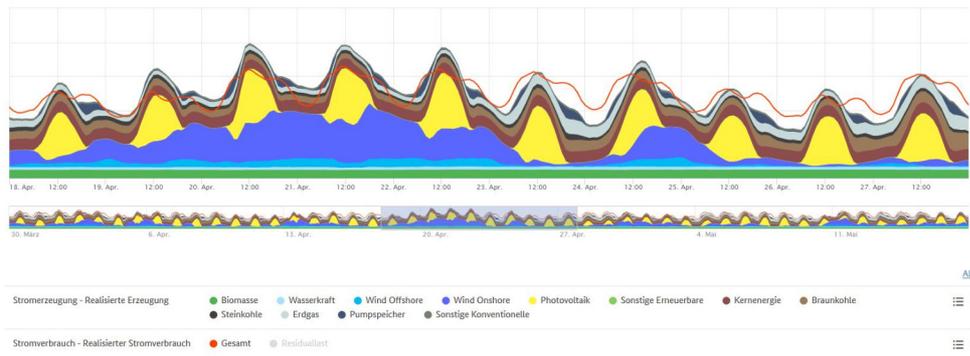


Abb. 11: beispielhafter Tagesverlauf im deutschen Stromnetz in der Sommerperiode
Quelle: www.smard.de

Die obige Grafik zeigt beispielhaft die Periode von 18.04.2020 bis 27.04.2020. An einigen Tagen können PV- (gelb) und Windstrom (blau) den Bedarf (rote Linie) bereits annähernd decken. Mit einem weiteren Ausbau ist eine Voldeckung erreichbar. Aber Verbrauch und Erzeugung können zeitlich nicht zur Deckung gebracht werden. Perioden von Über- und Unterdeckung werden sich abwechseln. Deren Ausgleich könnte beispielsweise über Kurzeitspeicher erfolgen, die mit hoher Effizienz Strom im Bereich von Stunden bis wenigen Tagen speichern können.

Der Ausbau dieser Speicher muss einhergehen mit dem Ausbau der Erzeugungskapazitäten, sonst wird nur ein immer geringer werdender Teil der neu erzeugten Energie nutzbar sein und die Stabilität des Netzes abnehmen.

Winterperiode:

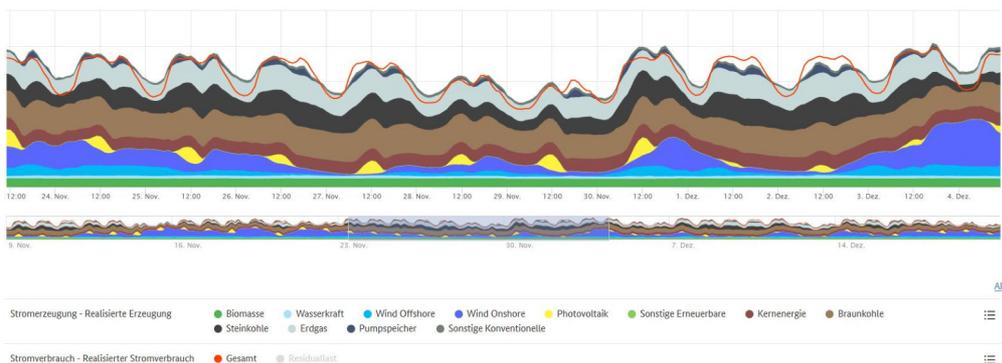


Abb. 12: beispielhafter Tagesverlauf im deutschen Stromnetz in der Winterperiode
Quelle: www.smard.de

Die obige Grafik zeigt beispielhaft einen Ausschnitt vom 24.11.2020 bis 04.12.2020 mit Teilen einer sogenannten „Dunkelflaute“. Es stehen weder PV- noch Windstrom in ausreichendem Maße zur Verfügung.

Selbst eine deutliche Erhöhung der installierten Leistung könnte in dieser Periode den Bedarf nicht vollständig decken. Auch ist der Zeitraum zu lang, um ihn mit Kurzzeitspeichern überbrücken zu können.

Für den Winterfall sind andere Quellen erforderlich.

Biomasse kann hier einen wertvollen Beitrag leisten, da es sich um biologisch gespeicherte Sonnenenergie handelt. Allerdings ist ihr Einsatz nicht unbegrenzt skalierbar.

Daher werden saisonale Speicher erforderlich, die die Überschüsse der Sommerproduktion in den Winter verschieben können.

Aus ökonomischer Sicht sind Erzeugungsanlagen (Wind und PV) bereits heute konkurrenzfähig und teilweise sogar günstiger als fossile Energieträger. Aber sie sind volatil und können deswegen nur soweit sinnvoll ausgebaut werden, wie der Ertrag auch genutzt werden kann. Mit steigendem Ausbau sinkt der Anteil der zeitgleich genutzt werden kann. Daher ist bezüglich der Wirtschaftlichkeit immer das Gesamtsystem zu betrachten.

Voraussetzungen für den Ausbau der erneuerbaren Energien:

Für einen ökonomisch und ökologisch sinnvollen weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien müssen Erzeugung und Verbrauch nahezu zur Deckung gebracht werden. Sonst muss weiterhin ein großer Teil des Energiebedarfs durch konventionelle Energien gedeckt werden.

Hierzu gibt es im Wesentlichen folgende Möglichkeiten:

- Reduzierung des Bedarfs durch Steigerung der Effizienz
- Speicher
- Netzdienliche Gebäude und Anlagen

5.1.2 Stromspeicher

Kurzzeitspeicher:

Als Kurzzeitspeicher kommen zurzeit Pumpspeicherkraftwerke und Lithium-Ionen-Akkus in Frage. Andere Technologien sind in der Entwicklung und können bei Marktreife ebenfalls berücksichtigt werden.

Pumpspeicherkraftwerke lassen sich nicht kurzfristig in ausreichender Zahl errichten. Geeignete Standorte sind selten und der ökologische Eingriff erheblich.

Relativ kurzfristig lassen sich Lithium-Ionen-Speicher errichten. Diese könnten direkt an den Erzeugungsanlagen (PV) stehen, was die Notwendigkeit des Netzausbaus reduziert, da die Einspeisung gleichmäßiger verteilt werden kann. Sie könnten auch an zentralen Stellen der Netzinfrastruktur stehen und so weitere netzdienliche Funktionen erfüllen.



Abb. 13: Groß-Stromspeicher im 100 Megawatt Bereich mit PV Anlage
Quelle: <https://www.startupworld.com/news/tesla-new-magapack-product/>

Saisonale Speicher:

Als saisonaler Speicher sind Akkus ungeeignet. Durch die geringe Anzahl von Be- und Entladevorgängen bei einer solchen Nutzung sind die spezifischen Kosten extrem hoch.

Eine Alternative stellen synthetische Gase dar (Wasserstoff oder Methan), die aus Strom im Sommer erzeugt werden. So kann z.B. synthetisches Methan im bestehenden Erdgasnetz mit seinen Kavernenspeichern ohne Änderungen am Gasnetz oder an den Verbrauchern gespeichert werden. Anders als im Stromnetz, wird dadurch eine tatsächliche physikalische Speicherung vom Sommer in den Winter ermöglicht.

Für die Nutzung von reinem Wasserstoff sind hingegen weitreichende technische Veränderungen an den bestehenden Gasnetzen und den Verbrauchern notwendig. Zur saisonalen Speicherung von

Wasserstoff müssten große Wasserstoffspeicher errichtet werden. Heute stehen solche Speicher noch nicht zur Verfügung. Eine direkte Einspeisung von Wasserstoff in das bestehende Erdgasnetz ist nur in sehr begrenztem Umfang möglich.



Abb. 14: Anlage zur Wasserstoff - Erzeugung
Quelle: <https://www.industr.com/de/methanisierungsanlage-verstaerkt-power-to-gas-komplex-2297753>

5.1.3 Fernwärme

Die Fernwärme spielt eine wichtige Rolle bei der Umstellung auf CO₂-Neutralität. Zum einen lassen sich durch die Zentralität der Wärmerzeugung sehr schnell viele Gebäude umstellen, zum anderen ermöglicht die Fernwärme den effizienten und wirtschaftlichen Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung (KWK). Ein weiterer Ausbau der Fernwärme ist daher wünschenswert.

Der überwiegende Teil der Fernwärme im Stadtgebiet Nürnberg wird heute schon über Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt (ca. 83%, Stand: 2020) und nutzt damit die eingesetzten Energieträger höchst effizient. Dies ist eine sehr gute Ausgangssituation.

Die Erzeugung basiert allerdings noch zum Großteil auf fossilen Brennstoffen.

Im vorliegenden Konzept werden Wege untersucht, den Anteil der erneuerbaren Energien an der Fernwärmeversorgung des städteigenen Gebäudebestand bis 2035 (bzw. 2045) auf 100% zu erhöhen.

Die Zuständigkeit hierfür liegt jedoch nicht direkt bei der kommunalen Verwaltung, sondern beim Energieversorger.

5.1.4 Sonstige Wärmeerzeuger (fossil)

Gebäude und Anlagen, die nicht über die Fernwärme versorgt werden, sind fast ausschließlich mit gasbetriebenen Wärmeerzeugern ausgestattet.

In diesem Konzept wird untersucht, wie der CO₂-Ausstoß stufenweise reduziert werden kann, um möglichst bis 2035 die CO₂-Neutralität zu erreichen. Es kann dabei auf synthetisches CO₂-neutrales Gas (Power-to-Gas) bzw. auf strombasierte Erzeuger (Wärmepumpen) umgestellt werden, die mit CO₂-neutralem Strom betrieben werden.

Im Gasnetz muss das fossile Gas sukzessive durch CO₂-neutrale Gase ersetzt werden. Dies kann durch Beimischung von CO₂-neutral erzeugtem Wasserstoff bzw. Methan erfolgen, oder durch eine reine Wasserstoffversorgung was erhebliche Umrüstungen oder den Aufbau neuer Netze erfordern würde.

Ebenso wird eine hybride Wärmeversorgung untersucht, die KWK und Wärmepumpe kombiniert.

5.1.5 Zertifikate und Importe - Regionalität

Ein Ausgleich über Zertifikate oder Importe von „Ökostrom“ aus anderen Regionen oder Ländern sollte nur unter den folgenden Voraussetzungen erfolgen:

- Die Ursprungsregion ist selbst CO₂-neutral, ansonsten führt der Kauf von Zertifikaten nur zur Verlagerung der Problematik in diese Region.
- Es werden nur Überschüsse an erneuerbaren Energien exportiert.
- Diese Überschüsse werden zeitgleich mit dem Bedarf in der Zielregion erzeugt.
- Das Bezugsmodell ist skalierbar.

Da die vorgenannten Voraussetzungen nicht dauerhaft sicher gewährleistet werden können, wird dieser Ansatz in diesem Konzept nicht berücksichtigt.

Für die Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien wird von der Errichtung von Neuanlagen bzw. Umstellung bestehender Anlagen in der Metropolregion ausgegangen, die den Kriterien der Nachhaltigkeit und Skalierbarkeit entsprechen.

Eine weitere Vernetzung und der Ausbau des Stromnetzes können zum überregionalen Ausgleich beitragen und mittelfristig die Dauer der Dunkelflaute reduzieren. Ein großflächiger Ausbau ist bis 2035 aufgrund langer Genehmigungs- und Bauzeiten nicht zuverlässig zu erwarten. Daher werden in diesem Konzept regionale Lösungen betrachtet.

5.2 CO₂-Relevanz von Gebäuden; Herstellung und Betrieb

5.2.1 Betrieb von Gebäuden

Der CO₂-Ausstoß im Gebäudesektor wird stark dominiert durch den Betrieb. Durch eine deutlich verbesserte Energieeffizienz der Gebäude sinkt der Anteil der Emissionen im Betrieb.

Damit steigt wiederum die Bedeutung des CO₂-Ausstoßes bei der Errichtung von Gebäuden.

5.2.2 Errichtung und Rückbau

Bei der Errichtung von Gebäuden dominieren insbesondere CO₂-Emissionen durch die Beton- bzw. Zementherstellung. Diese betragen weltweit etwa 8% der gesamten CO₂-Emissionen. Wenn die Zementproduktion ein Land wäre, stünde sie nach China und den USA an dritter Stelle der größten CO₂-Emittenten weltweit.

Ebenso zeichnet der Bausektor für über 50% des deutschen Müllaufkommens verantwortlich.

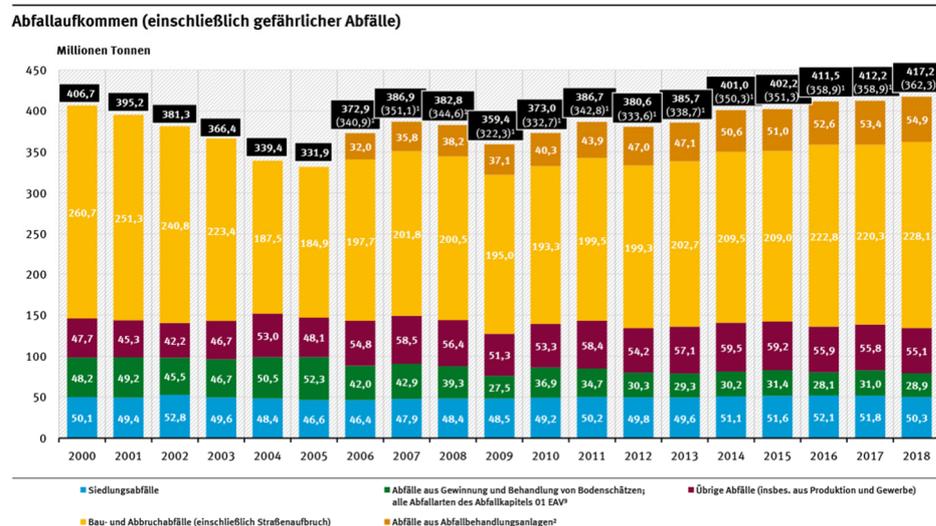


Abb. 15: Abfallaufkommen in Deutschland

Quelle: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall>

Insbesondere der Abbruch von Gebäuden spielt hierbei eine dominante Rolle. Die Entscheidung für einen Ersatzneubau sollte daher nicht nur unter funktionellen und ökonomischen Kriterien geprüft

werden. Aus der Perspektive des Klimaschutzes ist eine umfassende Sanierung selbst einem sehr energieeffizienten Neubau vorzuziehen. Hier ist der Einsatz der sogenannten „Grauen Energie“, also der Herstellungs- und Transportenergie, kritisch zu betrachten.

Es wird zunehmend notwendiger werden, sogenannte „Cradle-to-Cradle“ Konzepte bei der Errichtung und Sanierung von Gebäuden zu entwickeln. Hierbei wird nicht nur der Material- und Energieaufwand für Herstellung und Transport berücksichtigt, sondern auch der Rückbau.

Bereits in der Planung von Gebäuden sollte ein Rückbaukonzept erstellt werden, bei dem die Trennung der Bauteile und Baustoffe, sowie deren Wiederverwertbarkeit berücksichtigt werden.

Zur Erreichung der Klimaschutzziele ist eine nachhaltige Ausrichtung der Bautätigkeit erforderlich. Eine stärkere Orientierung der Bauweisen auf Basis nachwachsender Rohstoffe (insbesondere Holz) und verstärkte Verwendung von Recycling-Baustoffen bzw. CO₂-reduzierten Baustoffen stehen hier im Vordergrund.

Hierbei wird auf Pilotprojekte in Österreich, Norwegen und vielen anderen Ländern hingewiesen, wo bereits Hochhäuser (überwiegend) in Holzbauweise errichtet werden. Aktuelle Bau-Normen und Brandschutzvorschriften in Deutschland tragen dieser Entwicklung noch nicht in ausreichendem Maße Rechnung.

Die Ermittlung der CO₂-Emissionen durch die Errichtung bzw. Sanierung von Gebäuden bzw. deren Abbruch ist jedoch nicht Bestandteil der weiteren Betrachtungen im Rahmen dieses Konzeptes.

5.3 Strategien zur Klimaneutralität im Gebäudesektor

Die aktuellen gesetzlichen Vorgaben im Gebäudesektor sind nicht ausreichend, um die nationalen Klimaschutzziele zu erreichen.

Daher ist es zu begrüßen, dass auf regionaler und kommunaler Ebene erhöhte Anforderungen an Gebäude gestellt werden. Unterstützt werden diese Ziele durch regionale Förderprogramme und bundesweite Programme, wie das BEG (Bundesförderung energieeffiziente Gebäude).

5.3.1 Nachhaltige und netzdienliche Gebäudestandards

Reduzierung des Energiebedarfs:

In erster Linie ist auf eine maximale Reduzierung des Energiebedarfs bei Neubauten und Sanierungen zu achten. Im Vordergrund steht eine Reduzierung des Heizenergiebedarfs, da dieser im Wesentlichen im Winterhalbjahr wirksam ist, wenn regenerative Energien auf Basis von Sonne und Wind nicht in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen. Dadurch entlasten hochgedämmte Gebäude die Netze.

Ebenso ist auf einen reduzierten Warmwasser-, Kühl- und Strombedarf zu achten.

Der verbleibende Energiebedarf muss dann CO₂-neutral durch regenerative Energiequellen gedeckt werden.

Im Neubaubereich sollten Gebäude so geplant werden, dass sie mehr Energie produzieren, als sie im Betrieb verbrauchen, auch um den „Rest“-Bedarf der Bestandsgebäude, die oft Denkmäler sind, mit decken zu können.

Eine energetische Sanierung (ggf. mit Erweiterung) ist aus Sicht einer Gesamtklimabilanz einem Ersatzneubau vorzuziehen. Bei der energetischen Sanierung lassen sich unter Einhaltung erhöhter und netzdienlicher Standards annähernd so gute Ergebnisse bezüglich des Energieverbrauchs im Betrieb erzielen wie bei einem Neubau, bei gleichzeitig deutlich niedrigeren Gesamt-CO₂-Emissionen.

Bei guter Planung kann auch hier das Gebäude so viel Energie erzeugen, wie es im Jahresbetrieb verbraucht.

Der zusätzliche CO₂-Ausstoß durch die graue Energie ist selbst bei einem Neubau im Passivhaus-Standard (im Wesentlichen durch Beton und Zement) i.d.R. höher als die erzielten Einsparungen beim Verbrauch, im Vergleich zu einer vollumfänglichen energetischen Sanierung.

Der Abriss von Gebäuden sollte durch eine Stoff- bzw. Gesamt-CO₂-Bilanz im Vorfeld gründlich geprüft werden.

Netzdienlichkeit:

Alle Akteure - Abnehmer mit ihrem Lastverhalten und alle Einspeiser in ein Netz - verhalten sich so, dass Versorgungssicherheit gewährleistet ist und die Infrastruktur nicht auf Last- oder Erzeugungsspitzen dimensioniert werden muss.

Gebäude können auf vielfältige Weise netzdienlich sein:

- Die Senkung des Energiebedarfs reduziert gleichzeitig den Bedarf an Erzeugungsanlagen, Netzinfrastruktur und Speicher.
- Die Reduzierung des Wärmebedarfs wirkt sich besonders stark aus, wenn der Bedarf besonders hoch ist (kalter Winter) und die Erzeugung von erneuerbaren Energien am geringsten.
- Besonders gut gedämmte Gebäude können selbst als Wärmespeicher fungieren. Durch den hohen Dämmstandard ist die Raumtemperatur über längere Zeiträume annähernd konstant. Damit kann der Zeitpunkt der Wärmeerzeugung innerhalb gewisser Grenzen frei bestimmt werden.
- Mit dem Einbau von zusätzlichen Wärmespeichern (Heizungs-Pufferspeicher) können diese Grenzen weiter ausgedehnt werden.
- Bivalente Wärmeerzeugung: Durch den Einbau von zwei Wärmeerzeugern (Gas-Kessel/Gas-BHKW und Wärmepumpe) kann je nach Verfügbarkeit des erneuerbaren Stroms die Art der Wärmeerzeugung angepasst werden und es kann Strom in das Netz eingespeist werden.
- Stromseitig können Gebäude mit PV-Anlagen und Stromspeicher eine Belastung des Netzes durch zu viel PV-Einspeisung (Peak-Zeiten) reduzieren und helfen, Schwankungen in der Erzeugung auszugleichen.
- Der Speicher kann auch dem Energieversorger oder einem Strom-Cloud-Betreiber für netzdienliche Funktionen zur Verfügung gestellt werden. Dies kann z.B. durch direkte Zahlungen oder einen günstigeren Stromtarif vergütet werden.

Wärme- und Warmwasserbedarf:

Bei der Reduzierung des Wärmebedarfs lassen sich die größten Einsparpotentiale erschließen. Einsparungen bis zu 90% gegenüber dem Gebäudebestand sind möglich und wirtschaftlich umsetzbar.

Zusätzlich erhöht ein verbesserter Wärmeschutz den thermischen Komfort.

Je besser der Wärmeschutz, umso weiter lassen sich Wärmebedarf und Wärmeerzeugung zeitlich entkoppeln.

Bei einer zeitlichen Anpassung der Wärmeerzeugung (z.B. mit Wärmepumpen) an die Stromerzeugung durch Wind und PV können teure Strom-Kurzzeitspeicher eingespart werden. Dies erleichtert die Nutzung der stark fluktuierenden erneuerbaren Energien.

Hybride Wärmeerzeugung:

Bei Gebäuden, die nicht durch Fernwärme versorgt werden, kann durch eine netzdienliche, hybride Wärmeerzeugung ein großer Beitrag zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes geleistet und gleichzeitig der Ausbau der erneuerbaren Energien unterstützt werden.

In der kalten Jahreszeit ist der Heizwärmebedarf am größten und es stehen wenig erneuerbare Energien zur Verfügung. Jedoch gibt es auch im Winter Zeiten mit Stromüberschüssen, z.B. bei starkem Wind. Bei einem monovalenten Heizsystem z.B. auf Basis von Gas oder Biomasse kann dieser Stromüberschuss nicht genutzt werden.

Beim weiter voranschreitenden Einsatz von Wärmepumpen zur Beheizung kann sich der Mangel an regenerativen Energien im Stromnetz im Winter weiter verschärfen.

Es kann zu sehr hohen Lastspitzen im Netz kommen, die dann ggf. mit fossil erzeugtem Strom abgedeckt werden müssen.

Eine hybride Wärmeerzeugung mit BHKW und Wärmepumpe ermöglicht es darüber hinaus, durch verschiedene Betriebsweisen auf die jeweiligen Gegebenheiten im Stromnetz zu reagieren (siehe auch Hypothesen 5 und 6). Damit kann je nach Angebot im Stromnetz, zwischen einer strombasierten und einer gasbasierten Wärmeerzeugung variiert und damit zu einer Stabilisierung des Stromnetzes beitragen werden.

Biomasse als Wärmequelle:

Biomasse ist eine weitere Option zur CO₂-neutralen Wärmeversorgung. Sie steht allerdings nicht in ausreichendem Maße für eine flächendeckende Anwendung zur Verfügung, um einen entscheidenden und nachhaltigen Beitrag leisten zu können. Auch bei der Biomasse gilt die Prämisse der möglichst effizienten Nutzung. So ist die direkte Nutzung der Biomasse für Heizzwecke relativ ineffizient.

Strom:

Stromeffizienz spielt eine große Rolle beim Erreichen der Effizienzziele.

Der Stromverbrauch wird weiter zunehmen, durch den hohen technischen Installationsgrad der Gebäude, erhöhte Automatisierung, zusätzlichen Einbau von Lüftungsanlagen, Einsatz von Wärmepumpen, Ladung von E-Fahrzeugen und ggf. in Zukunft verstärkt Kühlung.

Der Einsatz besonders stromeffizienter Technik ist deshalb umso wichtiger.

Luftqualität und Hygiene:

Mechanische Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung senken den Heizwärmebedarf und verbessern gleichzeitig die Raumluftqualität.

Auch die hygienischen Konditionen in den Innenräumen werden dadurch deutlich verbessert.

Der Einsatz von mechanischen Lüftungsanlagen mit hohen Wärmerückgewinnungsgraden ist daher bei Neubauten und Sanierungen sinnvoll.

Kühlung und sommerlicher Komfort:

Sommerlicher Wärmeschutz wird am effizientesten durch einen gut geplanten außenliegenden, beweglichen Sonnenschutz gewährleistet und durch Optimierung der Verglasungsflächen auf das zur Belichtung erforderliche Maß.

Zusätzlich kann durch die Aktivierung von Speichermassen und den Einsatz freier Nachtlüftung der sommerliche Komfort verbessert und weitgehend auf den Einsatz von aktiver Kühlung verzichtet werden.

Durch die steigenden sommerlichen Temperaturen wird jedoch der Einsatz von aktiver Kühlung in Zukunft möglicherweise zunehmend notwendiger werden.

In Neubauten oder bei Generalsanierungen sollte diese Option daher bereits mit bedacht werden.

So können Lüftungs- und Heizsysteme, wie Betonkernaktivierung oder Wandheizung, bereits für eine spätere Kühlfunktion vorbereitet werden.

Bereits in der Planung könnten Lüftungs- und Heizverteilsysteme für eine Kühlfunktion vorgerüstet werden, z.B. durch den Einsatz von geeigneten Leitungsdämmungen.

Verkehr:

Kommunale Gebäude können nur einen geringen Beitrag zur Dekarbonisierung des Verkehrs leisten.

Die Nutzung von Fahrrädern könnte attraktiver gemacht werden, z.B. durch ausreichende Bereitstellung von Fahrradstellplätzen, ggf. mit Lademöglichkeiten für E-Bikes, und die Beschaffung von Dienst-(Lasten-)Fahrrädern.

Auch Stellplätze für E-Mobile mit netzdienlicher Lademöglichkeit können geschaffen werden. Diese liefern nur Strom, wenn erneuerbare Stromüberschüsse im Netz vorhanden sind und tragen so zur Entlastung und Stabilisierung des Stromnetzes bei.

Alle Stellplätze sollten daher grundsätzlich mit Zuleitungen oder Leerrohren für zukünftige Vehicle-to-Grid(V2G)-Nutzungen vorgerüstet werden.

Dadurch können geparkte E-Fahrzeuge zukünftig nicht nur netzdienlich be-, sondern auch entladen werden und zur Stabilisierung der Energieversorgung beitragen.

5.3.2 Energieerzeugung am Gebäude

Die Möglichkeit der Energieerzeugung am Gebäude ist in gewissem Maße möglich, beschränkt sich aber auf wenige Technologien.

Photovoltaik an Gebäuden (PV):

Großes Potential liegt in der Nutzung der Solarenergie an Gebäuden in Form von Photovoltaik. Diese ist aus ökologischer und ökonomischer Sicht sinnvoll. Die Stromerzeugung am Gebäude ist zwar teurer (ca. 6-12 ct/kWh) als die Erzeugung von PV-Strom in Freiflächenanlagen (ca. 4-6 ct/kWh), jedoch entfallen die Netzgebühren und andere Umlagen (je nach aktueller Gesetzeslage), wodurch der am Gebäude erzeugte und im Gebäude verbrauchte PV-Strom erheblich günstiger ist.

Durch den zusätzlichen Einbau von Kurzzeitspeichern in Gebäuden kann der Anteil des selbst erzeugten Stroms am Gesamtstrombedarf noch deutlich erhöht werden.

Die Energieerzeugung am Gebäude ist in mehrfacher Hinsicht bedeutend. Zum einen entlastet sie die Netze (und spart hohe Durchleitungsgebühren), zum anderen stehen im urbanen Bereich kaum und im ländlichen Raum nicht in unbegrenztem Umfang Freiflächen zur Erzeugung erneuerbarer Energien zur Verfügung.

Geothermie an Gebäuden:

Oberflächennahe Geothermie in Verbindung mit Wärmepumpen kann sehr effizient Umweltwärme nutzen. Durch Erdsonden kann der Wirkungsgrad (Arbeitszahl) der Wärmepumpen erheblich erhöht werden. Gerade bei besonders niedrigen Außentemperaturen wirkt sich dies positiv aus, da die Temperaturen im Erdreich auch im Winter weitgehend stabil sind.

Blockheizkraftwerke (BHKW) an Gebäuden:

BHKWs werden in Zukunft einen wichtigen Beitrag zum netzdienlichen Betrieb von Gebäuden spielen: Zu Zeiten von EE-Stromknappheit können sie neben Wärme auch Strom erzeugen und tragen zur Stabilisierung des Stromnetzes bei. Sie können zunächst mit fossilem Gas betrieben und dann zunehmend auf „grünes“ synthetisches Methan (oder Wasserstoff) aus EE (erneuerbaren Energien) umgestellt werden.

Sonstige Energieerzeuger an Gebäuden:

Windkraft an Gebäuden und im Stadtraum kann i.d.R. keinen signifikanten Betrag zur Deckung des Energiebedarfes leisten und wird daher in diesem Konzept nicht weiter betrachtet.

Andere Systeme zur CO₂-neutralen Wärme- bzw. Stromerzeugung mit Holz oder anderer Biomasse können in Einzelfällen sinnvoll sein.

5.3.3 CO₂-Neutrale Wärmeerzeugung und Energieträger

CO₂-Neutralität bei der Fernwärme:

Die Fernwärme spielt eine sehr wichtige Rolle bei der Erreichung der Klimaziele, da hier mit wenigen Maßnahmen relativ schnell große Fortschritte erzielt werden können.

Zum anderen werden durch den Einsatz großer KWK-Anlagen (Kraft-Wärme-Kopplung) die CO₂-Emissionen bei gleichzeitiger Strom- und Wärmeproduktion gesenkt.

Durch den Einsatz von Biomasse (Pellets oder Hackschnitzel) in BHKWs zur Produktion von Fernwärme, kann die CO₂-Bilanz heute schon ohne große Mehrkosten verbessert werden. Allerdings ist Biomasse nur in begrenztem Umfang verfügbar und sollte daher moderat und möglichst effizient eingesetzt werden.

Ein Ausbau des Fernwärmenetzes bzw. eine Erhöhung der Anschlussquoten ist wünschenswert, jedoch bis 2035 sicher nur in sehr begrenztem Umfang umsetzbar.

Der erneuerbare Anteil der Nürnberger Fernwärme beträgt derzeit 8% aus Biomasse und 19% aus der Müllverbrennung mit ca. 60% biogenem Anteil. Als CO₂-neutral können 21,3% angesetzt werden.

CO₂-Neutrale Wärmeversorgung ohne Fernwärme:

Versorgung mit synthetischem Gas (Power-to-Gas) aus erneuerbaren Energien

Mit Stromüberschüssen auf Basis erneuerbarer Energien im Sommer (PV und Windenergie) kann synthetisches Gas zur Speicherung erzeugt werden. Dieses Gas kann im Winter, wenn weniger erneuerbare Energien zur Verfügung stehen, CO₂-neutral genutzt werden.

Bei einer Versorgung von Gebäuden ohne Fernwärme auf Basis von Wasserstoff besteht das Problem, dass zurzeit weder Netze noch Speicher in nennenswertem Umfang vorhanden sind. Ohne ein engmaschiges Wasserstoffnetz im städtischen Raum müsste daher an zentraler Stelle Wasserstoff erzeugt, saisonal gespeichert und dann zu den Gebäuden transportiert werden. Dies würde in den Gebäuden den zusätzlichen Einbau von Wasserstofftanks und neuen Wärmeerzeugern erfordern.

Eine Weiterverarbeitung des Wasserstoffs zu Methan (Sabatier-Prozess) ist zwar mit weiteren Umwandlungsverlusten verbunden,

jedoch könnten nicht nur das vorhandene Gasnetz weiter genutzt werden, sondern auch die vorhandenen Wärmeerzeuger in den Gebäuden. Damit würden auch die zusätzlichen Gasspeicher vor Ort entfallen. Aus diesen Erwägungen heraus wird die direkte Wasserstoffnutzung in dieser Studie nicht weiter vertieft.

Eine Versorgung mit klassischem Biogas wird aus Gründen der Nachhaltigkeit und Skalierbarkeit ebenfalls nicht weiter untersucht.

Wärmeerzeugung mit Wärmepumpen

Alle Gebäude, die nicht mit Fernwärme versorgt werden, müssen sukzessive auf Wärmepumpen, möglichst mit Erdsonden, umgerüstet werden.

Diese Wärmepumpen sollten möglichst mit 100% regenerativ erzeugtem Strom versorgt werden.

Leider steht gerade in der Heizperiode weniger Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung als im Sommerhalbjahr. Durch starken Ausbau der Wärmeversorgung über Wärmepumpen könnte sich die Stromknappheit im Winterhalbjahr somit noch weiter verschärfen.

Wärmeerzeugung mit BHKW

Wie bereits beschrieben, können BHKWs in Gebäuden eine wichtige Rolle spielen, wenn sie netzdienlich eingesetzt werden. Sie werden in diesem Konzept noch ausführlicher betrachtet.

Hybride Heizsysteme

Die Kombination aus BHKWs und Wärmepumpen (hybride Heizsysteme) stellen ein besonders netzdienliches Heizsystem dar, da sie je nach Netzauslastung unterschiedliche Energieträger (Strom oder Gas) nutzen können, so zur Stabilisierung des Stromnetzes beitragen und damit die Grundlagen zum weiteren Ausbau der EE verbessern.

Wärmeerzeugung mit Biomasse

In manchen Fällen kann der Einsatz von Hackschnitzeln, Holz-Pellets oder Pflanzenöl zur Beheizung sinnvoll sein. Im innerstädtischen Bereich sind Logistik- und Feinstaubprobleme zu berücksichtigen. Gerade bei der Biomasse gilt es, eine möglichst effiziente Nutzung zu erzielen, da die Ressourcen nur in begrenztem Umfang zur Verfügung stehen und ein großflächiger Einsatz nicht nachhaltig ist. Daher ist auch bei der Biomasse die Kraft-Wärme-Kopplung der ausschließlichen Verwendung für Heizzwecke vorzuziehen.

6 Bestandsanalyse

6.1 Datengrundlage

6.1.1 Verbrauchsdaten

Als Grundlage für dieses Konzept wurden Gebäude- und Verbrauchsdaten der vom Sachgebiet Kommunales Energiemanagement und Bauphysik (KEM) im Hochbauamt erfassten städtischen Liegenschaften analysiert und ausgewertet.

6.1.2 Energieträger

Strom, Gas und Fernwärme werden vom Energieversorger N-ERGIE bezogen.

Strom:

Der Anteil erneuerbarer Energien beim Strom beträgt aktuell (2019) 60,5%.

Die CO₂-Emissionen betragen 0,278 kg/kWh.

Fernwärme:

Der Anteil der CO₂-neutralen Energieträger bei der Fernwärmeerzeugung beträgt aktuell (2019) 21,3%.

Die CO₂-Emissionen betragen 0,144 kg/kWh.

Gas:

Die Gasversorgung erfolgt mit konventionellem fossilem Erdgas.

Der Anteil erneuerbarer Energien beträgt aktuell (2019) 0%.

Die CO₂-Emissionen betragen 0,202 kg/kWh.

6.2 Analyse der Datengrundlage

Die Gebäude und Anlagen wurden in folgende Kategorien eingeteilt und ausgewertet:

- **Art der Wärmeversorgung:**
Fernwärme / ohne Fernwärme
- **Sanierungspotential:**
Neubau / saniert / unsaniert
- **Mögliche Sanierungstiefe (Wärme und Strom):**
Denkmalschutz / Ensembleschutz / kein Denkmal

6.2.1 Wärmeversorgung

Zunächst wurde ausgewertet, welche Gebäude mit Fernwärme versorgt werden.

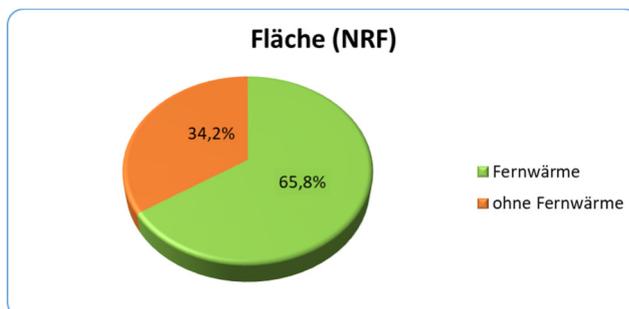


Abb. 16: Anteile der mit und ohne Fernwärme beheizten Gebäude

Etwa 66 % der Netto-Raumfläche (NRF) stadteigener Gebäude wird mit Fernwärme versorgt.

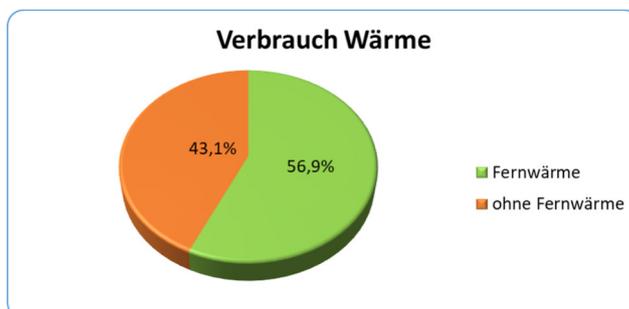


Abb. 17: Anteile Wärmeverbrauch mit und ohne Fernwärme

Dies entspricht ca. 57% des Wärmeverbrauches.

6.2.2 Sanierungspotential

Die Analyse hinsichtlich des Sanierungspotentials ergab, dass ca. 67% der Gebäudeflächen (NRF) nicht saniert sind bzw. hohes Sanierungspotential haben.

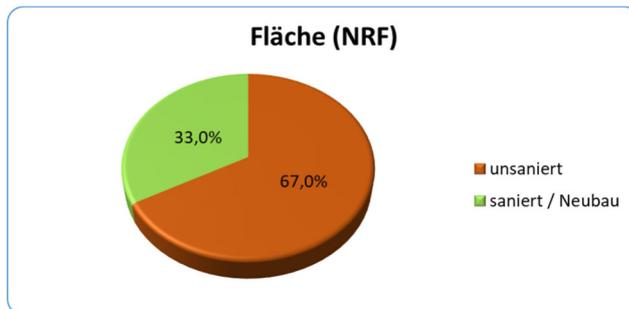


Abb. 18: Anteile sanierte und unsanierte Gebäudeflächen

6.2.3 Sanierungstiefe (Wärme und Strom)

Denkmäler bzw. Gebäude unter Ensembleschutz lassen sich i.d.R. etwas weniger „tief“ sanieren als Gebäude ohne Denkmalschutz. D.h., das Einsparpotential beim Wärmebedarf fällt hier etwas geringer aus. Daher wurden zur Bestimmung des möglichen Sanierungserfolges die Gebäude zusätzlich nach den folgenden Kriterien ausgewertet:

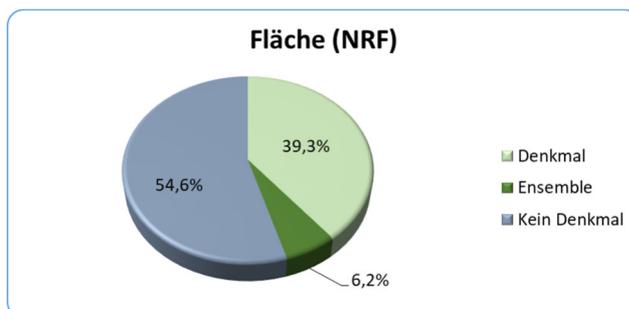


Abb. 19: Anteile Denkmalschutz

Im Stromverbrauch unterscheiden sich die Bestandsgebäude nur gering. Durch die zunehmende technische Ausstattung steigt der Strombedarf bei Neubauten und Sanierungen etwas an.

6.3 Auswertung der Daten und Schlussfolgerungen

Nach einer weiteren Kombination von Auswahlkriterien ergibt sich folgendes Bild:

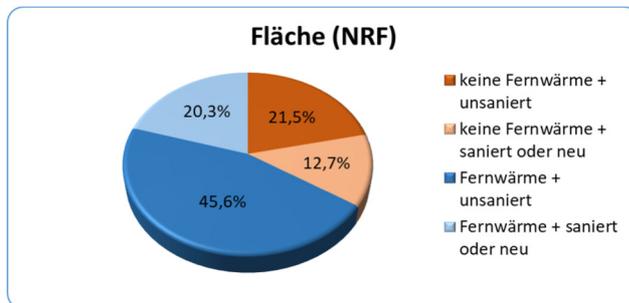


Abb. 20: Aufteilung der Gebäude

Ca. 22% der Gebäude (flächenbezogen) haben hohes Sanierungspotential und sind ohne Fernwärmeanschluss.

Ca. 46% der Gebäude (flächenbezogen) haben hohes Sanierungspotential und werden mit Fernwärme versorgt.

Die spezifischen Wärmeverbräuche (nicht witterungsbereinigt; Datenbasis Jahr 2019), also der Verbrauch pro m² und Jahr (ohne Sondergebäude wie z.B. Schwimmbäder), stellen sich wie folgt dar:

| Wärmeverbrauch unsanierter Gebäude | | | | | |
|--|--------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Keine Fernwärme | | | Fernwärme | | |
| Kein Denkmal | Denkmal | Ensemble | Kein Denkmal | Denkmal | Ensemble |
| 139 kWh/m ² a | 167 kWh/m ² a | 105 kWh/m ² a | 97 kWh/m ² a | 103 kWh/m ² a | 103 kWh/m ² a |
| möglicher Sanierungserfolg - Reduzierung um x% (Erfahrungswerte aus Sanierungen) | | | | | |
| 75% | 50% | 60% | 75% | 50% | 60% |
| Mögliche Einsparung von | | | | | |
| 104 kWh/m ² a | 83 kWh/m ² a | 63 kWh/m ² a | 73 kWh/m ² a | 52 kWh/m ² a | 62 kWh/m ² a |

Abb. 21: Spezifische Wärmeverbräuche und Einsparpotentiale

Diese Auswertung der Verbrauchsdaten zeigt, dass bei der Gruppe „Gebäude ohne Fernwärme“ (mit und ohne Denkmalschutz) die größten Sanierungserfolge erzielt werden können.

Empfehlung:

Da die Sanierungskosten pro Flächeneinheit bei allen Objektgruppen annähernd gleich sind, sollten aus ökonomischer Sicht diese Gebäudegruppen - wo möglich - bei der Sanierung priorisiert werden.

7 Maßnahmenentwicklung

Vorgehensweise:

Zur Abschätzung und Bewertung der Effizienz und der Kosten verschiedener Lösungsansätze wurden Arbeitshypothesen für die verschiedenen technologischen Pfade aufgestellt, untersucht und verglichen.

Dabei wurden Maßnahmen betrachtet die vom Energieversorger sowie Maßnahmen, die durch die Stadt selbst umgesetzt werden müssen.

Die beschriebenen Maßnahmen durch den Energieversorger beziehen sich nur auf die Bedarfsdeckung für die städtischen Gebäude und nicht auf die Gesamtstadt. Sie sollten aber bei einer Gesamtstrategie des Energieversorgers berücksichtigt werden.

Die Hypothesen sind zunächst vereinfachte Ansätze. Sie sollen dazu dienen, aus der unübersichtlichen Vielzahl von möglichen Szenarien eine Orientierungshilfe abzuleiten.

| Maßnahmen des Energieversorgers zur Reduzierung des CO ₂ -Ausstoßes | |
|---|--|
| Hypothese 1 | Wärmeerzeugung über Power-to-Gas |
| Hypothese 2 | Wärme- und Stromerzeugung über Power-to-Gas und BHKW |
| Hypothese 3 | Wärme- und Stromerzeugung über Holzgas-BHKW |
| Maßnahmen der Kommune an stadteigenen Gebäuden zur Reduzierung des CO ₂ -Ausstoßes | |
| Hypothese 4 | Gebäudesanierung |
| Hypothese 5 | Umrüstung auf hybride Heizsysteme BHKW+Wärmepumpe |
| Hypothese 6 | Nachrüstung von Wärmepumpen |
| Hypothese 7 | PV auf stadteigenen Gebäuden (mit Speichern) |

Abb. 22: Übersicht der Hypothesen

In einem ersten Schritt soll die Wirtschaftlichkeit verschiedener Technologien verglichen werden, um die am besten geeigneten Varianten zu identifizieren bzw. ungeeignete auszuschließen.

Aus den geeigneten Hypothesen wird dann eine Synthese gebildet, die dann in differenzierteren Szenarien genauer untersucht und verglichen werden.

Die Hypothesen betrachten nicht nur einen Gesamtansatz zu heutigen Kosten, sondern auch Prognosen zur Kostenentwicklung in der Zukunft. Gerade bei Technologien zur Speicherung sind die Kosten in den letzten Jahren erheblich gefallen. Bei einer Fortsetzung dieses Trends durch vermehrten Einsatz und damit höheren Stückzahlen ist eine Fortsetzung dieser Preisentwicklung zu erwarten. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die Kosteneffizienz der Hypothesen bzgl. der Zeitachse. Technologien, die heute noch extrem teuer sind, können in einigen Jahren mit den Kosten fossiler Energieträger konkurrieren oder diese sogar unterbieten.

Ebenso sind bei noch nicht voll ausgereiften Technologien in Zukunft weitere Verbesserungen bei den Wirkungsgraden zu erwarten.

Daher wird neben der Betrachtung der heutigen Kosten auch eine Kostenprognose für die Jahre 2025 – 2050 in 5-Jahres-Schritten erstellt.

Annahmen:

Für die weiteren Betrachtungen gelten folgende Randbedingungen und grundlegende Annahmen:

| | |
|---|-----------------------------|
| Preissteigerung Fernwärme | 2,0 % / Jahr |
| Preissteigerung Gas | 2,0 % / Jahr |
| Preissteigerung Strom | 2,0 % / Jahr |
| Preissteigerung Baukosten/Sanierung | 3,2 % / Jahr |
| Klimakosten / CO ₂ Folgekosten (linear ansteigend) Quelle: Umweltbundesamt 2018 „Empfehlungen zu den Klimakosten“ | von 180 bis 240 EUR / Tonne |
| Reduzierung des Wärmebedarfs durch Klimaerwärmung | 0,29% / Jahr |
| Erhöhung des Stromverbrauches durch erhöhte technische Ausstattung und steigenden Kühlbedarf | 0,5% / Jahr |
| Zubau (Neubauten) pro Jahr | 1 % / Jahr |

Abb. 23: Übersicht Randbedingungen für Hypothesen

Maßnahmen an der Energieversorgung durch den Energieversorger

7.1 Hypothese 1 - Power-to-Gas (PtG)

Photovoltaik + Li-Ionen-Speicher + Power-to-Gas + Gaskessel

CO₂-neutrale Deckung des Wärmebedarfs:

In dieser Arbeitshypothese wird postuliert, dass der gesamte Wärmebedarf der hier betrachteten Liegenschaften durch synthetisches Gas abgedeckt wird. Dieses Gas wird im Sommer zu 100% auf Basis erneuerbarer Energien erzeugt.

Zur Vereinfachung wird ausschließlich von Photovoltaik als Energiequelle ausgegangen. Zum einen ist aufgrund politischer Rahmenbedingungen der Ausbau der Windenergie in der Metropolregion ins Stocken geraten. Zum anderen stehen nicht mehr so viele freie, windreiche Standorte, die geeignet wären, zur Verfügung. Die Nutzung von mehr Windenergie in der Metropolregion würde die Hypothesen nochmals effizienter und kostengünstiger machen.

Aus dem erneuerbar erzeugten Strom wird zunächst durch Elektrolyse Wasserstoff hergestellt. In einem weiteren Schritt wird der Wasserstoff zu Methan (synthetisches „Erdgas“) weiterverarbeitet.

Zur gleichmäßigeren Auslastung der Anlagen im Sommer sind Strom-Kurzzeitspeicher erforderlich, die die Schwankungen in der PV-Produktion sowie die Tag-Nacht-Zyklen weitgehend ausgleichen können und eine wirtschaftlichere Nutzung der Power-to-Gas (P2G)-Anlagen gewährleisten.

Das synthetisch hergestellte Methan kann im Gasnetz und den bereits vorhandenen Kavernenspeichern vom Sommer bis in die Heizperiode gespeichert werden. Hierfür sind keine großen Infrastruktur-Investitionen erforderlich.

Im Winter kann das synthetische Methan (analog und in jedem Mischungsverhältnis zum Erdgas) in konventionellen Wärmeerzeugern (Gaskesseln) in Wärme umgewandelt werden.

Die Gesamtsystemeffizienz beträgt aufgrund der zahlreichen Umwandlungsverluste nur ca. 27% (19,75% wärmeseitig + 7,4% stromseitig). Bei einer 50/50-Aufteilung des PV-Stroms für Wärme- bzw. Stromerzeugung im Winter ergibt sich ein Wirkungsgrad des Systems auf der Wärmeseite von 39,5% (19,75% / ½).

D.h. für eine Kilowattstunde Wärme (kWh), die im Winter genutzt werden kann, müssen im Sommer ca. 2,6 kWh PV-Strom erzeugt werden. 61% gehen bei der Umwandlung verloren. Darüber hinaus sind die Investitionen in die dafür erforderliche Anlagentechnik erheblich.

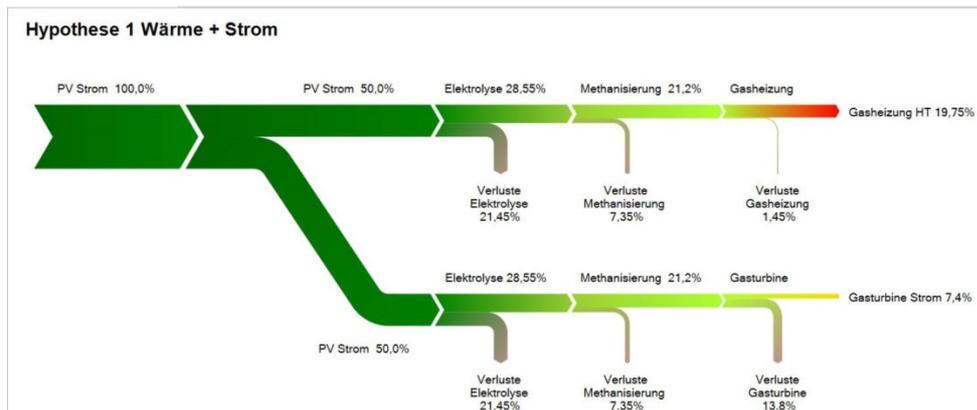


Abb. 24: Wärmeerzeugung über PtG Hypothese1: Systemeffizienz ca. 27% (19,75+7,4) bei 50/50-Aufteilung des PV-Stroms für Wärme- bzw. Stromerzeugung im Winter

Allein zur Deckung des Wärmebedarfs für alle Liegenschaften wäre eine PV-Fläche von ca. 400 Hektar (ca. 4 Mio. m², etwa 560 Fußballfelder) erforderlich. Diese PV-Fläche wäre dreimal so groß wie die Nürnberger Altstadt.

Der resultierende Wärmepreis würde auf ca. 30 Eurocent pro Kilowattstunde (hochgerechnet für 2025) steigen und damit etwa um den Faktor 3 höher sein als heute.

Die Ausgaben reduzieren sich mit der Zeit, da für die eingesetzten Technologien erhebliche Kostenreduzierungen in der Zukunft zu erwarten sind.

CO₂-neutrale Stromerzeugung:

PV-Strom Direktnutzung

Es wird davon ausgegangen, dass ca. 30% des jährlichen Strombedarfs direkt durch erzeugten PV-Strom gedeckt werden (also zeitgleiche Erzeugung und Verbrauch). Die Erzeugung des PV-Stroms kann in Freiflächenanlagen, oder besser möglichst direkt an den Gebäuden selbst, erfolgen.

PV-Strom - Kurzzeitspeicherung

Etwa 20% des jährlichen Strombedarfs können über Kurzzeitspeicher gedeckt werden. Dies sind im Wesentlichen Lithium-Ionen-Speicher (oder vergleichbare Systeme), die mit sehr hoher Effizienz, aber derzeit noch mit sehr hohen Kosten, die Schwankungen bei der Erzeugung ausgleichen und den Tag-Nacht Zyklus abpuffern.

PV-Strom - saisonale Speicherung

Die verbleibenden 50% des Jahresbedarfs müssen über saisonale Speicher vom Sommer in den Winter verschoben werden. Hier wird eine analoge Technologie wie bei der Wärmeversorgung angesetzt. Im Sommer wird synthetisches Gas erzeugt und im Gasnetz gespeichert. Im Winter wird dieses Gas in Gasturbinen wieder in Strom zurück gewandelt.

Die geringen Wirkungsgrade der Gasturbinen führen zusammen mit den niedrigen Wirkungsgraden der synthetischen Gasherstellung zu einem sehr ungünstigen Gesamt-System-Wirkungsgrad.

So ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad für die Stromerzeugung mit saisonaler Speicherung von ca. 15% (7,4% / $\frac{1}{2}$).

D.h. für 1 kWh CO₂-neutralen Stroms im Winter müssen im Sommer 6,6 kWh PV-Strom erzeugt werden. 85% gehen bei der Umwandlung verloren.

| | |
|---|--------------|
| resultierender Wärmegestehungspreis in 2025 [EUR/kWh] | ca. 0,30 EUR |
| resultierender Stromgestehungspreis in 2025 [EUR/kWh] | ca. 0,35 EUR |

Abb. 25: resultierender Wärme- und Stromgestehungspreis Hypothese 1

7.2 Hypothese 2 - Power-to-Gas + Kraft-Wärme-Kopplung (PtG+KWK)

Photovoltaik + Li-Ionen-Speicher + Power-to-Gas + Kraft-Wärme-Kopplung

CO₂-neutrale Wärmeerzeugung:

Die Wärmeerzeugung in Hypothese 2 ist weitgehend analog zu Hypothese 1, jedoch wird nun zur Verbesserung von Effizienz und Wirtschaftlichkeit Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt. D.h. es werden bei der Umwandlung des synthetischen Methans sogenannte Blockheizkraftwerke (BHKW) genutzt. Dabei wird über einen Gasmotor Strom produziert und die entstehende Abwärme zum Heizen verwendet. Dadurch wird die Gesamteffizienz verbessert.

Hypothese 2 Wärme + Strom

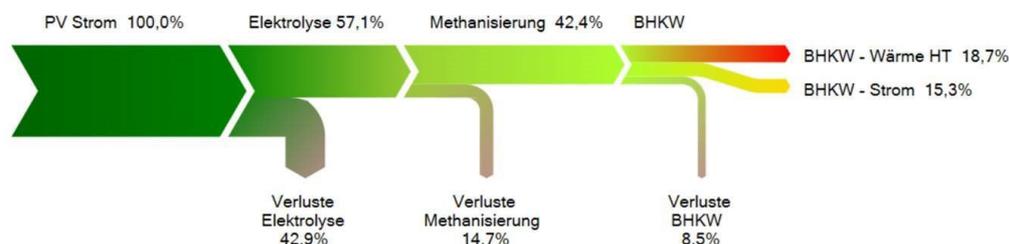


Abb. 26: Wärmeerzeugung über PtG+KWK Hypothese 2: Systemeffizienz ca. 34% (18,7% +15,3%)

CO₂-neutrale Stromerzeugung:

Die Stromerzeugung ist weitgehend analog zu Hypothese 1, jedoch wird im Winterhalbjahr der Strom über Blockheizkraftwerke erzeugt. Der Systemwirkungsgrad verbessert sich dadurch auf 34 %.

Dies zeigt, dass der Einsatz der Kraft-Wärme-Kopplung zur Verbesserung der Effizienz des Gesamtsystems beiträgt und damit ein wichtiger Baustein zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit einer CO₂-neutralen Energieversorgung ist.

Alternativ zur KWK könnten auch Brennstoffzellen eingesetzt werden. Bei dieser Technologie werden ebenfalls Strom und Wärme erzeugt, jedoch ist der Wirkungsgrad beim Stromanteil etwas höher als bei

einem Blockheizkraftwerk. Diese Systeme sind jedoch zurzeit noch erheblich teurer als Blockheizkraftwerke und haben eine geringe Lebensdauer. In der Zukunft kann mit sinkenden Preisen der Einsatz von Brennstoffzellen jedoch vorteilhaft werden.

| | |
|---|----------|
| resultierender Wärmegestehungspreis in 2025 [EUR/kWh] | 0,22 EUR |
| resultierender Stromgestehungspreis in 2025 [EUR/kWh] | 0,31 EUR |

Abb. 27: resultierender Wärme- und Stromgestehungspreis Hypothese 2

7.3 Hypothese 3 - Biomasse + Kraft-Wärme-Kopplung (Bio + KWK)

Photovoltaik + Li-Ionen-Speicher + Holzgas-BHKW + Wärmepumpen

CO₂-neutrale Wärmeerzeugung:

Alternativ zur Erzeugung von synthetischem Gas mit relativ schlechten Wirkungsgraden und damit verbundenen hohen spezifischen Kosten wird die Verwendung von Biomasse als Energieträger untersucht. Hier wird die Verwendung von Restholz (Äste, Kronen, Rinden und Schadholz) aus der Forstwirtschaft betrachtet, die nicht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion oder der Bauholznutzung steht.

Wie in den vorhergehenden Hypothesen gezeigt wurde, ist die Kombination mit KWK ein Schlüssel zur effizienten Energienutzung. Dies gilt ebenso für die Biomasse, welche auch unter Nachhaltigkeitskriterien zu wertvoll ist, um sie nur zur Wärmegewinnung zu verbrennen.

Daher wird hier ein System betrachtet, dass Holzgas erzeugt, welches in einem Blockheizkraftwerk in Strom und Wärme umgewandelt wird. Die untersuchte Anlagenvariante beinhaltet noch eine weitere Komponente mit positiver Wirkung: bei der Holzgasproduktion kann Kohlenstoff und damit CO₂ als Feststoff in Form von Pflanzenkohle ausgekoppelt werden. Es wird damit dauerhaft der Atmosphäre entzogen.

Die Pflanzenkohle (oder Biochar) kann als Dünger zur Bodenverbesserung eingesetzt werden. Weitere Anwendungen sind möglich. Hierbei wird das CO₂ dauerhaft gebunden. Der Prozess kann daher nicht nur als CO₂-neutral betrachtet werden, sondern sogar als CO₂-negativ. In der weiteren Betrachtung wird der Prozess als CO₂-neutral angesehen.

Hypothese 3 Wärme + Strom

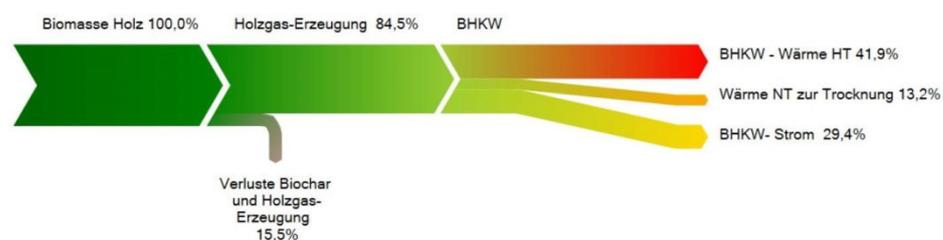


Abb. 28: Wärmeerzeugung über Biomasse+KWK Hypothese 3: Systemeffizienz ca. 70,5% (41,9%+29,4%)

| | |
|---|----------|
| resultierender Wärmegestehungspreis [EUR/kWh] | 0,07 EUR |
| resultierender Stromgestehungspreis [EUR/kWh] | 0,28 EUR |

Abb. 29: resultierender Wärme- und Stromgestehungspreis Hypothese 3

Der Einsatz der Biomasse kann die Kosten der Energieerzeugung gegenüber der Nutzung von synthetischem Gas erheblich reduzieren, jedoch ist der Einsatz der Biomasse im großen Maßstab nicht nachhaltig, da nur eine begrenzte Menge Biomasse für die energetische Nutzung zur Verfügung steht.

In Einzelfällen, z.B. für kleinere Nahwärmenetze, kann der Einsatz als Übergangstechnologie sinnvoll sein (z.B. im Tiergarten Nürnberg).

Maßnahmen an stadteigenen Gebäuden durch die Stadt selbst

7.4 Hypothese 4 – Energetische Sanierung

In der 4. Arbeitshypothese wird ausschließlich die Reduzierung des Wärmeverbrauches durch Sanierung betrachtet. Es werden die Auswirkungen der energetischen Gebäudesanierung untersucht und in unterschiedlichen Gebäudekategorien verglichen.

So können Gebäudegruppen identifiziert werden, bei denen die ökonomisch besten Erfolge erzielt werden können.

Grundlagen und Annahmen:

Reduzierung des Wärmebedarfs durch Sanierung:

- ohne Denkmalschutz auf 25% (entspricht Reduzierung um 75%)
- mit Denkmalschutz auf 50% (entspricht Reduzierung um 50%)
- mit Ensembleschutz auf 40% (entspricht Reduzierung um 60%).

Es wurde der energetisch relevante Anteil der Sanierungskosten angesetzt.

Folgende 6 Gruppen von Gebäuden wurden untersucht:

Ohne Fernwärmeversorgung:

4a kein Denkmal

4b Denkmal

4c Ensembleschutz

Mit Fernwärmeversorgung:

4d kein Denkmal

4e Denkmal

4f Ensembleschutz

Für alle Varianten der Hypothese 4 wurden die Kosten pro eingesparter kWh Heizenergie ermittelt. Diese kann somit direkt mit den Kosten einer CO₂-neutral erzeugten kWh verglichen werden, sowie mit den aktuellen Wärmekosten auf Basis fossiler Energieträger.

Für alle Gebäudegruppen ergeben sich Kosten pro eingesparter kWh, die deutlich unter den Kosten der Erzeugung auf Basis erneuerbarer Energien liegen.

Daher ist aus ökonomischer Sicht die Reduzierung des Wärmebedarfs durch effiziente Sanierung gegenüber der Erzeugung durch erneuerbare Energien für alle Gebäudekategorien vorzuziehen.

Auch im Vergleich zu den aktuellen (überwiegend fossilen) Energieträgern ist die energetische Sanierung wirtschaftlicher. Wenn die Klimafolgekosten (Basiswert Umweltbundesamt) ebenso berücksichtigt werden, verbessert sich die Wirtschaftlichkeit der Sanierung weiter.

Die Sanierung ist durch die Reduzierung des Wärmebedarfs mit Abstand der kostengünstigste Baustein auf dem Weg zur CO₂-Neutralität bei der Wärmeversorgung. Eine Erhöhung der Sanierungsquote würde sich daher auf die Wirtschaftlichkeit positiv auswirken.

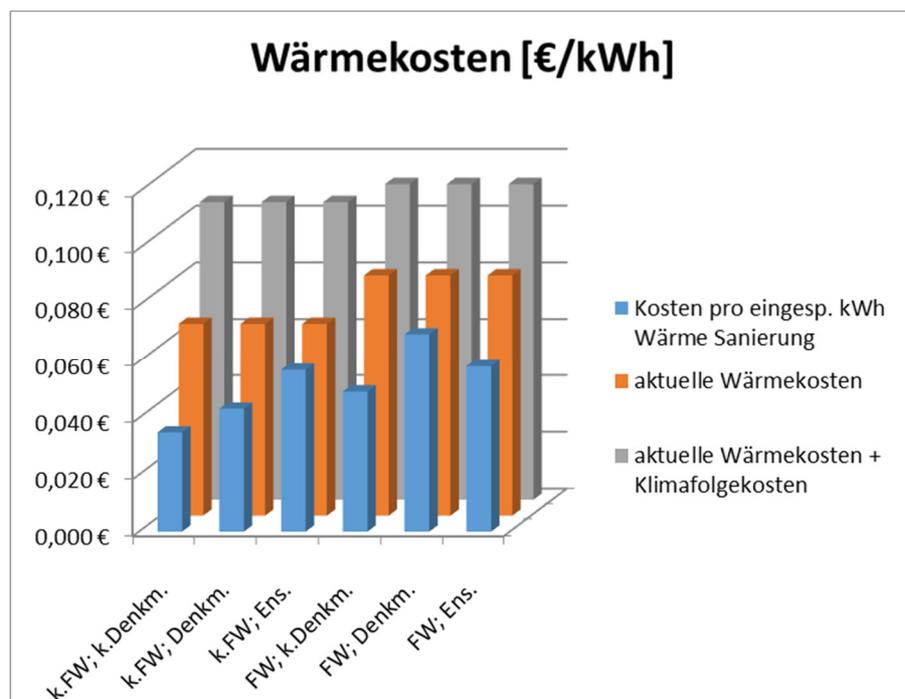


Abb. 30: resultierende Wärmekosten Hypothese 4

Zeit- und Kostenentwicklung:

Die aktuelle Sanierungsquote von 0,7% entspricht einer Sanierung von ca. 4.800 m² NRF pro Jahr (entspricht durchschnittlich 2 Gebäuden pro Jahr).

Hierfür fallen ca. 8 bis 10 Millionen EUR pro Jahr an. Der Anteil der energetischen Kosten beläuft sich hierbei auf ca. 900.000 bis 1,1 Millionen EUR pro Jahr.

Mit der Sanierungsquote von 0,7% können, beginnend ab 2023, bis 2035 ca. 8,4% der Gebäudeflächen saniert werden.

Eine Verdopplung der Sanierungsquote auf 1,4% führt zu einer Verdopplung der Sanierungsfläche auf ca. 9.600 m² NRF pro Jahr (entspricht durchschnittlich 4 Gebäuden pro Jahr) und einer Erhöhung der jährlichen Sanierungskosten auf 16 bis 21 Millionen EUR pro Jahr bzw. 1,8 bis 2,3 Millionen EUR pro Jahr für den Anteil der energetischen Kosten.

Mit dieser Sanierungsquote von 1,4% können, beginnend ab 2023, bis 2035 ca. 16,8% der Gebäudeflächen saniert werden.

Bei einer weiteren Erhöhung der Sanierungsquote auf 2,0% steigen die Sanierungsfläche auf 13.700 m² NRF pro Jahr (entspricht durchschnittlich 6 Gebäuden pro Jahr) und die Kosten auf 23 bis 30 Millionen EUR pro Jahr bzw. 2,5 bis 3,2 Millionen EUR pro Jahr für den Anteil der energetischen Kosten.

Mit dieser Sanierungsquote von 2,0% können, beginnend ab 2023, bis 2035 ca. 24% der Gebäudeflächen saniert werden.

7.5 Hypothese 5 – Umrüstung auf hybride Heizsysteme BHKW + Wärmepumpe

In dieser Arbeitshypothese wird die Umrüstung von **Gebäuden, die unsaniert und nicht fernwärmeversorgt** sind, auf ein hybrides Heizsystem aus BHKW und Wärmepumpen betrachtet.

Die Umrüstung auf hybride Heizsysteme stellt keinen Ersatz für die energetische Sanierung dar. Aber selbst bei einer sehr ambitionierten Sanierungsquote von 2% jährlich könnte bis 2035 nur etwa ein Fünftel der Gebäude energetisch saniert werden.

Da die Umrüstung des Heizsystems relativ schnell und mit geringeren Gesamtinvestitionen umsetzbar ist, kann sie eine wichtige Ergänzung zur Sanierung sein, um zu einer schnellen Reduzierung des CO₂-Ausstoßes beizutragen.

Der Betrieb der BHKWs basiert zunächst noch auf fossilem Gas, kann aber später auf CO₂-neutrales Gas (Biogas oder synthetisches Methan) umgestellt werden. Zunächst geht es darum, die Verbesserung der Effizienz und das Potential zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes zu untersuchen.

Diese Gebäudekategorie umfasst 176 Objekte, die zusammen ca. 22 % des Wärmebedarfs der insgesamt betrachteten Gebäude und Liegenschaften ausmachen.

Es wird von einer Betriebsweise ausgegangen, bei der der Strom für die Wärmepumpen vom Blockheizkraftwerk erzeugt wird. Dabei wird etwa 30 % des Wärmebedarfs vom BHKW gedeckt, ca. 70 % durch die Wärmepumpe.

Für die Wärmepumpen mit Erdsonden in Kombination mit dem BHKW wird, aufgrund des energetisch ungünstigen Zustands der unsanierten Gebäudehülle, eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von 3,0 angesetzt.

Mit Umrüstung auf diese Betriebsweise lässt sich der CO₂-Ausstoß im Bereich der Wärmeerzeugung für diese Objekte um ca. 39% reduzieren.

Eine zusätzliche energetische Sanierung muss nicht zeitgleich erfolgen, kann die CO₂-Einsparung jedoch auf bis zu 90% erhöhen.

Grafisch lässt sich die Verbesserung der Effizienz der hybriden Heizung wie folgt darstellen:

Hypothese Gas direkte Nutzung - ineffiziente Nutzung

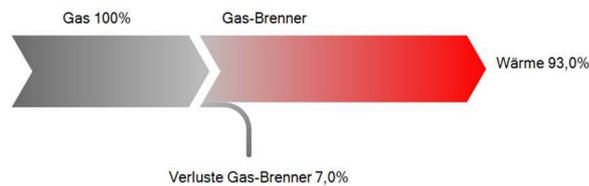


Abb. 31: Konventionelle Wärmeerzeugung mit Gas: Systemeffizienz 93%

Hypothese Gas BHKW + WP - effiziente Nutzung

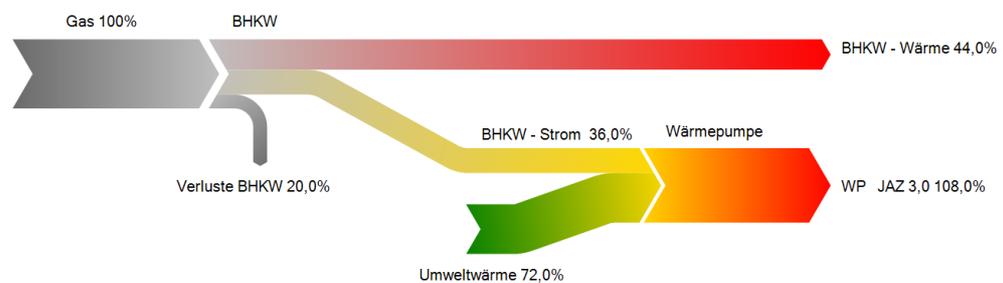


Abb. 32: Hybride Wärmeerzeugung mit Gas: Systemeffizienz 152% (44%+108%)

Durch die Verbesserung der Effizienz des Heizsystems reduziert sich entsprechend der CO₂-Ausstoß.

Netzdienliche Betriebsweise:

- Wenn ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien im Netz zur Verfügung steht, können die Gebäude über Wärmepumpen (mit Erdsonden) beheizt werden.
- Ist nicht ausreichend erneuerbarer Strom im Netz vorhanden, kann das BHKW die Wärme erzeugen. Der dabei gleichzeitig erzeugte Strom kann entweder direkt im Gebäude genutzt werden oder ins Netz eingespeist werden.
- Bei besonders niedrigen Außentemperaturen (Spitzenlast) können BHKW und Wärmepumpe gemeinsam betrieben werden. Das BHKW liefert dann Strom für die Wärmepumpe und entlastet damit das Stromnetz in Zeiten sehr hoher Netzbelastung.

- Um die Effizienz des Systems zu erhöhen, kann ggf. die Wärmepumpe zur Rücklaufanhebung (ggf. mehrstufig) eingesetzt werden und das BHKW zur Erhöhung auf die erforderliche Vorlauftemperatur.
- Durch die Kombination aus BHKW und Wärmepumpen mit Erdsonden kann die Anzahl der erforderlichen Erdsonden reduziert werden, insbesondere bei unsanierten Altbauten mit sehr hohen Verbräuchen.
- Nach einer energetischen Sanierung kann das BHKW zunächst weiterbetrieben und dann, nach Erreichen seiner Lebensdauer, ggf. stillgelegt werden. Die Anzahl der Erdsonden ist dann nicht stark überdimensioniert. Sonden und Wärmepumpe können sehr effizient weiterbetrieben werden.
- Die Wärmepumpen mit Erdsonden bieten auch die Option effizienter Kühlfunktion (möglichst mit PV-Strom).
- Zur Verbesserung der Netzdienlichkeit kann zusätzlich ein Heizungs-Pufferspeicher ergänzt werden. Dieser ermöglicht eine weitere Entkopplung der Erzeugung vom Bedarf.
- Der Wärmespeicher kann zusätzlich noch mit einer Heizpatrone ausgestattet werden. Damit kann bei akutem Stromüberschuss, wie er manchmal bei nächtlichen Stürmen (Windstromüberschuss) auftritt, überschüssiger Strom aufgenommen werden. Heizpatronen sind sehr kostengünstig und können bei richtiger Betriebsweise die Netzdienlichkeit des Systems weiter optimieren.
- Die Steuerung der Betriebsweise des Systems kann direkt durch den Energieversorger erfolgen. Alternativ kann es über den aktuellen Strompreis (Börsenpreis) geregelt werden.
- Bei Steuerung der Betriebsweise durch den Energieversorger könnte ein besonderer „netzdienlicher“ Stromtarif vereinbart werden, was mehr Gebäudebetreiber motivieren kann, netzdienliche Heizsysteme zu installieren.
- Diese Art der Wärmeversorgung bietet sich für Contracting-Modelle an.

- Sollte nicht ausreichend Platz in den Gebäuden vorhanden sein, könnten die hybriden Heizungsanlagen bis zu einer Gesamtsanierung des Objektes temporär in Containern untergebracht werden,
- Zunächst ist die Wärmeversorgung damit nicht vollständig CO₂-neutral. Sie reduziert aber als Brückentechnologie erheblich die CO₂-Emissionen und unterstützt den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien.
- In Kombination mit einer späteren energetischen Sanierung kann der CO₂-Ausstoß dann um bis zu 90% reduziert werden.
- Die Investitionskosten pro eingesparter Tonne CO₂ liegen etwas höher als bei der energetischen Sanierung, aber deutlich unter den Kosten einer komplett CO₂-neutralen Wärmeversorgung.
- In Zukunft können die BHKWs mit einem zunehmenden Anteil von regenerativ erzeugtem Gas betrieben werden, bis die gesamte Gasversorgung vollständig erneuerbar erfolgt.

Zeit- und Kostenentwicklung:

Bei einer Umrüstungsquote von durchschnittlich ca. 15 Objekten pro Jahr, beginnend ab 2023, könnten bis 2035 alle 176 Objekte umgerüstet werden.

Im Mittel müsste pro Objekt ein BHKW mit ca. 26 kW_{el} (32 kW_{th}) und Wärmepumpen mit ca. 61 kW installiert werden.

Beginnend in 2023 müssten hierfür ca. 2 Millionen EUR pro Jahr bis 2035 investiert werden.

Unsanierete Gebäude, die in absehbarer Zeit nicht saniert werden, können zeitnah umgerüstet und dann auf erneuerbare Energieträger umgestellt werden.

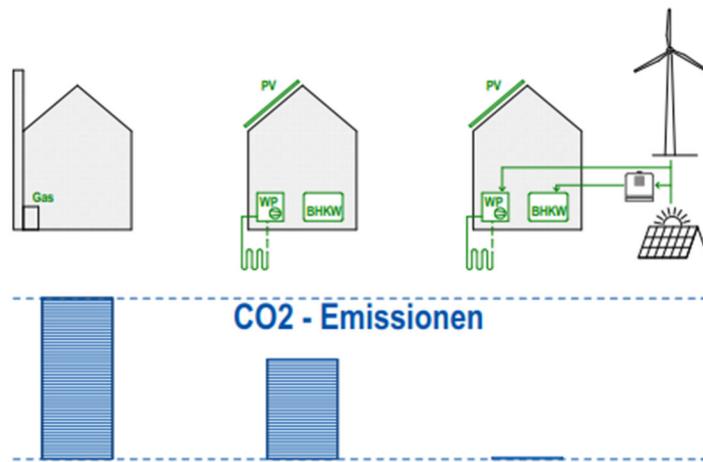


Abb. 33: CO₂-Emissionen in Abhängigkeit der Anlagentechnik

Unsanierete Gebäude können zeitnah umgerüstet werden, um den CO₂-Ausstoß schnell zu reduzieren. Nach einer Sanierung kann das BHKW entfallen und auf erneuerbare Energieträger umgestellt werden

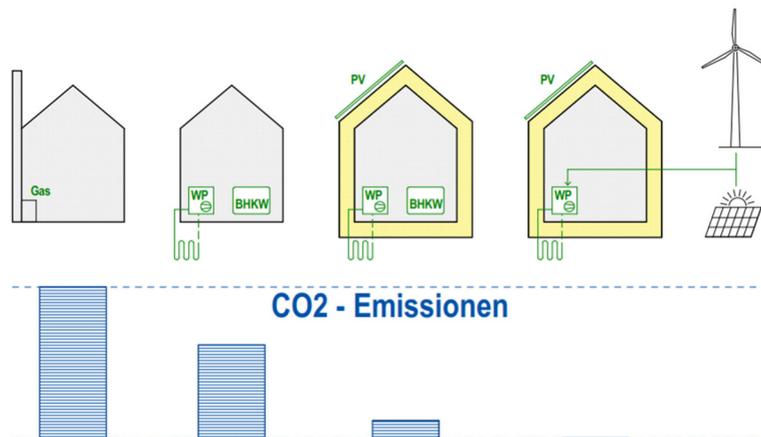


Abb. 34: CO₂-Emissionen und Anlagentechnik in Abhängigkeit zur Sanierung

Durch den reduzierten Gasverbrauch reduzieren sich die Heizkosten.

Durch die steigenden Gaspreise (und ggf. CO₂-Abgaben) wird die Kosteneinsparung gegenüber konventionell beheizten Objekten noch größer.

Ab 2034 gleichen sich Umrüstungskosten und Einsparungen in etwa aus.

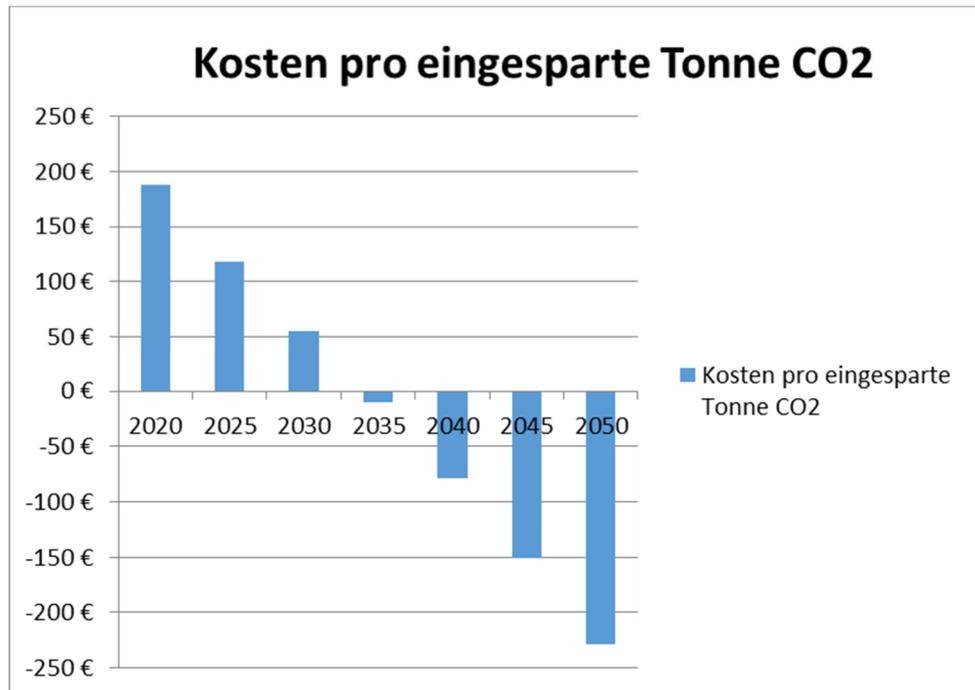


Abb. 35: Kosteneinsparung

7.6 Hypothese 6 – Nachrüstung von Wärmepumpen

In dieser Arbeitshypothese werden **Gebäude betrachtet, die bereits saniert wurden oder als Neubauten** gelten.

Dies betrifft 69 Objekte und entspricht ca. 7,8 % des gesamten Wärmebedarfs aller Objekte.

Der geringere Verbrauch macht den Einbau eines BHKW in vielen Fällen unwirtschaftlich. Zudem ist die Heizungsanlage noch relativ neu.

Daher ist es in dieser Kategorie von Objekten i.d.R. ausreichend, die Wärmeversorgung überwiegend auf Wärmepumpenbetrieb umzustellen.

Die bestehenden Gas-Heizungsanlagen können weiter zur Abdeckung von Spitzenlasten betrieben werden. Damit können die Wärmepumpen und Erdsonden kleiner und damit wirtschaftlicher dimensioniert werden.

Es wird von einer Betriebsweise ausgegangen, bei der etwa 80% des Wärmebedarfs durch die Wärmepumpen gedeckt werden, ca. 20% durch den Gasbrenner.

Als Energieträger wird für die Gasheizungen zunächst weiterhin fossiles Erdgas angesetzt.

Wegen des besseren energetischen Standards der Gebäude wird für die Wärmepumpen mit Erdsonden eine durchschnittliche Jahresarbeitszahl von 4,0 angesetzt.

Bei Umrüstung auf diese Betriebsweise würde sich der CO₂-Ausstoß dieser Objekte im Bereich der Wärmeerzeugung um ca. 50% reduzieren lassen.

Durch den steigenden Anteil der erneuerbaren Energien am Strommix erhöht sich dieser Wert bis 2035 weiter.

Netzdienliche Betriebsweise:

- Wenn ausreichend Strom aus erneuerbaren Energien im Netz zur Verfügung steht, kann das Gebäude über Wärmepumpen (mit Erdsonden) beheizt werden.
- Ist nicht ausreichend erneuerbarer Strom im Netz vorhanden, kann der Gasbrenner unterstützen.

- Bei besonders niedrigen Außentemperaturen (Spitzenlast) oder Dunkelflaute kann der Gasbrenner den gesamten Bedarf decken, da die bestehende Gasheizung auf Vollastdeckung ausgelegt wurde. Dies entlastet das Stromnetz in Zeiten sehr hoher Netzbelastung.
- Durch die Kombination aus bestehendem Gasbrenner und Wärmepumpen kann die Anzahl der erforderlichen Erdsonden reduziert werden.
- Die Wärmepumpen mit Erdsonden bieten auch die Option einer effizienten Kühlfunktion (möglichst mit PV-Strom).
- Zur Verbesserung der Netzdienlichkeit kann zusätzlich ein Heizungs-Pufferspeicher ergänzt werden. Dieser ermöglicht eine noch weitere Entkopplung der Erzeugung vom Bedarf.
- Der Wärmespeicher kann noch zusätzlich mit einer Heizpatrone ausgestattet werden. Damit kann bei akutem Stromüberschuss, wie er manchmal bei nächtlichen Stürmen (Windstromüberschuss) auftritt, überschüssiger Strom aufgenommen werden. Heizpatronen sind sehr kostengünstig und können bei richtiger Betriebsweise die Netzdienlichkeit des Systems weiter optimieren.
- Die Steuerung der Betriebsweise des Systems kann direkt durch den Energieversorger erfolgen. Alternativ kann es über den aktuellen Strompreis (Börsenpreis) geregelt werden.
- Bei Steuerung der Betriebsweise durch den Energieversorger könnte ein besonderer „netzdienlicher“ Stromtarif vereinbart werden. Dieser kann weitere Gebäudebetreiber motivieren, netzdienliche Heizsysteme zu installieren.
- Diese Art der Wärmeversorgung bietet sich für Contracting-Modelle an.

- Zunächst ist die Wärmeversorgung damit nicht vollständig CO₂-neutral. Sie reduziert aber als Brückentechnologie erheblich die CO₂-Emissionen und unterstützt den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien.
 - Die Investitionskosten pro eingesparte Tonne CO₂ liegen etwas höher als bei der energetischen Sanierung, aber deutlich unter den Kosten einer komplett CO₂-neutralen Wärmeversorgung.
 - In Zukunft können die Gasbrenner mit einem zunehmenden Anteil von regenerativ erzeugtem Gas betrieben werden, bis die gesamte Gasversorgung vollständig erneuerbar erfolgt.

Zeit- und Kostenentwicklung:

Bei einer Umrüstungsquote von durchschnittlich 6 Objekten pro Jahr, beginnend ab 2023, könnten bis 2035 alle 69 Objekte umgerüstet werden.

Im Mittel müsste pro Objekt eine Wärmepumpe mit ca. 38 kW (mit entsprechenden Erdsonden) installiert werden. Beginnend in 2023 müssten ca. 0,4 Millionen EUR pro Jahr investiert werden.

In bereits sanierten Gebäuden oder Neubauten können zeitnah Wärmepumpen nachgerüstet werden, dann die Energieträger auf CO₂-Neutralität umgestellt werden.

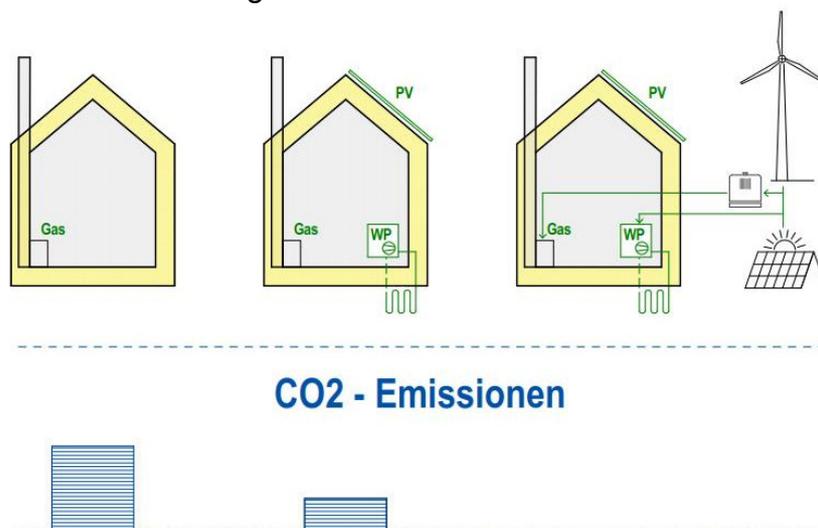


Abb. 36: CO₂-Emissionen in Abhängigkeit der Anlagentechnik

Durch den deutlich reduzierten Gasverbrauch reduzieren sich insgesamt die Heizkosten, trotz zusätzlicher Stromkosten für die Wärmepumpen.

Durch die steigenden Gaspreise (und ggf. CO₂-Abgaben) wird die Einsparung gegenüber konventionell beheizten Objekten noch größer. Ab 2030 gleichen sich Umrüstungskosten und Einsparungen in etwa aus.

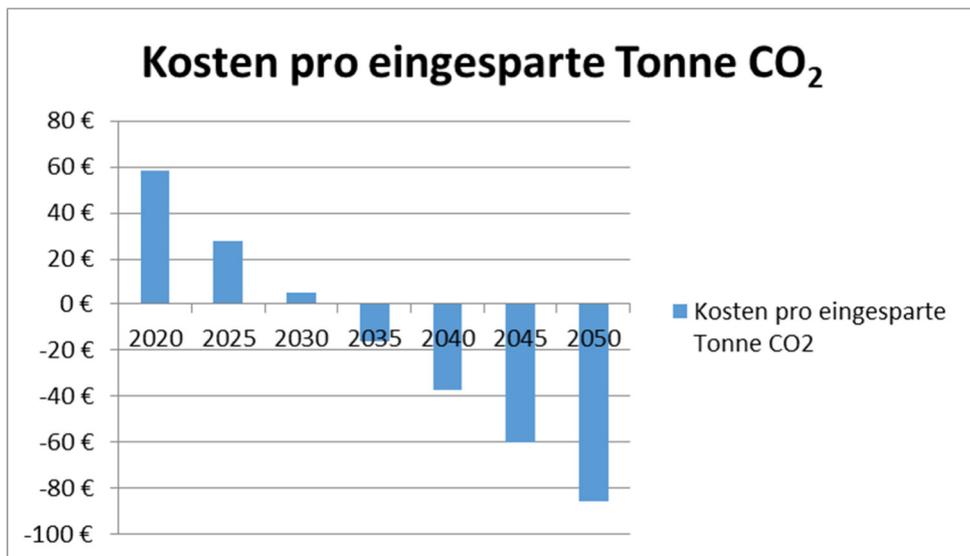


Abb. 37: Kosteneinsparung

7.7 Hypothese 7 – PV auf stadteigenen Gebäuden (mit Speicher)

In der 7. Arbeitshypothese wird der Ausbau der Photovoltaikanlagen auf den zur Verfügung stehenden Dachflächen der Gebäude betrachtet.

Nach der Potentialanalyse der stadteigenen Dächer für PV-Anlagen der Stadt Nürnberg vom 15.12.2020 stehen hierfür die Dachflächen von ca. 398 nicht denkmalgeschützten Gebäuden mit guter bis mittlerer Eignung zur Verfügung.

Das freie Potential dieser Dachflächen wird mit ca. 17.000 kWp bzw. 90.000 m² freier Dachfläche beziffert.

Ziel des gebäudenahen Photovoltaikausbaus ist eine möglichst hohe Deckung des Strombedarfs des Gebäudes durch selbstproduzierten Strom (Eigenverbrauch).

Der natürlich tageszeitlich und jahreszeitlich schwankenden bzw. begrenzten Energiequelle stehen hierbei zudem unterschiedliche, i.d.R. zeitlich versetzte, Lastprofile gegenüber. D.h., je nach Lastprofil sind die Zeiträume hohen Photovoltaikertrags nicht deckungsgleich mit den Lastspitzen des Strombedarfs des Gebäudes.

Durch den Einsatz von Kurzzeitspeichern (Batterien) kann ein zwischenzeitlicher Überschuss des Photovoltaikertrages für die Deckung des Bedarfs zu Zeiten geringeren Photovoltaikertrages zwischengespeichert werden. Hierdurch kann die Eigenverbrauchsquote erhöht werden.

Im Gegensatz zu Wohngebäuden mit überwiegenden Lastspitzen in den Morgen- und Abendstunden ist bei kommunal genutzten Gebäuden in der Regel von einem günstigeren Lastprofil aufgrund der überwiegenden Nutzung tagsüber auszugehen.

Dies führt zu einem günstigeren Verhältnis zwischen Ertrag und nutzbarem Bedarf und die Größe der Kurzzeitspeicher kann geringer angesetzt werden.

Kostenvergleich Gesteungskosten für selbstgenutzten PV-Strom zu Kosten Netzbezug:

Die Gesteungskosten des PV-Stroms sind erheblich geringer als der Strombezug aus dem Netz. Überschüsse können nach gegenwärtigen Rahmenbedingungen eingespeist werden, werden häufig aber nicht kostendeckend vergütet.

Diese Vergütung kann in Zukunft noch weiter sinken. Daher sollte der Anteil des Eigenverbrauchs möglichst hoch sein.

Der Kostenvorteil besteht aber selbst dann, wenn nur der selbstgenutzte Anteil angesetzt wird und keine Vergütung für die Einspeisung erfolgt.

Ein Kurzzeitspeicher erhöht den Eigenverbrauchsanteil und reduziert damit die Gesteungskosten des selbstgenutzten Stroms. Auch kann dieser Speicher netzdienliche Funktionen übernehmen.

Es gibt bereits zahlreiche Modellprojekte, bei denen der Energieversorger einen Schwarm von dezentralen Speichern in Gebäuden zur Netzstabilisierung nutzt, und dafür einen günstigen Stromtarif anbietet oder sich an den Kosten der Speicher beteiligt.

Auch bei selbstgenutztem Strom können Abgaben wie EEG-Umlage und andere Gebühren anfallen. Diese können sich je nach Gesetzeslage stark verändern. Daher kann kein direkter Vergleich zwischen dem Netzstrom und dem selbst erzeugten PV-Strom gezogen werden.

Die Gesteungskosten des PV-Stroms, auch mit Speicher, werden mit der Zeit immer günstiger und liegen deutlich unter den Bezugskosten aus dem Netz. Wie groß der tatsächliche finanzielle Vorteil ist, hängt von der weiteren Entwicklung der Umlagen und Abgaben ab.

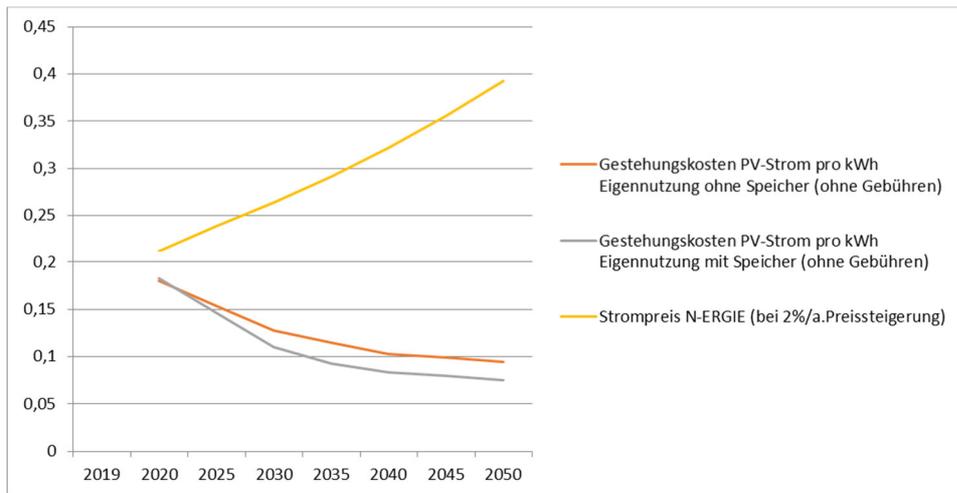


Abb. 38: Gestehungskosten PV-Strom

Der großflächige Ausbau der PV-Dachanlagen ist ein wichtiger Baustein zur Reduzierung des CO₂-Ausstoßes beim Strom. Die Kosten liegen bereits heute bei den meisten Anlagen deutlich unter den Kosten des Netzstroms.

Bei denkmalschützen Gebäuden können die Kosten durch Sondermodule jedoch erheblich ansteigen.

Hier sind denkmalgerechte Lösungen in Abstimmung mit dem Denkmalschutz zu finden, die auch eine Belegung dieser Gebäude ermöglicht, da dies ca. 40 % der Nürnberger Gebäudeflächen betrifft.

7.8 Vergleich der Hypothesen

| Hypothese | Effizienz | Wirtschaftlichkeit | Nachhaltigkeit | Kostenentwicklung |
|---|-----------|--------------------|----------------|-------------------|
| Maßnahmen des Energieversorgers zur Reduzierung des CO ₂ -Ausstoßes | | | | |
| Hypothese 1 (PtG) | - | - | 0 | + |
| Hypothese 2 (PtG + KWK) | 0 | - | + | + |
| Hypothese 3 (Biomasse-KWK) | + | + | - | 0 |
| Maßnahmen der Kommune an stadteigenen Gebäuden zur Reduzierung des CO ₂ -Ausstoßes | | | | |
| Hypothese 4 (Sanierung) | + | + | + | 0 |
| Hypothese 5 (BHKW+WP) | + | + | + | 0 |
| Hypothese 6 (WP) | + | + | + | 0 |
| Hypothese 7 (PV+Speicher) | + | + | + | + |

Abb. 39: Vergleich und Bewertung der Hypothesen

Wärmekosten:

Beim direkten Vergleich der Hypothesen der Wärmeerzeugung (Hypothese 1-3) können folgende Aussagen getroffen werden:

- Hypothese 1 (PtG) ist mit Abstand die unwirtschaftlichste Variante.
- Hypothese 2 (PtG+KWK) ist wirtschaftlicher, aber immer noch deutlich teurer als der heutige Wärmepreis aus fossilen Brennstoffen.
- Hypothese 3 (Biomasse+KWK) wäre heute schon zu vergleichbaren Kosten einsetzbar, ist aber nicht nachhaltig.
- Hypothese 1 und 2 werden in der Zukunft deutlich günstiger und nähern sich in Bezug auf die Kosten immer weiter an Hypothese 3 an.
- Ein schneller Umstieg auf eine Wärmeversorgung aus erneuerbaren Energien ist daher mit höheren Kosten verbunden als ein langsamer.

- Der Einsatz von Biomasse könnte als „Brückentechnologie“ dienen, bis der Einsatz von synthetischen Gasen günstiger geworden ist.

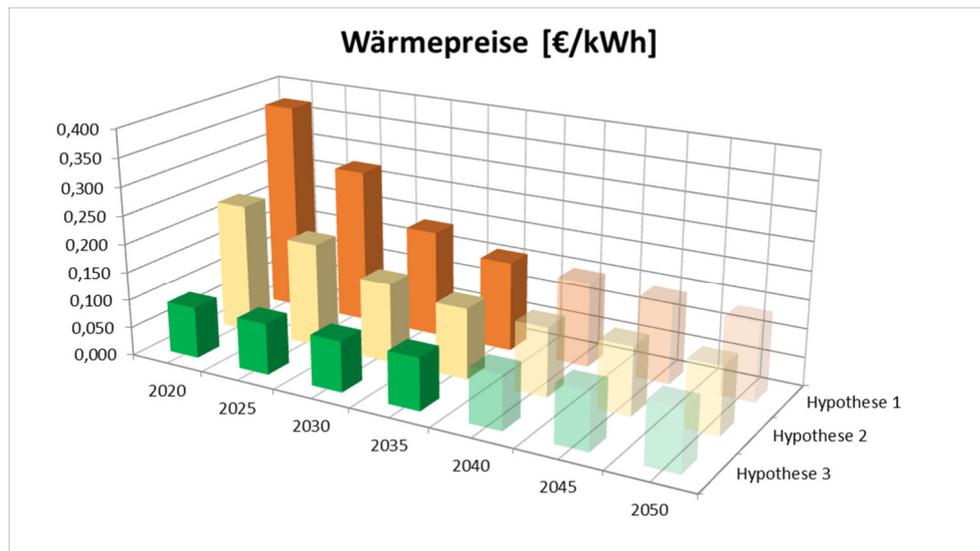


Abb. 40: Entwicklung der Wärmepreise Hypothese 1-3

In der weiteren Betrachtung wird von den drei Hypothesen zur Energieversorgung nur noch die Hypothese 2 zum Vergleich herangezogen, da die Hypothese 1 unwirtschaftlicher und ineffizienter und die Hypothese 3 nicht nachhaltig ist.

Beim Vergleich der energetischen Sanierung (Hypothese 4) mit einer nachhaltigen erneuerbaren Wärmeerzeugung (Hypothese 2: PtG + KWK) können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die durch energetische Sanierung (Hypothese 4) eingesparte Kilowattstunde ist deutlich günstiger als die Wärmeerzeugung durch Power-to-Gas (Hypothese 2).
- Sie ist auch günstiger als die Wärmeerzeugung mit fossilen Brennstoffen.
- Die energetische Sanierung ist zunächst mit großem Abstand die kostengünstigste der betrachteten Hypothesen. Durch Baukostensteigerung und Preisreduzierung der erneuerbaren Wärmeversorgung werden sich die Kosten einer vermiedenen Kilowattstunde in Zukunft den Erzeugungskosten annähern.
- Für eine CO₂-Neutralität bei der Wärmeversorgung bis 2035 ist die energetische Sanierung der kostengünstigste und wirtschaftlichste Baustein.

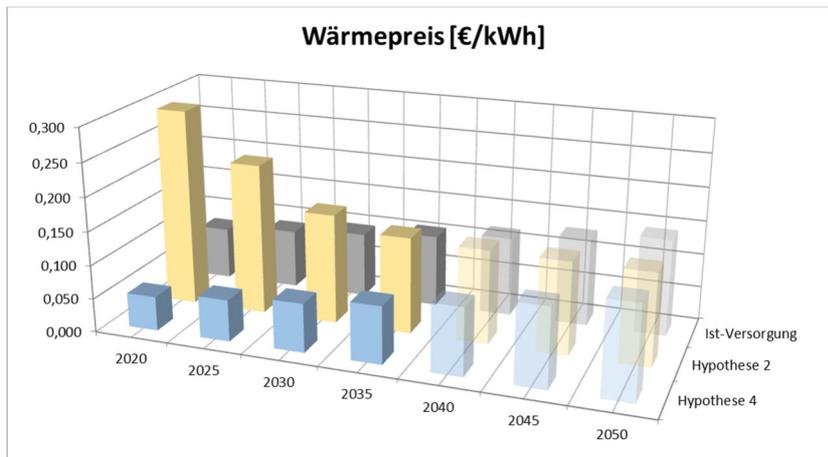


Abb. 41: Entwicklung der Wärmepreise – Hypothese 4 im Vergleich mit Hypothese 2 und IST-Versorgung

Stromkosten:

Beim direkten Vergleich der Hypothesen zur Stromerzeugung (Hypothese 1-3) können folgende Aussagen getroffen werden:

- Hypothese 1 (PtG) ist mit Abstand die unwirtschaftlichste Variante.
- Hypothese 2 (PtG+KWK) ist wirtschaftlicher, aber immer noch deutlich teurer als der heutige Strombezugspreis.
- Hypothese 3 (Biomasse+KWK) wäre deutlich kostengünstiger, ist aber nicht nachhaltig.
- Hypothese 1 und 2 werden in der Zukunft deutlich günstiger und nähern sich in Bezug auf die Kosten immer weiter an Hypothese 3 an.
- Der Einsatz von Biomasse könnte auch hier als „Brückentechnologie“ dienen, bis der Einsatz von synthetischen Gasen günstiger geworden ist.

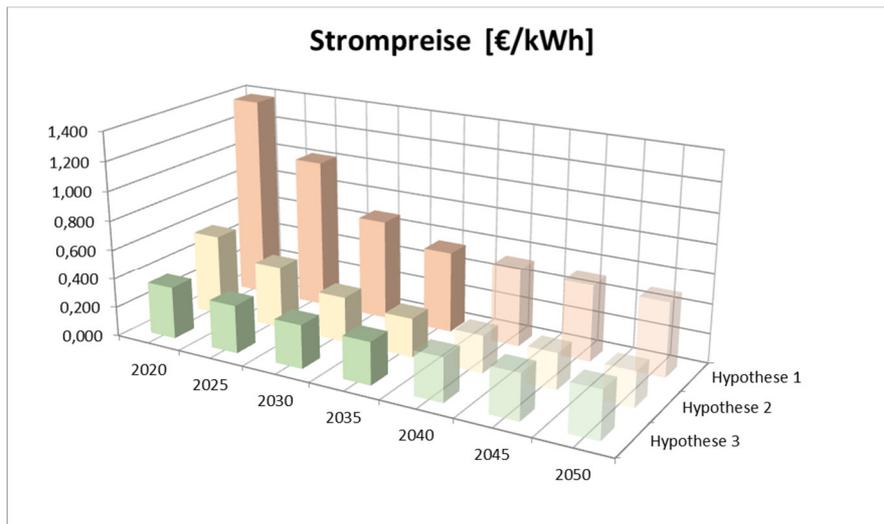


Abb. 42: Entwicklung der Strompreise Hypothese 1-3

Beim Vergleich einer nachhaltigen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (Hypothese 2) mit der Stromversorgung aus dem Netz (Ist-Versorgung) können folgende Aussagen getroffen werden:

- Die CO₂-neutrale Stromerzeugung (Hypothese 2) ist zunächst deutlich teurer als die Ist-Versorgung. In Zukunft nähern sich diese Preise allerdings an.
- Ein schneller Umstieg auf eine erneuerbare Stromversorgung ist daher mit höheren Kosten verbunden als ein langsamer.

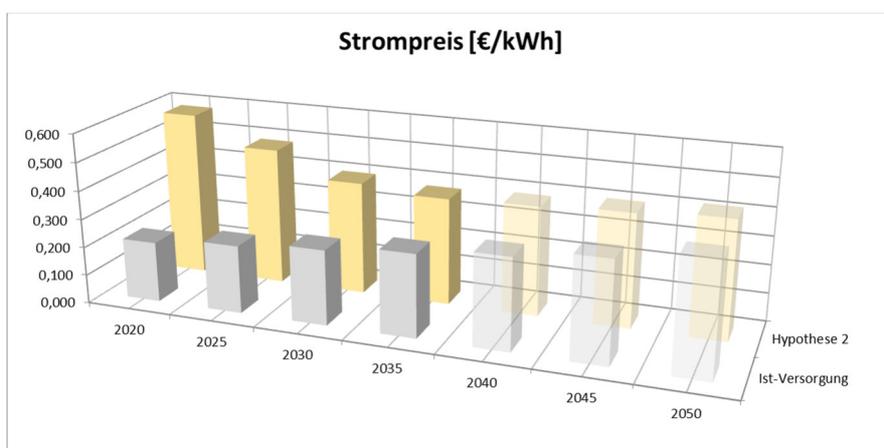


Abb. 43: Entwicklung des Strompreises – Hypothese 2 im Vergleich mit der IST-Versorgung

7.9 Synthese

Die Betrachtung der Hypothesen zeigt, dass es für die Erreichung der Klimaneutralität Maßnahmen gibt, die im Bereich des Energieversorgers liegen (Fernwärme, Gas, Strom). Deren Umsetzung wird sich jedoch in den Preisen für Wärme und den Strombezug niederschlagen.

In direkter Verantwortung der Kommune für ihre eigenen Gebäude können Maßnahmen umgesetzt werden, die Energiekosten und CO₂-Emissionen einsparen, jedoch Investitionen erfordern.

Nur durch die Verfolgung beider Ansätze kann die Klimaneutralität des städteigenen Gebäudebestandes unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten erreicht werden.

Der Vergleich der Hypothesen macht deutlich, dass das Ziel der CO₂-Neutralität bis 2035 durch die Umstellung auf nachhaltige CO₂-neutrale Energieträger (vorzugsweise Hypothese 2 für Fernwärme und Stromrestbezug) zwar erreicht werden kann, aber zu sehr hohen Kosten führt. Günstiger wäre die Hypothese 3 (Biomasse + KWK), die aber dem Grundsatz der Nachhaltigkeit widerspricht.

Auf der Zeitachse denkbar wäre hier eine Kombination beider Hypothesen, d.h. zunächst schnell auf z.B. Holzvergasertechnik zu setzen, und mittelfristig die eingesetzte Biomasse komplett durch synthetisches Gas zu ersetzen. Bei einer Umstellung könnte die Kraftwerkstechnologie größtenteils beibehalten werden.

Die technische Umsetzung liegt hierbei im Bereich des Energieversorgers.

Die Maßnahmen, die an den Gebäuden durchgeführt werden können (Hypothesen 4-7), sind deutlich kosteneffizienter, können aber voraussichtlich aus Kapazitätsgründen nicht vollständig bis 2035 umgesetzt werden. Das betrifft insbesondere die energetische Sanierung der Gebäude.

Diese Maßnahmen sind jedoch der entscheidende Baustein zu einer kostengünstigen Reduktion der CO₂-Emissionen.

Der wirtschaftlichste und nachhaltigste Weg ist daher zunächst die maximale Umsetzung der Gebäudemaßnahmen, die bis 2035 (und darüber hinaus) realisiert werden können. Der verbleibende Energiebedarf muss durch CO₂-neutrale Energieträger gedeckt werden.

Hierzu werden im Weiteren drei Szenarien betrachtet, die verschiedene Geschwindigkeiten zur Klimaneutralität beschreiben.

Diese Szenarien führen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der Kosten und des kumulierten CO₂-Ausstoßes.

8 Szenarien

Es wurden drei Hauptszenarien betrachtet und verglichen.

Szenario 1 „Weiter wie bisher“

dient lediglich als Referenzszenario

Szenario 2 „moderat“

erreicht CO₂-Neutralität bis 2045

Szenario 3 „Zielszenario 2035“

erreicht das vorgegebene Ziel der CO₂-Neutralität in 2035

Die in den Szenarien betrachteten Maßnahmen des Energieversorgers beziehen sich ausschließlich auf die Deckung des Bedarfs der kommunalen Gebäude.

Die Investitionen werden in den Szenarien auf die jeweilige Nutzungsdauer bezogen (analog einer Finanzierung über den Nutzungszeitraum). Für die Sanierung wurde der energetische relevante Anteil der Kosten angesetzt.

8.1 Szenario 1: „Weiter wie bisher“ (Referenzszenario)

8.1.1 Annahmen für Szenario 1 „Weiter wie bisher“

Annahmen für direkte Maßnahmen durch Kommune an städteigenen Gebäuden:

- Beibehalten der Sanierungsquote von derzeit ca. 0,7 % (siehe Hypothese 4)
- Keine Umstellung auf hybride Heizsysteme bis 2045 (siehe Hypothese 5)
- Keine Umrüstung auf Wärmepumpen (siehe Hypothese 6)
- Kein erhöhter Ausbau von PV auf den städteigenen Gebäuden. Es wird angenommen, dass der Ausbau weiterhin wie bisher mit ca. 80 kWp pro Jahr erfolgt

Annahmen für Maßnahmen des Energieversorgers:

- Stromerzeugung bzw. Einkauf durch den Energieversorger: Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien (EE) zunächst weiter wie bisher, dann Anpassung der Steigerung, sodass 88% Anteil erneuerbarer Energien in 2045 erreicht sind. (Ziel Bundesrepublik)
EE-Anteil 2025: 72,5% / 2030: 80% / 2035: 85% / 2040: 87,5 / 2045: 88,0%
- Fernwärme: Kein Ausbau des Anteils der erneuerbaren Energien zur Fernwärmeerzeugung
- Gas: Keine Beimischung von Gas aus erneuerbaren Energien
- (Preissteigerung der Energieträger 2% pro Jahr)

8.1.2 CO₂-Emissionen Szenario 1 „Weiter wie bisher“

- In diesem Szenario werden die CO₂-Emissionen bis 2035 nicht wesentlich reduziert.
- Bis 2050 reduzieren sich die Emissionen von ca. 37.000 Tonnen pro Jahr in 2020 auf ca. 26.000 Tonnen pro Jahr.-
- CO₂-Neutralität wird im betrachteten Zeitraum nicht erreicht.
- Die Reduzierung der CO₂-Emissionen wird lediglich durch die Reduzierung des Wärmebedarfs durch die Sanierungsquote von 0,7% sowie die weitere Erhöhung des EE-Anteils bei der Stromerzeugung erreicht.
- In diesem Szenario werden die Klimaziele verfehlt. Es dient nur als Basis-Szenario zum Vergleich der Varianten.
- Der kumulierte CO₂-Ausstoß bis 2050 beträgt 923.000 Tonnen.

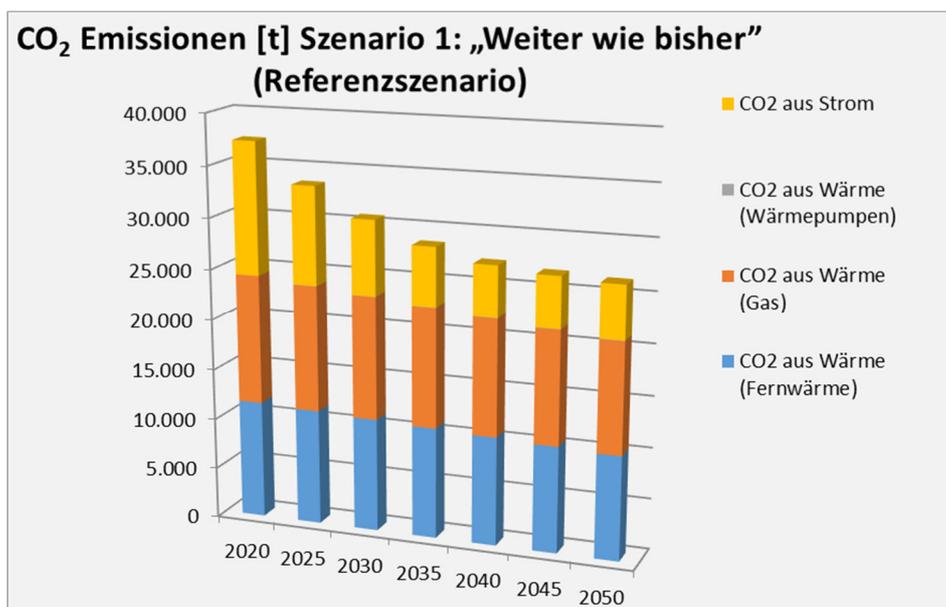


Abb. 44: CO₂-Emissionen Szenario 1 „Weiter wie bisher“

8.1.3 Kostenentwicklung Szenario 1 „Weiter wie bisher“

- Die jährlichen Gesamtkosten (Energiekosten) erhöhen sich von ca. 21 Millionen EUR in 2020 auf ca. 30 Millionen EUR in 2035.
- Die Kosten beinhalten Kosten der Energieträger für Heizung und Strom.
- Da keine Veränderungen bei der Sanierungsquote und keine Umrüstungen der Heizsysteme gasversorgter Gebäude erfolgen, fallen hier keine zusätzlichen Investitionskosten an.
- Die steigenden Kosten sind der angenommenen 2 %igen Preissteigerung der Energieträger geschuldet, sowie der Erhöhung des Energiebedarfs durch Zubau und erhöhtem Strombedarf aufgrund erhöhter technischer Gebäudeausstattung.
- Dargestellt sind die Energiekosten einschl. der CO₂-Folgekosten (Ansatz Umweltbundesamt).
- Diese beiden dargestellten Kurven werden in den weiteren Szenarien als Vergleichskurven verwendet.

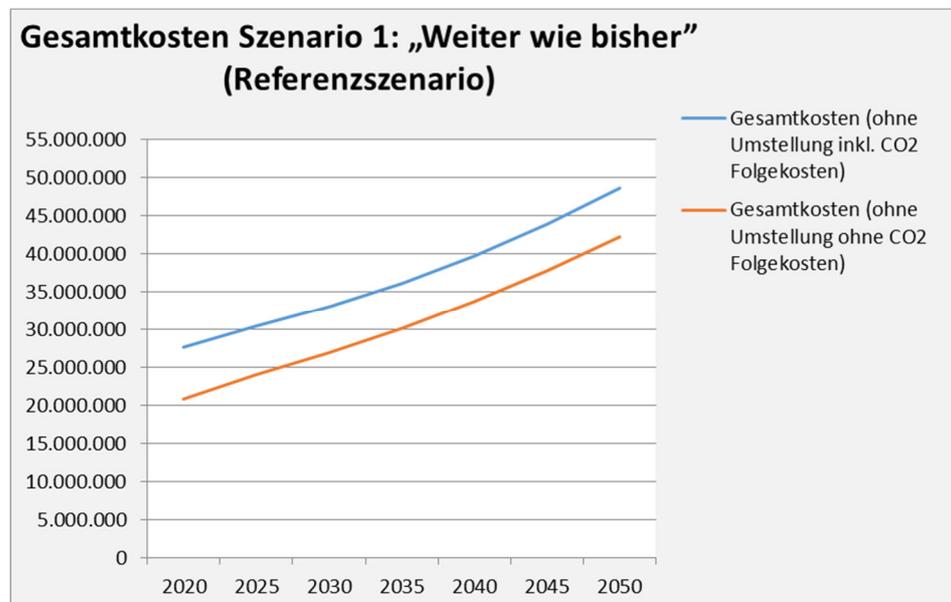


Abb. 45: Kostenentwicklung Szenario 1 „Weiter wie bisher“

8.2 Szenario 2: „moderat“

(Zielerreichung Klimaneutralität der Stadtverwaltung bis 2045)

8.2.1 Annahmen für Szenario 2 „moderat“

Annahmen für direkte Maßnahmen durch Kommune an städteigenen Gebäuden:

- Verdopplung der gegenwärtigen Sanierungsquote von ca. 0,7% pro Jahr auf 1,4% pro Jahr (siehe Hypothese 4).
- Umstellung auf hybride Heizsysteme entsprechend Hypothese 5.
Umstellungsgrad 2025: 16,7% / 2030: 58,3% / 2035: 100%
- Umrüstung auf Wärmepumpen bei Neubauten und sanierten Gebäuden entsprechend Hypothese 6.
Umstellungsgrad 2025: 16,7% / 2030: 58,3% / 2035: 100%
- Erhöhung des Zubaus von PV auf Gebäuden und moderater Zubau von Stromspeichern entsprechend Hypothese 7.
Ausbaugrad PV 2025: 30,0% / 2030: 63,0% / 2035: 100%
Ausbaugrad Speicher 2025: 20,0% / 2030: 50,0% / 2035: 100%

Annahmen für Maßnahmen des Energieversorgers:

- Stromerzeugung bzw. Zukauf durch den Energieversorger:
Zubau erneuerbarer Energien (EE) in dem Ausmaß, dass bis 2045 CO₂-Neutralität erreicht wird (100% Erneuerbare Energien, Ziel Bundesrepublik).
EE-Anteil 2025: 78,5% / 2030: 88,0% / 2035: 93,5% / 2040: 98,0 / 2045: 100%
- Fernwärmeerzeugung durch den Energieversorger:
Zubau erneuerbarer Energien (EE), dass bis 2045 CO₂-Neutralität erreicht wird (100% Erneuerbare Energien).
EE-Anteil 2025: 27,3% / 2030: 45,5% / 2035: 63,7% / 2040: 81,8 / 2045: 100%
- Gas: Zumischung Gas aus erneuerbaren Energien (EE) durch den Energieversorger, dass bis 2045 CO₂-Neutralität erreicht wird (100% Erneuerbare Energien).
EE-Anteil 2025: 0% / 2030: 25% / 2035: 50% / 2040: 75% / 2045: 100%
- (Preissteigerung des „konventionellen“ Anteils der Energieträger in Höhe von 2% pro Jahr. Für den zusätzlichen Anteil erneuerbarer Energien wurden die Preise auf Basis der Hypothese 2 ermittelt.)

8.2.2 CO₂-Emissionen Szenario 2 „moderat“

- In diesem Szenario werden die CO₂-Emissionen bis 2035 um ca. 75 % reduziert, also von ca. 37.000 Tonnen im Jahr 2020 auf nur noch 9.500 Tonnen in 2035.
- Bis 2045 wird CO₂-Neutralität erreicht.
- Die Reduzierung der CO₂-Emissionen wird durch die Reduzierung des Wärmebedarfs durch die Erhöhung der Sanierungsquote (von 0,7% auf 1,4%), die Umrüstung auf CO₂-effiziente Anlagentechnik sowie Umstellung auf erneuerbare Energieträger erreicht.
- Der kumulierte CO₂-Ausstoß bis 2050 beträgt ca. 412.000 Tonnen.
- In diesem Szenario wird das Ziel des Stadtrates „Klimaneutralität bis 2035“ **nicht** erreicht, jedoch wird der CO₂-Ausstoß drastisch reduziert.

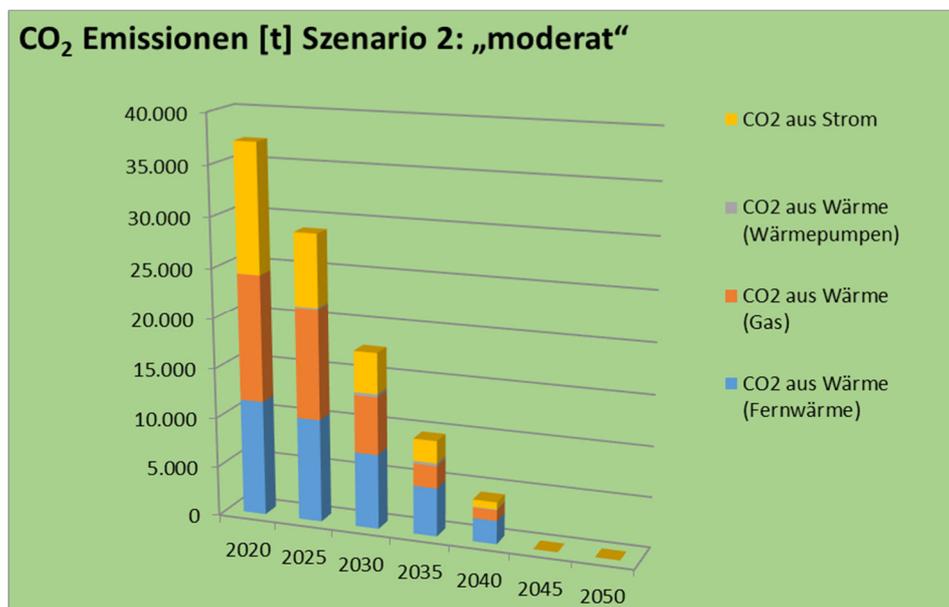


Abb. 46: CO₂-Emissionen Szenario 2

8.2.3 Kostenentwicklung Szenario 2 „moderat“

- Die jährlichen Kosten (Energiekosten + Umrüstung) erhöhen sich durch die vorgenannten Maßnahmen um bis zu ca. 5 Millionen EUR jährlich gegenüber dem Vergleichsszenario 1.

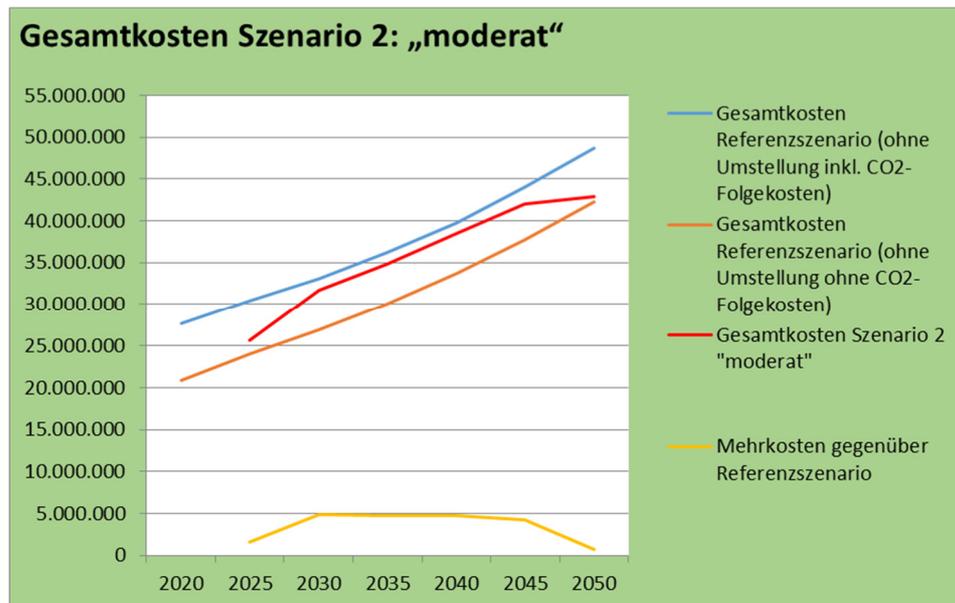


Abb. 47: Gesamtkosten Szenario 2 „moderat“

Die Kosten beinhalten:

- Mehrkosten für die Erhöhung der Sanierungsquote von 0,7% auf 1,4% (energetischer Anteil der Kosten).
- Kosten für die Umrüstung der Heizungssysteme.
- Kosten für den steigenden Anteil der erneuerbaren Energien bei den Energieträgern (Strom, Fernwärme, Gas).

8.2.4 Szenario 2 - Vergleichsvariante

Zum Vergleich wurde betrachtet, wie sich die Kosten entwickeln würden, wenn lediglich die Energieträger in Verantwortung des Energieversorgers auf CO₂-Neutralität umgestellt und keine weiteren Maßnahmen an den Gebäuden durchgeführt würden.

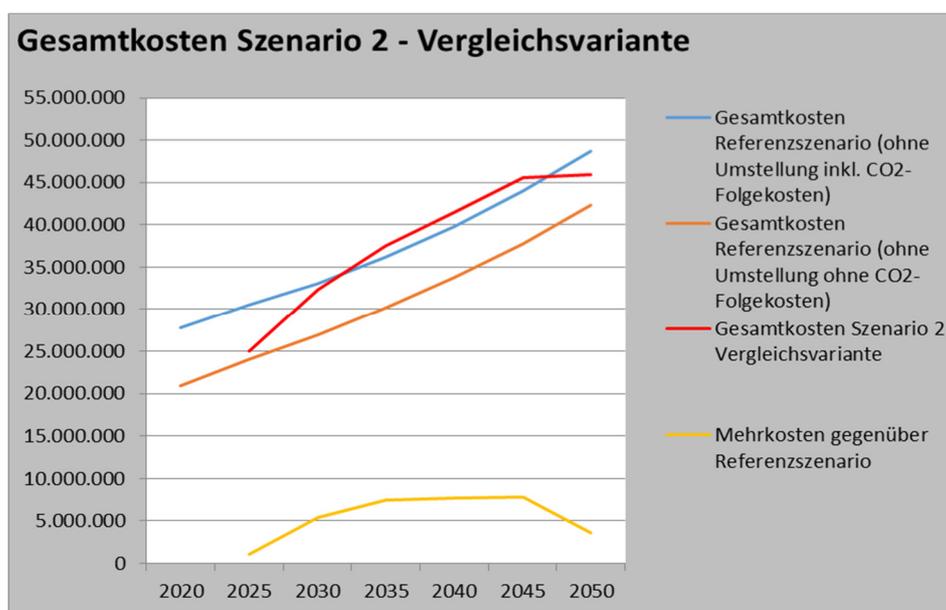


Abb. 48: Gesamtkosten - Vergleichsvariante Szenario 2

Die Kurve zeigt, dass es erheblich teurer ist, nur die Energieträger in Verantwortung des Energieversorgers bis 2045 auf CO₂-Neutralität umzustellen.

Die aufgezeigten Maßnahmen an den Gebäuden sind kosteneffizienter als lediglich die Umstellung der Energieträger.

In der Vergleichsvariante betragen die jährlichen Mehrkosten (Energiekosten) bis zu ca. 7,8 Millionen EUR gegenüber dem Referenzszenario (Szenario 1).

8.3 Szenario 3 „Zielszenario 2035 klimaneutrale Stadtverwaltung“

8.3.1 Annahmen für Szenario 3 „Zielszenario 2035“

Annahmen für direkte Maßnahmen durch Kommune an städteigenen Gebäuden:

- Erhöhung der Sanierungsquote von ca. 0,7% pro Jahr auf 2,0% pro Jahr (siehe Hypothese 4).
- Umstellung auf hybride Heizsysteme entsprechend Hypothese 5.
Umstellungsgrad 2025: 25% / 2030: 87,5% / 2035: 100%
- Umrüstung auf Wärmepumpen bei Neubauten und sanierten Gebäuden entsprechend Hypothese 6.
Umstellungsgrad 2025: 25% / 2030: 87,5% / 2035: 100%
- Erhöhung des Zubaus von PV auf Gebäuden und moderater Zubau von Stromspeichern entsprechend Hypothese 7.
Ausbaugrad PV 2025: 30% / 2030: 80% / 2035: 100%
Ausbaugrad Speicher 2025: 20% / 2030: 60% / 2035: 100%

Annahmen für Maßnahmen des Energieversorgers:

- Stromerzeugung bzw. Zukauf durch den Energieversorger:
Zubau erneuerbarer Energien (EE), dass bis 2035 CO₂-Neutralität erreicht wird (100% Erneuerbare Energien).
EE-Anteil 2025: 78,5% / 2030: 90,8% / 2035: 100%
- Fernwärmeerzeugung durch den Energieversorger:
Zubau erneuerbarer Energien (EE), dass bis 2035 CO₂-Neutralität erreicht wird (100% Erneuerbare Energien).
EE-Anteil 2025: 27,3% / 2030: 63,7% / 2035: 100%
- Gas: Zumischung Gas aus erneuerbaren Energien (EE) durch den Energieversorger, dass bis 2035 CO₂-Neutralität erreicht wird (100% Erneuerbare Energien).
EE-Anteil 2025: 0% / 2030: 50% / 2035: 100%
- Preissteigerung des „konventionellen“ Anteils der Energieträger in Höhe von 2% pro Jahr. Für den zusätzlichen Anteil erneuerbarer Energien wurden die Preise auf Basis der Hypothese 2 ermittelt.

8.3.2 CO₂-Emissionen Szenario 3 „Zielszenario 2035“

- Die CO₂-Emissionen werden von ca. 37.000 Tonnen im Jahr 2020 auf 0 Tonnen in 2035 reduziert.
- Die Reduzierung der CO₂-Emissionen wird durch die Reduzierung des Wärmebedarfs durch die Erhöhung der Sanierungsquote (von 0,7% auf 2,0%), die Umrüstung auf CO₂-effiziente Anlagentechnik sowie Umstellung auf erneuerbare Energieträger erreicht.
- Der kumulierte CO₂-Ausstoß bis 2050 beträgt ca. 306.000 Tonnen.
- **In diesem Szenario wird das Ziel des Stadtrates „Klimaneutralität bis 2035“ erreicht.**

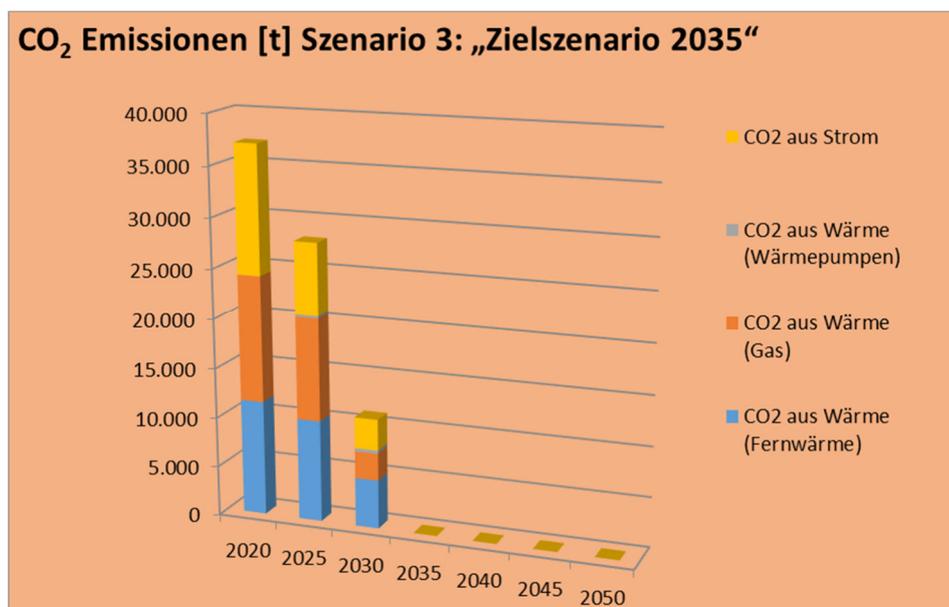


Abb. 49: CO₂-Emissionen Szenario 3 „Zielszenario 2035“

8.3.3 Kostenentwicklung Szenario 3 „Zielszenario 2035“

- Die jährlichen Kosten (Energiekosten + Umrüstung) erhöhen sich durch die vorgenannten Maßnahmen um ca. 7,5 Millionen EUR pro Jahr in 2030 und steigen bis auf ca. 10,5 Millionen EUR in 2035 gegenüber dem Referenzszenario (Szenario 1).

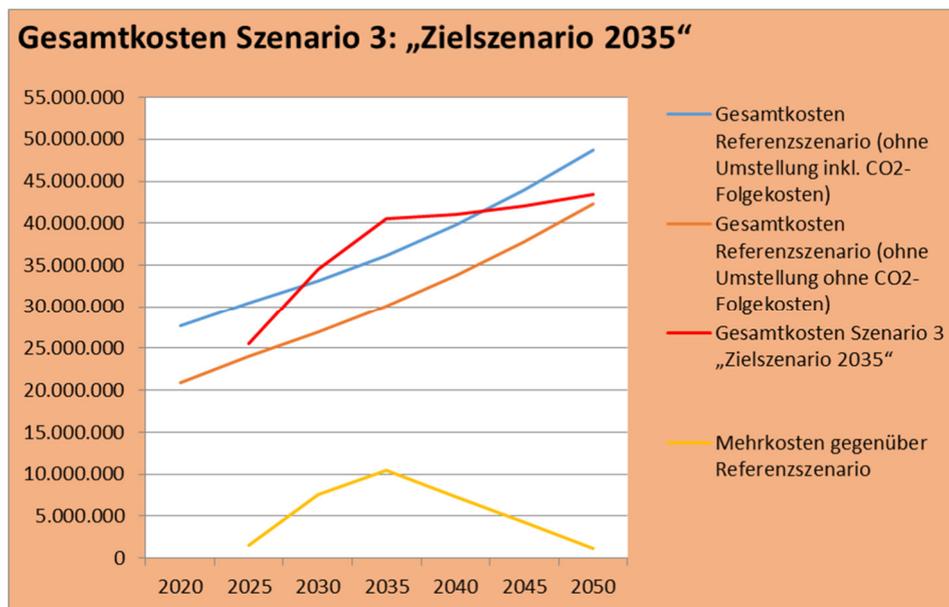


Abb. 50: Gesamtkosten Szenario 3 „Zielszenario 2035“

Die Kosten beinhalten:

- Mehrkosten für die Erhöhung der Sanierungsquote von 0,7% auf 2,0% pro Jahr (energetischer Anteil der Kosten).
- Kosten für die Umrüstung der Heizsysteme.
- Kosten für den steigenden Anteil der erneuerbaren Energien bei den Energieträgern (Strom, Fernwärme, Gas).

8.3.4 Szenario 3 - Vergleichsvariante

Zum Vergleich wurde betrachtet, wie sich die Kosten entwickeln würden, wenn lediglich die Energieträger in Verantwortung des Energieversorgers auf CO₂-Neutralität umgestellt und keine weiteren Maßnahmen an den Gebäuden durchgeführt würden.

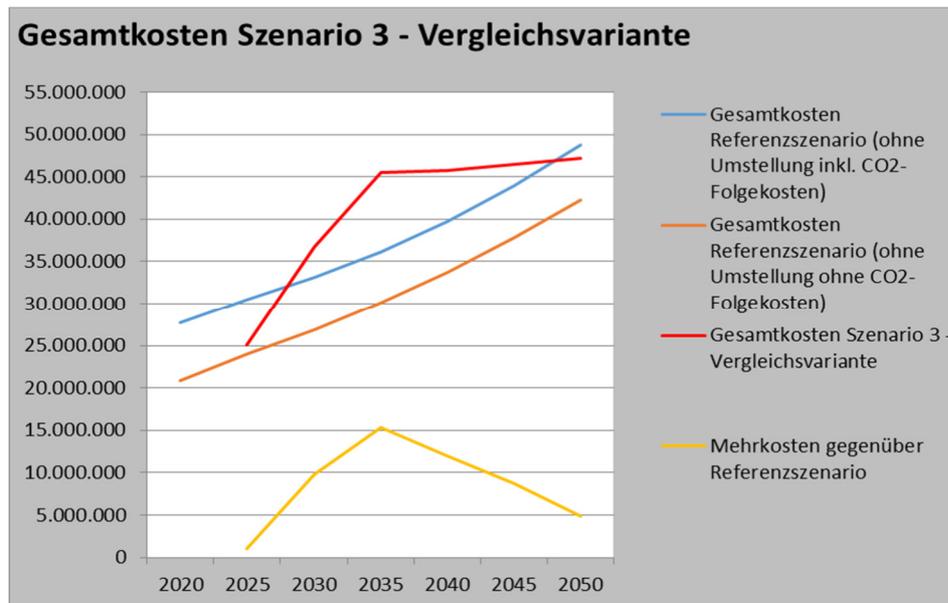


Abb. 51: Gesamtkosten - Vergleichsvariante Szenario 3

Die Kurve zeigt, dass es erheblich teurer ist, nur die Energieträger in Verantwortung des Energieversorgers bis 2035 auf CO₂-Neutralität umzustellen.

In der Vergleichsvariante betragen die jährlichen Mehrkosten (Energiekosten) bis zu ca. 15,3 Millionen EUR gegenüber dem Referenzszenario (Szenario 1).

9 Empfehlung und Umsetzungsfahrplan

9.1 Bewertung der Szenarien und Varianten

Nur im Szenario 3 wird das Ziel „klimaneutraler Gebäudebestand bis 2035“ realisiert.

Es muss von Seiten der Kommune und des Energieversorgers geprüft werden, ob die erforderlichen Maßnahmen und getroffenen Annahmen umgesetzt und die erforderlichen finanziellen, technischen und personellen Kapazitäten bereitgestellt werden können.

Alternativ zeigt das Szenario 2, wie sich eine langsamere Umsetzung des Ziels (bis 2045) auf die Kosten und die CO₂-Bilanz auswirken würden.

9.2 Empfehlungen

Die Betrachtungen zeigen, dass sich eine schnelle und umfangreiche Umsetzung der direkten Maßnahmen an den Gebäuden (Sanierung, Umrüstung der Heizung, Ausbau der PV mit Speichern), zusätzlich zur Reduzierung der CO₂-Emissionen, auch positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Die Umstellung der Energieträger in Verantwortung des Energieversorgers ist zunächst noch relativ teuer, wird aber mit der Zeit günstiger. Zur Erreichung der Zielvorgaben muss aber bereits zeitnah mit der Umstellung begonnen werden.

Je schneller die Maßnahmen direkt am Gebäudebestand umgesetzt werden, desto weniger müssen teure Energieträger zugekauft werden. Eine langsamere Umsetzung der direkten Maßnahmen an den Gebäuden erhöht die Gesamtkosten.

Varianten

Die Betrachtung der Vergleichsvarianten (nur Maßnahmen durch den Energieversorger, ohne direkte Maßnahmen an den Gebäuden) zeigt sehr deutlich, dass das Ziel der Klimaneutralität nur in Kooperation aller Beteiligten wirtschaftlich zu erreichen ist.

Eine Energieträgerumstellung lediglich durch den Energieversorger führt zu erheblich höheren Gesamtkosten.

9.3 Möglicher Umsetzungszeitplan

Es sollte kurzfristig mit der konkreten Planung der Maßnahmen an den Gebäuden, insbesondere der Erhöhung der Sanierungsquote, der Umstellung der Heiztechnik und dem PV-Ausbau begonnen werden.

Der Aspekt der Netzdienlichkeit sollte mit dem Energieversorger eng abgestimmt werden. Insbesondere die Optimierung von Regelungsstrategien und Betriebsweisen bietet hier großes Potential.

Die Umrüstung der Heizsysteme direkt an den Gebäuden und der Ausbau der PV-Anlagen auf den Gebäuden lassen sich relativ zeitnah umsetzen und voraussichtlich bis 2035 abschließen.

Die Gebäudesanierung erfordert einen höheren Planungsaufwand und damit einen längeren Vorlauf. Eine Umsetzung bei möglichst vielen Gebäuden bis 2035 sollte angestrebt werden.

Grundsätzlich gilt:

Technologien, die heute bereits kostengünstig umsetzbar sind und bei denen keine signifikanten Preisreduzierungen zu erwarten sind, sollten zeitnah eingesetzt werden (Sanierungen, BHKWs, PV, Wärmepumpen).

Technologien, die heute noch mit relativ hohen spezifischen Kosten verbunden sind (Elektrolyse, Methanisierung, Stromspeicher), sollten zunächst moderat eingesetzt und dann bei sinkenden Preisen in größerem Umfang ausgebaut werden.

9.4 CO₂-Ausstoß bis 2050

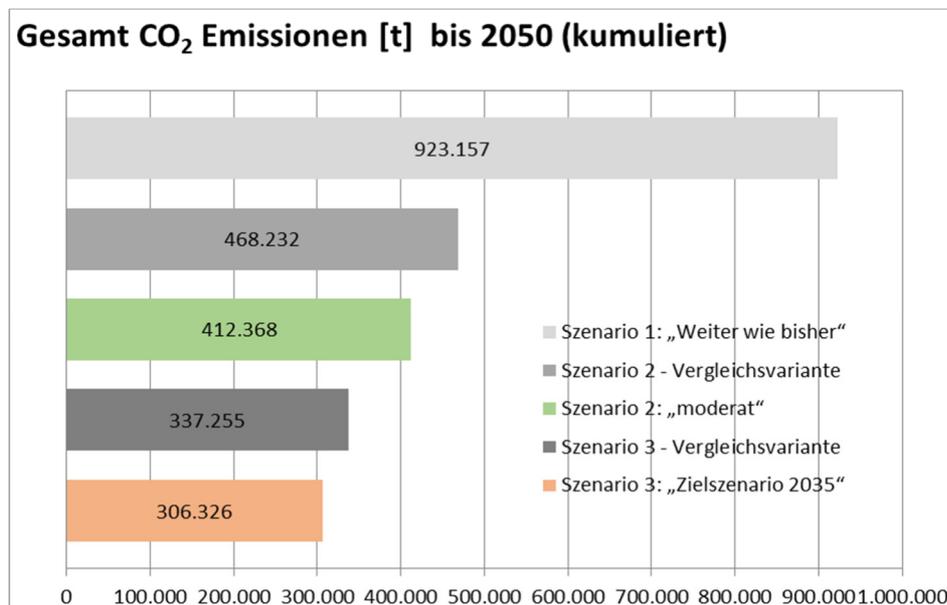


Abb. 52: kumulierter CO₂-Ausstoß aller Szenarien

Die Grafik zeigt den kumulierten CO₂-Ausstoß bis 2050 für die untersuchten Szenarien.

Auch hier wird deutlich, dass die beiden Vergleichsvarianten zu den Szenarien 2 und 3 (nur Umstellung der Energieträger durch den Energieversorger, ohne direkte Maßnahmen an den Gebäuden) neben höheren Kosten auch einen höheren kumulierten CO₂-Ausstoß verursachen, da die Reduzierung speziell am Anfang langsamer erfolgen würde.

Da bei der CO₂-Reduzierung in „Restbudgets“ gedacht werden muss, ist eine zeitnahe Reduzierung erheblich wirksamer, als eine langsamere Umsetzung.

9.5 Kosten pro eingesparte Tonne CO₂

Szenarienvergleich

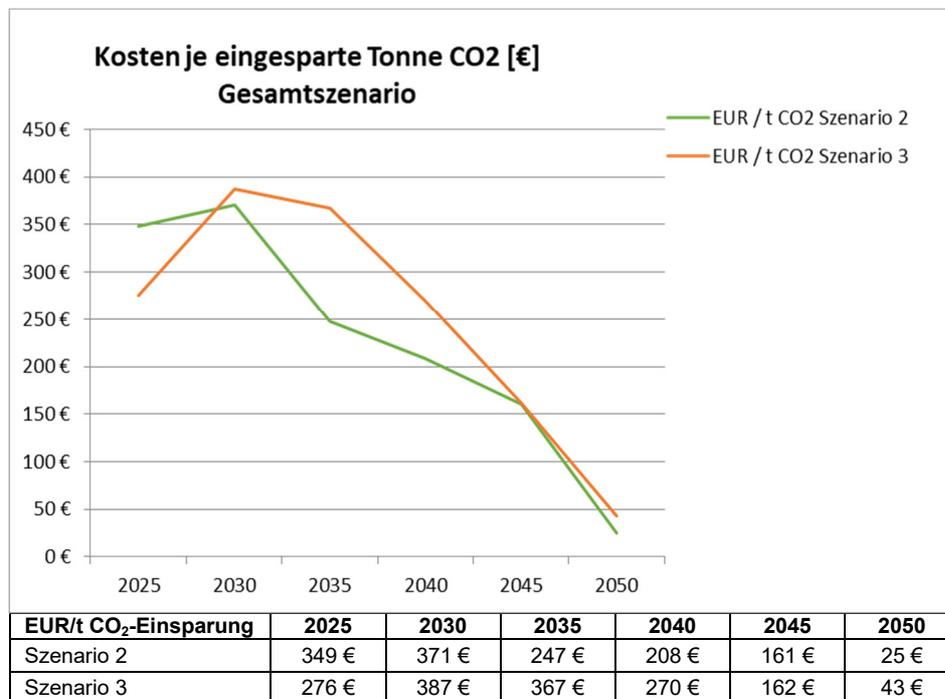


Abb. 53: Kosten je eingesparte Tonne CO₂ gegenüber Referenzszenario

Die Kosten für die Maßnahmen an den Gebäuden **und** die Maßnahmen des Energieversorgers wurden ins Verhältnis zu den hierdurch erreichten CO₂-Einsparungen (gegenüber dem Referenzszenario) gesetzt.

Die Kosten sind hierbei jeweils auf die Nutzungsdauer der einzelnen Maßnahmen (technische Anlagen 10-20 Jahre, Gebäudesanierung 50 Jahre) bezogen.

Bei der Gebäudesanierung wurde nur der energetisch relevante Anteil der Kosten berücksichtigt.

9.6 Gesamtkostenentwicklung (Vollkosten)

Die Gesamtkosten für Energieträger (Wärme und Strom), Sanierung (Vollkostenansatz) und Umrüstung entwickeln sich wie folgt:

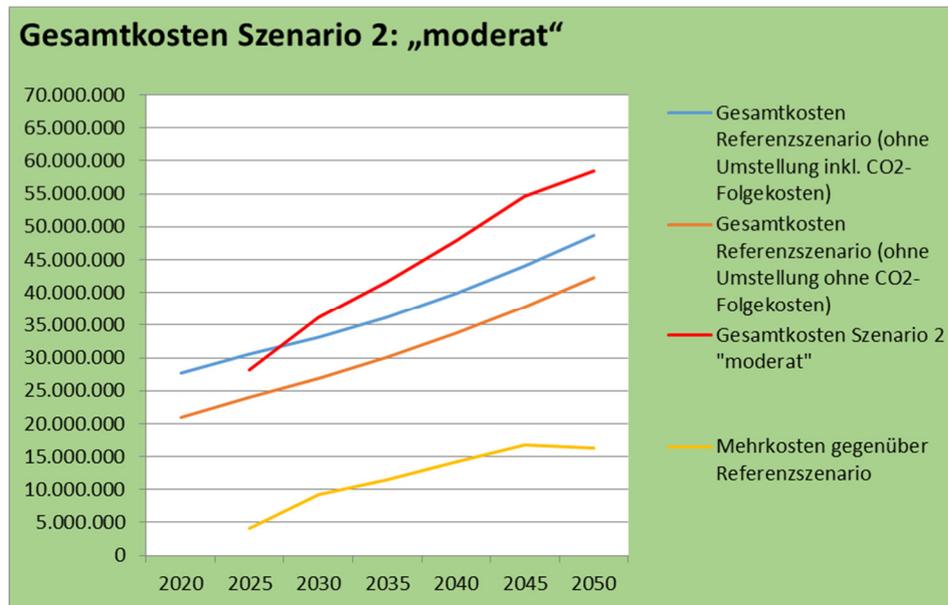


Abb. 54: Kostenentwicklung Szenario 2 „moderat“ (Vollkostenansatz)

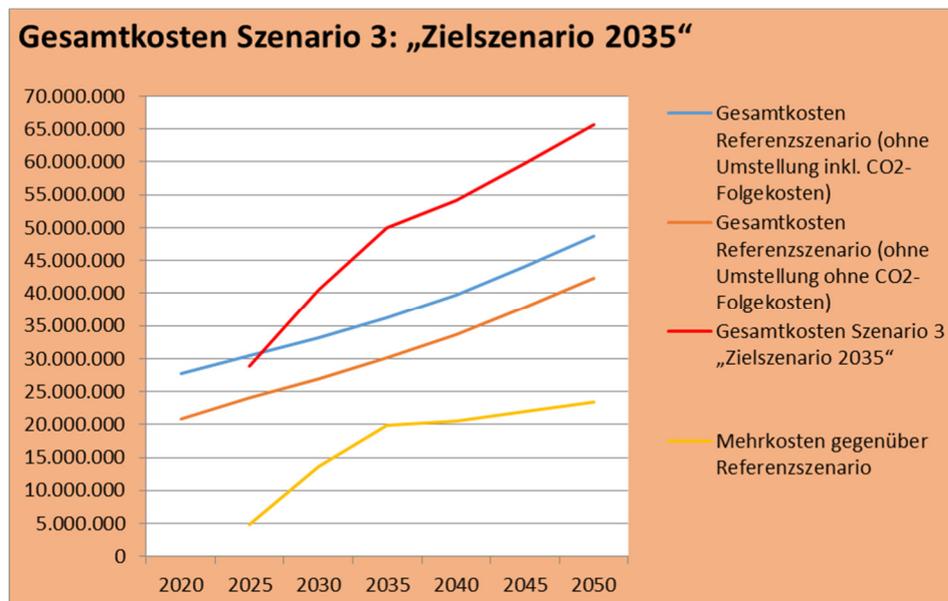


Abb. 55: Kostenentwicklung Szenario 3 „Zielszenario 2035“ (Vollkostenansatz)

10 Hindernisse

Sanierungsquote und Umrüstungsquote

Die Erhöhung der Sanierungsquote ist mit zahlreichen Hindernissen verbunden. So kann das Sanierungsvolumen nur soweit gesteigert werden, wie es auch vom Hochbauamt und der wbg-k abgewickelt werden kann.

Möglicherweise kann auch die ohnehin gut ausgelastete Baubranche die zusätzlich erforderlichen Kapazitäten und Materialien nicht ausreichend bereitstellen.

Ähnliches gilt für die Umrüstung der Anlagentechnik in den Gebäuden. Hier könnten ggf. große Teile über Contracting abgewickelt und damit die Umsetzung u.U. erleichtert werden.

Finanzierung

Zum Aufbau eines CO₂-neutralen Gebäudebestandes und der dafür erforderlichen Infrastruktur sind erhebliche Investitionen von Seiten der Stadt Nürnberg sowie von Seiten des Energieversorgers erforderlich. Diese können über Kredite und Zuschüsse (z.B. Bundesförderung energieeffiziente Gebäude BEG; KfW und BAfA) unterstützt werden. Alternativ könnten die Investitionen über Contracting verschoben und über entsprechend angepasste Energielieferverträge gedeckt werden.

Photovoltaik und Speicher an Gebäuden

Es müssen ausreichend geeignete Flächen für PV-Anlagen auf Gebäuden gefunden werden. Durch den hohen Anteil an denkmalgeschützten Gebäuden wird eine Erweiterung des Potentials über die in dieser Studie betrachteten gut geeigneten Dachflächen hinaus erschwert. Leicht geneigte Dächer wurden für die PV-Nutzung berücksichtigt. Darüber hinaus wären zahlreiche weitere geeignete Flächen auf denkmalgeschützten Gebäuden vorhanden. Allerdings müssten Lösungen gefunden werden, die denkmalverträglich sind und mit vertretbarem Kosten- und Abstimmungsaufwand umgesetzt werden können.

Umstellung der Energieträger auf CO₂-Neutralität

Zur Umsetzung der Szenarien sind auf Seiten des Energieversorgers erhebliche Maßnahmen und Investitionen erforderlich. Ohne die Umstellung der Energieträger Strom, Fernwärme und Gas auf CO₂-Neutralität kann keine vollständige Klimaneutralität des Gebäudebestandes erreicht werden.

Biomasse

Die Biomasse (insbesondere Holz) könnte in gewissem Umfang ergänzend eingesetzt werden. Hierbei ist aber unbedingt die Einhaltung von Nachhaltigkeitskriterien kritisch zu prüfen. Die energetische Nutzung sollte nicht in Konkurrenz stehen zu anderen Nutzungen wie Bauholz, die ebenfalls wichtig sind für die Erreichung der CO₂-Neutralität im Gebäudesektor.

Flächenbedarf

Zur Errichtung zusätzlicher PV-Anlagen durch den Energieversorger, die für die Erzeugung CO₂-neutraler Energieträger erforderlich sind, müssen geeignete Flächen in der Region gefunden werden. Die Standorte müssen entsprechend erschlossen sein, um den erzeugten Strom auch ins Netz einspeisen zu können.

Windkraft

Ein weiterer Ausbau der Windkraft wäre bei der Umstellung auf erneuerbare Energieträger sehr hilfreich und würde den Bedarf an teuren synthetischen Gasen und Speichern senken. Die aktuelle Gesetzes- bzw. Verordnungslage lässt jedoch kaum einen weiteren Ausbau zu. Dies erhöht letztlich die Systemkosten der Umstellung auf CO₂-Neutralität.

11 Anhang 1 - Szenarien ohne Preissteigerung

Zum Vergleich werden hier die Szenarien nochmals dargestellt, jedoch nur mit den energetischen Kosten und ohne Preissteigerung bei den Energiekosten und Sanierungskosten.

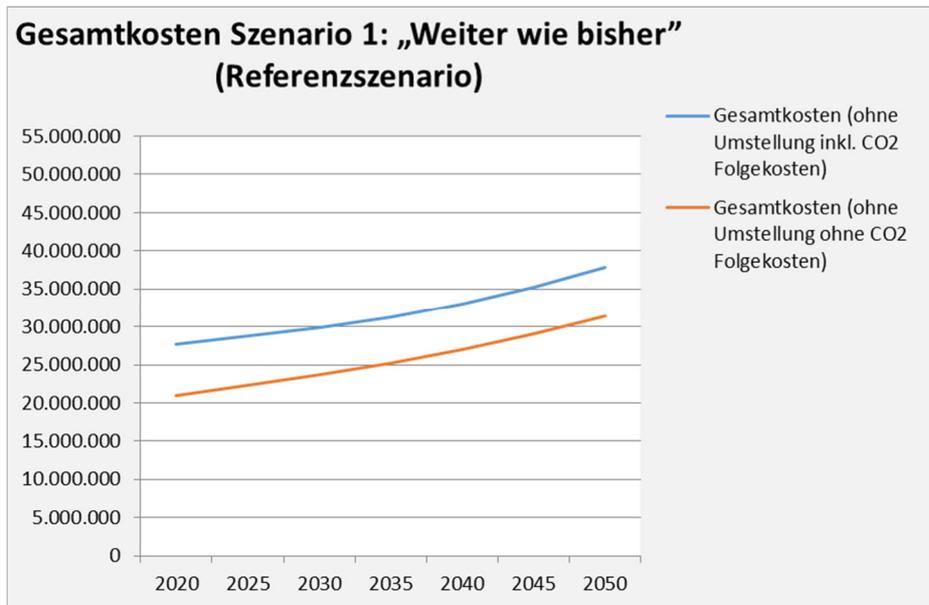


Abb. 56: Kostenverlauf Szenario 1 "Weiter wie bisher" ohne Preissteigerungen

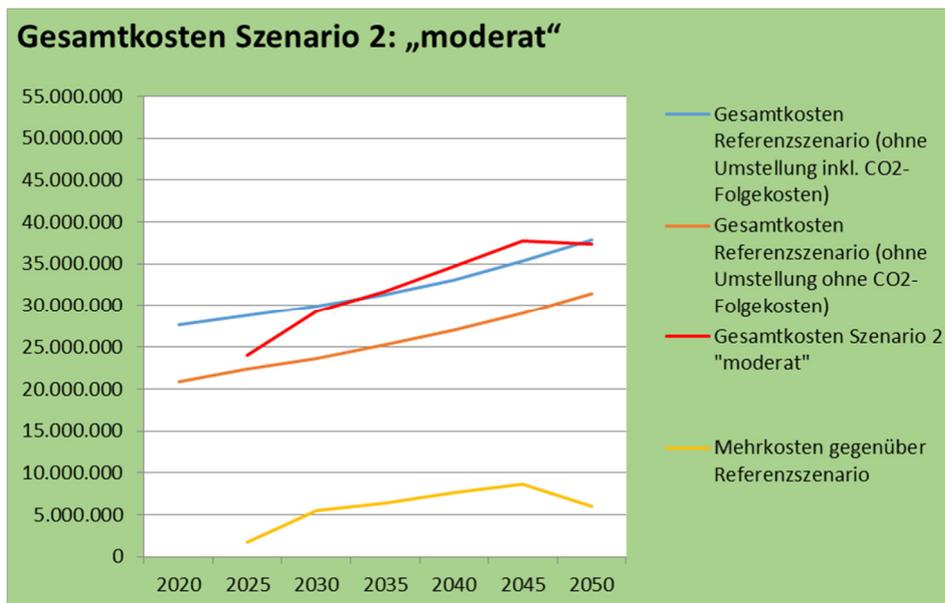


Abb. 57: Kostenverlauf Szenario 2 "moderat" ohne Preissteigerungen

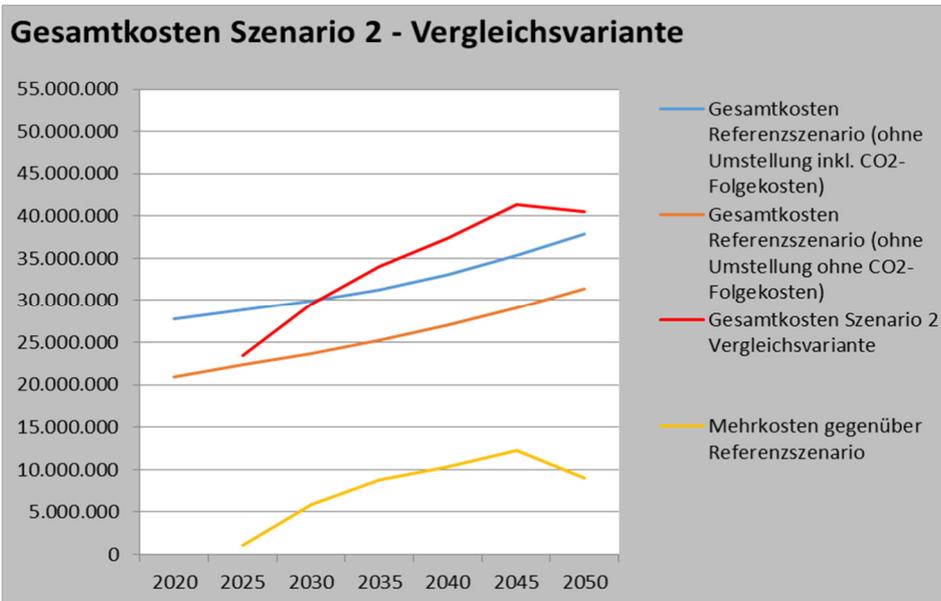


Abb. 58: Kostenverlauf Szenario 2 -Vergleichsvariante ohne Preissteigerungen

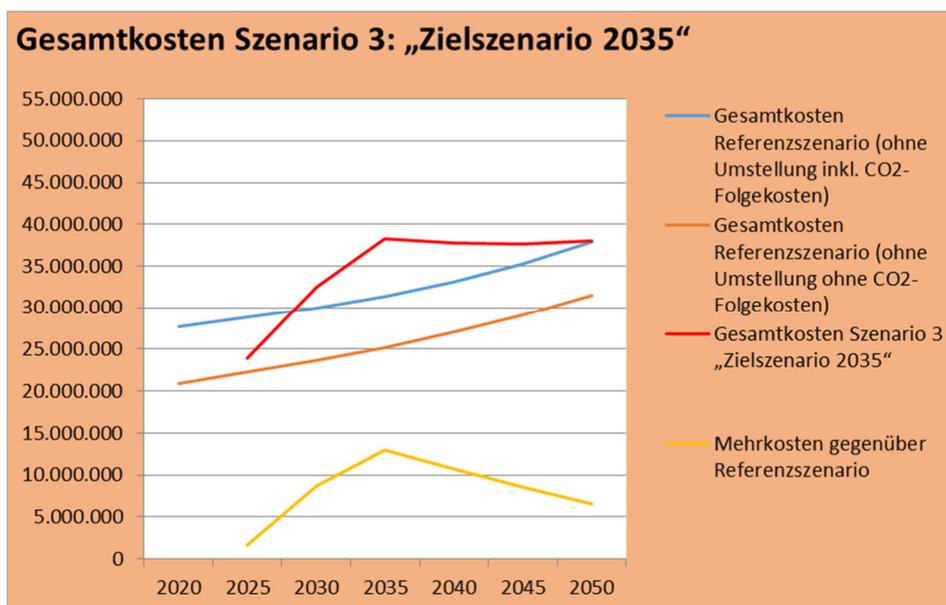


Abb. 59: Kostenverlauf Szenario 3 "Zielszenario 2035" ohne Preissteigerungen

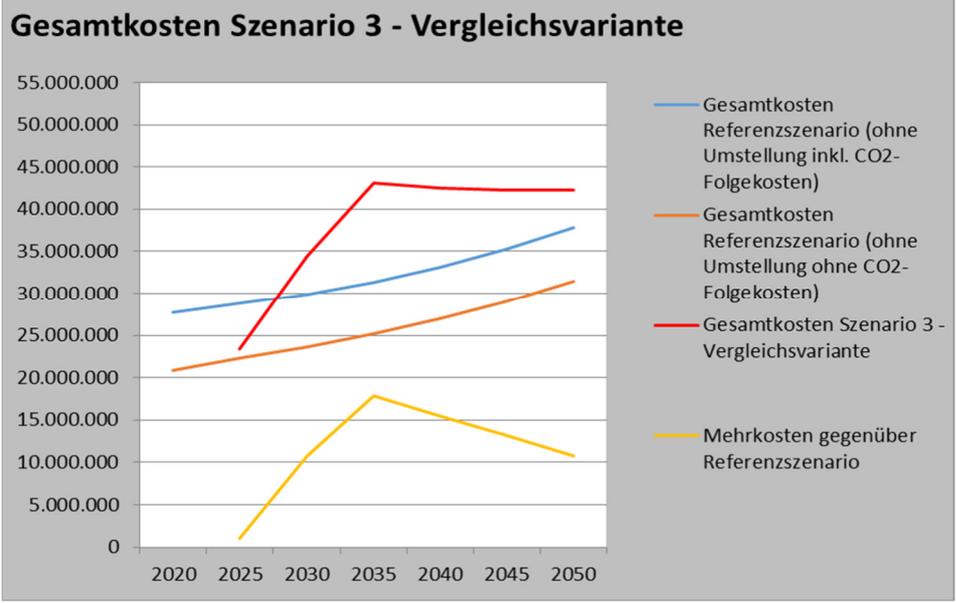


Abb. 60: Kostenverlauf Szenario 3 - Vergleichsvariante ohne Preissteigerungen

12 Anhang 2 - Quellen und Grundlagen

Grundlagen

| IST-Zustand | | | | | | | |
|---------------------------------|---------|-----------------|-------------|-------------|----------------|-------------|--|
| Zusammenfassung Verbrauch | Objekte | NGF | Wärme | Spez. Wärme | Strom | Spez. Strom | |
| Basiswerte 100% | 414 | 1.022.038,23 m² | 142.070.197 | 139 kWh/m² | 46.473.297 kWh | 45 kWh/m² | |
| Sanierungsgebäude ohne Sonstige | 279 | 677.292,34 m² | 77.655.349 | | 16.265.824 kWh | | |

| | 2019 | Wärmebedarf | | Heizwert | | Brennstoffbedarf | |
|---------------------------|------|-------------|--------|------------|-------|------------------|--|
| | | kWh | €/kWh | € | €/kWh | | |
| Verbrauch u. Kosten heute | | | | | | | |
| Fernwärme | | 80.852.474 | 0,08 € | 6.864.375 | 0,085 | | |
| nicht Fernwärme | | 61.217.723 | 0,07 € | 4.150.562 | 0,068 | | |
| Summe: | | 142.070.197 | | 11.014.937 | 0,278 | | |

| Flächenzuwachs 1% | 2019 | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
|--------------------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Flächen mit Zuwachs [m²] | | 1.032.259 | 1.083.361 | 1.134.462 | 1.185.564 | 1.236.666 | 1.287.768 | 1.338.870 |

| Energiedaten KEM | | | | | | | | Quelle: KEM | EE-Anteil Strom geändert am 08.07.2021 von 45,5% auf 60,5% |
|--|--------|-----------|-----------------|---------------|-------------|---------|--|-------------|--|
| Kosten aktuell (2019) | Strom | Wärme Gas | Wärme Fernwärme | Hackschnitzel | HS. ab 2030 | Pellets | | | |
| Brennwert [€/kWh] | 0,2124 | 0,0611 | 0,0849 | 0,0231 | | 0,0463 | | | |
| Heizwert [€/kWh] | 0,2124 | 0,0678 | 0,0849 | 0,0250 | | 0,0500 | | | |
| CO2 - Emissionen [kg/kWh] | 0,2780 | 0,2020 | 0,1440 | 0,0181 | | 0,0186 | | | |
| CO2 - Klimafolgekosten [€/kg] | 0,0514 | | | | | | | | |
| Anteil der EE | 60,5% | 0,0% | 21,3% | 100,0% | | 100,0% | | | |
| Preissteigerung/Jahr der letzten 10J [%] | 3,15% | -1,17% | 1,72% | 0,00% | | 0,89% | | | |

Festlegung Preissteigerung siehe Preissteigerungen...

| Nachhaltigkeitsgrenze | | | | | | | | Quelle PHI |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Nachhaltigkeitsgr. Biomasse [kWh/m²a] | 20 | 20.440.765 | kWh | | | | | |
| | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | |
| Nachhaltigkeitsgr. Biomasse [kWh/m²a] | 20.645.172 | 20.645.172 | 21.667.210 | 22.689.249 | 23.711.287 | 24.733.325 | 25.755.363 | 26.777.402 |
| CO2 - Klimafolgekosten [€/t] | 185,00 | 196,38 | 205,38 | 214,26 | 223,52 | 233,18 | 243,26 | |

| Energiebezugskosten | | | | | | | | | | |
|---|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------------------|---------------------|---|
| Szenario 1 | | | | | | | | | Ausbau | ermittelt gem. Email Nordhus 05.07.2021 |
| | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | derzeitiger Zuw. /a | | |
| Szenario 1 | Steigerung EE-Anteil Strom pro Jahr | 2,00% | 1,50% | 1,00% | 0,50% | 0,10% | 0,00% | 0,00% | | |
| | Zeitlicher Verlauf EE-Anteil im Strom | 60,5% | 72,5% | 80,0% | 85,0% | 87,5% | 88,0% | 88,0% | | |
| | Fossiler Anteil Strom | 39,5% | 27,5% | 20,0% | 15,0% | 12,5% | 12,0% | 12,0% | Ziel 2045: | |
| | CO2 - Emissionen Strom [kg/kWh] | 0,2780 | 0,194 | 0,141 | 0,106 | 0,088 | 0,084 | 0,084 | 88,0% | |
| | CO2 - Klimafolgekosten Strom [€/kWh] | 0,051 € | 0,038 € | 0,029 € | 0,023 € | 0,020 € | 0,020 € | 0,021 € | kg/% | |
| | Strompreis inkl. Klimafolgekosten [€/kWh] | 0,264 € | 0,277 € | 0,293 € | 0,314 € | 0,342 € | 0,375 € | 0,413 € | 0,704 | |
| | Strompreis N-ERGIE | 0,212 € | 0,239 € | 0,264 € | 0,292 € | 0,322 € | 0,355 € | 0,392 € | | |
| | Preissteigerung Gestehungskosten | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | | |
| | Gestehungspreis Strom | 0,050 € | 0,056 € | 0,062 € | 0,069 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,092 € | | |
| | Gestehungspreis Strom EE - In Preissteigerung enthalten! | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | | |
| Szenario 2 | Gewichteter Gestehungspreis | 0,050 € | 0,056 € | 0,062 € | 0,069 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,092 € | | |
| | Gebührenanteil am Endpreis | 76,5% | 76,5% | 76,5% | 76,5% | 76,5% | 76,5% | 76,5% | | |
| | Preissteigerung Gebühren | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | | |
| | Gebühren u. Zulagen für Strom | 0,162 € | 0,183 € | 0,202 € | 0,223 € | 0,246 € | 0,272 € | 0,300 € | | |
| | | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | derzeitiger Zuw. /a | |
| | Steigerung EE-Anteil Strom pro Jahr | 3,00% | 1,90% | 1,10% | 0,90% | 0,40% | 0,00% | 0,00% | 2,94% | |
| | Zeitlicher Verlauf EE-Anteil im Strom | 60,5% | 78,5% | 88,0% | 93,5% | 98,0% | 100,0% | 100,0% | | |
| | Fossiler Anteil Strom | 39,5% | 21,5% | 12,0% | 6,5% | 2,0% | 0,0% | 0,0% | Ziel D 2045: | |
| | CO2 - Emissionen Strom [kg/kWh] | 0,2780 | 0,151 | 0,084 | 0,046 | 0,014 | 0,000 | 0,000 | 100,0% | |
| | CO2 - Klimafolgekosten Strom [€/kWh] | 0,051 € | 0,030 € | 0,017 € | 0,010 € | 0,003 € | 0,000 € | 0,000 € | kg/% | |
| Strompreis inkl. Klimafolgekosten [€/kWh] | 0,264 € | 0,285 € | 0,300 € | 0,315 € | 0,337 € | 0,364 € | 0,396 € | 0,704 | | |
| Strom N-ERGIE | Strompreis N-ERGIE | 0,212 € | 0,256 € | 0,283 € | 0,305 € | 0,334 € | 0,364 € | 0,396 € | | |
| | Preissteigerung Gestehungskosten | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | | |
| | Gestehungspreis Strom | 0,050 € | 0,056 € | 0,062 € | 0,069 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,092 € | | |
| | Gestehungspreis Strom EE - bis 2025 In Preissteigerung enthalten! | 0,000 € | 0,332 € | 0,297 € | 0,224 € | 0,187 € | 0,157 € | 0,119 € | | |
| | Gewichteter Gestehungspreis | 0,050 € | 0,073 € | 0,081 € | 0,082 € | 0,087 € | 0,093 € | 0,096 € | | |
| | Gebührenanteil am Endpreis | 76,5% | 71,5% | 71,4% | 73,2% | 73,8% | 74,6% | 75,8% | | |
| | Preissteigerung Gebühren | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | | |
| | Gebühren u. Zulagen für Strom | 0,162 € | 0,183 € | 0,202 € | 0,223 € | 0,246 € | 0,272 € | 0,300 € | | |

| Szenario 3 | | 100,00% | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|---|-----------------------------|
| | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | | | | |
| Szenario 3 | Steigerung EE-Anteil Strom pro Jahr | 3,00% | 2,45% | 1,85% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | | derzeitiger Zuw. /a | ermittelt gem. Email Nordhus 05.07.2021 | |
| | Zeitlicher Verlauf EE-Anteil im Strom | 60,5% | 78,5% | 90,8% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | | 2,94% | | |
| | Fossiler Anteil Strom | 39,5% | 21,5% | 9,3% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | | Ziel Nbg 2035: | | |
| | CO2 - Emissionen Strom [kg/kWh] | 0,2780 | 0,151 | 0,065 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | | 100,0% | Gem Mail Nordhus 03.03.2021 |
| | CO2 - Klimafolgekosten Strom [€/kWh] | 0,051 € | 0,030 € | 0,013 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | | kg/% | |
| | Strompreis inkl. Klimafolgekosten [€/kWh] | 0,264 € | 0,285 € | 0,302 € | 0,315 € | 0,337 € | 0,364 € | 0,396 € | | 0,704 | |
| | Strompreis N-ERGIE | 0,212 € | 0,256 € | 0,289 € | 0,315 € | 0,337 € | 0,364 € | 0,396 € | | | |
| | Preissteigerung Gestehtungskosten | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | | | |
| | Gestehtungspreis Strom | 0,050 € | 0,056 € | 0,062 € | 0,069 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,092 € | | | |
| | Gestehtungspreis Strom EE - bis 2025 in Preissteigung enthalten! | 0,000 € | 0,331 € | 0,292 € | 0,226 € | 0,195 € | 0,158 € | 0,120 € | | | |
| | Gewichteter Gestehtungspreis | 0,050 € | 0,073 € | 0,087 € | 0,092 € | 0,091 € | 0,093 € | 0,096 € | | | |
| | Gebührenanteil am Endpreis | 76,5% | 71,5% | 69,9% | 70,7% | 73,1% | 74,6% | 75,8% | | | |
| | Preissteigerung Gebühren | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | | | |
| Gebühren u. Zulagen für Strom | 0,162 € | 0,183 € | 0,202 € | 0,223 € | 0,246 € | 0,272 € | 0,300 € | | | | |

| Szenario 1 | | 100,00% | | | | | | | | |
|------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|-------|
| | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | | | |
| Szenario 1 | Steigerung EE-Anteil FW pro Jahr | 0,0% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | | derzeitiger Zuw. /a | |
| | Zeitlicher Verlauf EE-Anteil in FW | 21,3% | 21,3% | 21,3% | 21,3% | 21,3% | 21,3% | | 0,00% | |
| | Fossiler Anteil FW | 78,7% | 78,7% | 78,7% | 78,7% | 78,7% | 78,7% | | kg/% | |
| | CO2 - Emissionen Fernwärme [kg/kWh] | 0,1440 | 0,144 | 0,144 | 0,144 | 0,144 | 0,144 | 0,144 | | 0,183 |
| | CO2 - Klimafolgekosten FW [€/kWh] | 0,027 € | 0,028 € | 0,030 € | 0,031 € | 0,032 € | 0,034 € | 0,035 € | | |
| | FW -Preis inkl. Klimafolgekosten [€/kWh] | 0,112 € | 0,124 € | 0,135 € | 0,147 € | 0,161 € | 0,176 € | 0,192 € | | |
| | Fernwärmepreis N-ERGIE | 0,0849 € | 0,096 € | 0,106 € | 0,117 € | 0,129 € | 0,142 € | 0,157 € | | |
| | Gestehtungspreis Wärme | 0,050 € | 0,056 € | 0,062 € | 0,069 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,092 € | | |
| | Gestehtungspreis Wärme EE - bis 2050 in Preissteigung enthalten! | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | | |
| | Gewichteter Gestehtungspreis | 0,050 € | 0,056 € | 0,062 € | 0,069 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,092 € | | |
| | Gebührenanteil am Endpreis | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | | |
| | Gebühren u. Zulagen für Wärme | 0,035 € | 0,039 € | 0,043 € | 0,048 € | 0,053 € | 0,058 € | 0,064 € | | |

| Szenario 2 | | 100,00% | | | | | | | | |
|------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------------------------|
| | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | | | |
| Szenario 2 | Steigerung EE-Anteil FW pro Jahr | 1,0% | 3,635% | 3,635% | 3,635% | 3,635% | 0,0% | 0,0% | derzeitiger Zuw. /a | ermittelt gem. Ausbauziel N-ERGIE |
| | Zeitlicher Verlauf EE-Anteil in FW | 21,3% | 27,3% | 45,5% | 63,7% | 81,8% | 100,0% | 100,0% | 3,64% | |
| | Fossiler Anteil FW | 78,7% | 72,7% | 54,5% | 36,4% | 18,2% | 0,0% | 0,0% | Ziel N-ERGIE 2045: | |
| | CO2 - Emissionen Fernwärme [kg/kWh] | 0,1440 | 0,133 | 0,100 | 0,067 | 0,033 | 0,000 | 0,000 | | 100,0% |
| | CO2 - Klimafolgekosten FW [€/kWh] | 0,027 € | 0,026 € | 0,020 € | 0,014 € | 0,007 € | 0,000 € | 0,000 € | | kg/% |
| | FW -Preis inkl. Klimafolgekosten [€/kWh] | 0,112 € | 0,135 € | 0,169 € | 0,188 € | 0,198 € | 0,208 € | 0,194 € | | 0,183 |
| | Fernwärmepreis N-ERGIE | 0,0849 € | 0,109 € | 0,149 € | 0,173 € | 0,191 € | 0,208 € | 0,194 € | | |
| | Gestehtungspreis Wärme | 0,050 € | 0,056 € | 0,062 € | 0,069 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,092 € | | |
| | Gestehtungspreis Wärme EE | 0,000 € | 0,280 € | 0,241 € | 0,203 € | 0,178 € | 0,167 € | 0,140 € | | |
| | Gewichteter Gestehtungspreis | 0,050 € | 0,070 € | 0,105 € | 0,126 € | 0,138 € | 0,149 € | 0,129 € | | |
| | Gebührenanteil am Endpreis | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | | |
| | Gebühren u. Zulagen für Wärme | 0,035 € | 0,039 € | 0,043 € | 0,048 € | 0,053 € | 0,058 € | 0,064 € | | |

| Szenario 3 | | 100,00% | | | | | | | | |
|------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|-----------------------------------|
| | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | | | |
| Szenario 3 | Steigerung EE-Anteil FW pro Jahr | 1,0% | 7,27% | 7,27% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | | derzeitiger Zuw. /a | ermittelt gem. Ausbauziel N-ERGIE |
| | Zeitlicher Verlauf EE-Anteil in FW | 21,3% | 27,3% | 63,7% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 3,64% | |
| | Fossiler Anteil FW | 78,7% | 72,7% | 36,4% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | Ziel 2035: | |
| | CO2 - Emissionen Fernwärme [kg/kWh] | 0,1440 | 0,133 | 0,067 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | | 100,0% |
| | CO2 - Klimafolgekosten FW [€/kWh] | 0,027 € | 0,026 € | 0,014 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | | kg/% |
| | FW -Preis inkl. Klimafolgekosten [€/kWh] | 0,112 € | 0,135 € | 0,193 € | 0,230 € | 0,222 € | 0,214 € | 0,207 € | | 0,183 |
| | Fernwärmepreis N-ERGIE | 0,0849 € | 0,109 € | 0,179 € | 0,230 € | 0,222 € | 0,214 € | 0,207 € | | |
| | Gestehtungspreis Wärme | 0,050 € | 0,056 € | 0,062 € | 0,069 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,092 € | | |
| | Gestehtungspreis Wärme EE | 0,000 € | 0,279 € | 0,236 € | 0,212 € | 0,194 € | 0,175 € | 0,147 € | | |
| | Gewichteter Gestehtungspreis | 0,050 € | 0,070 € | 0,136 € | 0,182 € | 0,169 € | 0,155 € | 0,142 € | | |
| | Gebührenanteil am Endpreis | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | 41,1% | | |
| | Gebühren u. Zulagen für Wärme | 0,035 € | 0,039 € | 0,043 € | 0,048 € | 0,053 € | 0,058 € | 0,064 € | | |

| | | 100,00% | | | | | | | | | |
|-------------------------------|------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|--------------|--|
| Gas | Szenario 1 | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | derzeitiger Zuw. /a | | |
| | | Steigerung EE-Anteil FW pro Jahr | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,00% | |
| | | Zeitlicher Verlauf EE-Anteil | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | | |
| | | Fossiler Anteil FW | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | | |
| | | CO2 - Emissionen [kg/kWh] | 0,2020 | 0,202 | 0,202 | 0,202 | 0,202 | 0,202 | 0,202 | | |
| | | CO2 - Klimafolgekosten FW [€/kWh] | 0,037 € | 0,040 € | 0,041 € | 0,043 € | 0,045 € | 0,047 € | 0,049 € | kg/% | |
| | | Wärmepre. inkl. Klimafolgekosten [€/kWh] | 0,105 € | 0,116 € | 0,126 € | 0,136 € | 0,148 € | 0,161 € | 0,174 € | 0,202 | |
| | | Wärmepreis Gas | 0,0678 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,093 € | 0,103 € | 0,113 € | 0,125 € | | |
| | | Gestehtungspreis Wärme | 0,0678 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,093 € | 0,103 € | 0,113 € | 0,125 € | | |
| | | Gestehtungspreis Wärme EE | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | | |
| Gewichteter Gestehtungspreis | 0,068 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,093 € | 0,103 € | 0,113 € | 0,125 € | | | | |
| Gebührenanteil am Endpreis | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | | | | |
| Gebühren u. Zulagen für Wärme | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | | | | |
| Szenario 2 | | 100,00% | | | | | | | | | |
| Gas | Szenario 2 | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | derzeitiger Zuw. /a | | |
| | | Steigerung EE-Anteil FW pro Jahr | 0,0% | 5,0% | 5,0% | 5,0% | 5,0% | 5,0% | 0,0% | 0,00% | |
| | | Zeitlicher Verlauf EE-Anteil | 0,0% | 0,0% | 25,0% | 50,0% | 75,0% | 100,0% | 100,0% | Ziel 2045: | |
| | | Fossiler Anteil FW | 100,0% | 100,0% | 75,0% | 50,0% | 25,0% | 0,0% | 0,0% | 100,0% | |
| | | CO2 - Emissionen [kg/kWh] | 0,2020 | 0,202 | 0,152 | 0,101 | 0,051 | 0,000 | 0,000 | kg/% | |
| | | CO2 - Klimafolgekosten FW [€/kWh] | 0,037 € | 0,040 € | 0,031 € | 0,022 € | 0,011 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,202 | |
| | | Wärmepre. inkl. Klimafolgekosten [€/kWh] | 0,105 € | 0,116 € | 0,152 € | 0,170 € | 0,172 € | 0,172 € | 0,145 € | | |
| | | Wärmepreis Gas | 0,0678 € | 0,076 € | 0,121 € | 0,148 € | 0,161 € | 0,172 € | 0,145 € | | |
| | | Gestehtungspreis Wärme | 0,0678 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,093 € | 0,103 € | 0,113 € | 0,125 € | | |
| | | Gestehtungspreis Wärme EE | 0,000 € | 0,277 € | 0,229 € | 0,204 € | 0,180 € | 0,172 € | 0,145 € | | |
| Gewichteter Gestehtungspreis | 0,068 € | 0,076 € | 0,121 € | 0,148 € | 0,161 € | 0,172 € | 0,145 € | | | | |
| Gebührenanteil am Endpreis | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | | | | |
| Gebühren u. Zulagen für Wärme | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | | | | |
| Szenario 3 | | 100,00% | | | | | | | | | |
| Gas | Szenario 3 | 2019 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 | derzeitiger Zuw. /a | | |
| | | Steigerung EE-Anteil FW pro Jahr | 0,0% | 10,0% | 10,0% | 10,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,00% | |
| | | Zeitlicher Verlauf EE-Anteil | 0,0% | 0,0% | 50,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | 100,0% | Ziel 2035: | |
| | | Fossiler Anteil FW | 100,0% | 100,0% | 50,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 100,0% | |
| | | CO2 - Emissionen [kg/kWh] | 0,2020 | 0,202 | 0,101 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | kg/% | |
| | | CO2 - Klimafolgekosten FW [€/kWh] | 0,037 € | 0,040 € | 0,021 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,202 | |
| | | Wärmepre. inkl. Klimafolgekosten [€/kWh] | 0,105 € | 0,116 € | 0,178 € | 0,214 € | 0,196 € | 0,180 € | 0,153 € | | |
| | | Wärmepreis Gas | 0,0678 € | 0,076 € | 0,157 € | 0,214 € | 0,196 € | 0,180 € | 0,153 € | | |
| | | Gestehtungspreis Wärme | 0,0678 € | 0,076 € | 0,084 € | 0,093 € | 0,103 € | 0,113 € | 0,125 € | | |
| | | Gestehtungspreis Wärme EE | 0,000 € | 0,277 € | 0,229 € | 0,214 € | 0,196 € | 0,180 € | 0,153 € | | |
| Gewichteter Gestehtungspreis | 0,068 € | 0,076 € | 0,157 € | 0,214 € | 0,196 € | 0,180 € | 0,153 € | | | | |
| Gebührenanteil am Endpreis | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | | | | |
| Gebühren u. Zulagen für Wärme | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | 0,000 € | | | | |

| CO2 Daten | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|---------|--------|--|--|--|--|--|
| CO2 Wärme kg/kWh (Gas) | 0,2020 | 0,2020 | 0,2020 | 0,2020 | | | | | |
| Ges. CO2 Emissionen Gas (heute) [t] | 12.366 | 12.366 | 12.366 | 12.366 | | | | | |
| CO2 Wärme kg/kWh (Fernwärme) | 0,1440 | 0,1440 | 0,1440 | 0,1440 | | | | | |
| Ges. CO2 Emissionen Fernw. (heute) [t] | 11.643 | 11.643 | 11.643 | 11.643 | | | | | |
| CO2 Strom kg/kWh (Mix) | 0,2780 | 0,2780 | 0,2780 | 0,2780 | | | | | |
| Ges CO2 Emissionen Strom (heute) [t] | 12.920 | 12.920 | 12.920 | 12.920 | | | | | |
| CO2 Folgekosten (Schaden) €/t CO2 | 185,00 | 185,00 | 185,00 | 185,00 | | | | | |
| Wert für Stromüberschuss €/kWh | | | 0,050 € | | | | | | |

| Heizungstechnologien - Einzelgebäude | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|-----------|-------------|----------------------------------|------------------------------|----------|---------|---------------|---------|
| Komponente | Größe | Einheit | 2020 | 2025 | 2030 | 2035 | 2040 | 2045 | 2050 |
| Gaskessel | Investition | €/kWel | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97 |
| | Lebensdauer | a | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% | 2,0% |
| | Wirkungsgrad NT | % | 98,0% | 98,0% | 98,0% | 98,0% | 98,0% | 98,0% | 98,0% |
| | Wirkungsgrad HT | % | 93,0% | 93,0% | 93,0% | 93,0% | 93,0% | 93,0% | 93,0% |
| Biomassekessel/Holzessel | Investition | €/kWth | 251 | 243 | 236 | 228 | 221 | 214 | 206 |
| | Lebensdauer | a | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 6,0% | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | Wirkungsgrad NT | % | 93,0% | 93 | 93 | 93 | 93 | 93 | 93 |
| | Wirkungsgrad HT | % | 88,0% | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 |
| Elektrische Wärmepumpe (Wärmequelle: Erdreich) NT | Investition | €/kWth | 1.656 € | 1574 | 1493 | 1409 | 1325 | 1244 | 1162 |
| | Lebensdauer | a | 20 | 20 | 220 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 1,3% | 1,1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Elektrische Wärmepumpe (Wärmequelle: Erdreich) HT | Investition | €/kWth | 1.822 € | 1732 | 1642 | 1550 | 1458 | 1368 | 1274 |
| | Lebensdauer | a | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 1,3% | 1,1% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% |
| Arbeitszahl WP | Arbeitszahl | | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 3,0 |
| Elektrische Wärmepumpe (Wärmequelle: Außenluft) NT | Investition | €/kWth | 900 € | 857 | 815 | 770 | 725 | 683 | 640 |
| | Lebensdauer | a | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 1,0% | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Elektrische Wärmepumpe (Wärmequelle: Außenluft) HT | Investition | €/kWth | 990 € | 943 | 897 | 847 | 798 | 751 | 704 |
| | Lebensdauer | a | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 1,0% | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| BHKW Einzelgebäude <100 kWel NT/HT | Investition | €/kWel | 1.614 € | 1534 | 1480 | 1448 | 1431 | 1425 | 1424 |
| | Investition | €/kWth | 1.321 € | 1.255 € | 1.211 € | 1.185 € | 1.171 € | 1.166 € | 1.165 € |
| | Lebensdauer | a | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 3,0% | 3,0% | 3,0% | 3,0% | 3,0% | 3,0% | 3,0% |
| | Wirkungsgrad el. | % | 36,0% | 36,0% | 36,0% | 36,0% | 36,0% | 36,0% | 36,0% |
| CH4-Brennstoffzelle NT | Investition | €/kWel | 9.113 € | 4292 | 2280 | 1600 | 1438 | 1418 | 1418 |
| | Lebensdauer | a | 15 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 3,6% | 3,4% | 3,3% | 3,3% | 3,3% | 3,3% | 3,3% |
| | Wirkungsgrad el. | % | 53,5% | 53,9% | 54,3% | 54,8% | 55,2% | 55,6% | 56,0% |
| | Wirkungsgrad th. | % | 33,0% | 33,0% | 34,0% | 34,0% | 34,0% | 34,0% | 34,0% |
| CH4-Brennstoffzelle HT | Investition | €/kWel | 7.826 € | 3724 | 2071 | 1543 | 1429 | 1418 | 1418 |
| | Lebensdauer | a | 17 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 3,5% | 3,4% | 3,3% | 3,3% | 3,3% | 3,3% | 3,3% |
| | Wirkungsgrad el. | % | 46,8% | 48,4% | 49,9% | 51,4% | 52,9% | 54,5% | 56,0% |
| | Wirkungsgrad th. | % | 39,0% | 38,2% | 37,3% | 36,5% | 35,7% | 34,8% | 34,0% |
| Gebäudesanierung EnEV2015 -25% (Bezeichnung: "vollsaniert") | Investition | €/m² | 102 € | 102 € | 102 € | 102 € | 102 € | 102 € | 102 € |
| | Lebensdauer | a | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% |
| Gebäudesanierung "Passivhaus" (Bezeichnung: "vollsaniert+") | Investition | €/m² | 180 € | 180 € | 180 € | 180 € | 180 € | 180 € | 180 € |
| | Lebensdauer | a | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 |
| | M/O-Kosten | % Invest | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% | 1,0% |
| Holzgas-BHKW | BHKW Anteil (wie BI) | €/kWel | 1.614 € | 1.534 € | 1.480 € | 1.448 € | 1.431 € | 1.425 € | 1.424 € |
| | Holzgas-Erzeuger | €/kWel | 3.386 € | 3.386 € | 3.386 € | 3.386 € | 3.386 € | 3.386 € | 3.386 € |
| | Holzgas-BHKW | €/kWel | 5.000 € | 4.920 € | 4.866 € | 4.834 € | 4.817 € | 4.811 € | 4.810 € |
| Biomasse BHKW Holzvergaser mit Biokohle- Auskopplung | Investition 1MW | € | 5.000.000 € | | | | | | |
| | Brennstoff W-Leistung | kW | 3406 | Wirkungsgr. | Verhältnis der Wirkungsgrade | Brennst. | Nutzen | Ges. Wirkgrad | |
| | Leistung kW el | | 1000 | | 29,36% | | 3406 | 2428 | 71,3% |
| | Leistung kW th | 90° | 1428 | | 41,93% | | | | |
| | Leistung kW th | 50° | 450 | | 58,81% | | | | |
| | Brennstoffbedarf | [t/kW el] | 0,68 | Wirkungsgrad Holzgas verbrennung | | | | | |
| | Investition | €/kWel | 5.000 € | | 93% | | | | |
| | Investition | €/kWth | 3.501 € | | | | | | |
| | Inv. gewichtet | [%] el | 29,36% | | | | | | |
| | Inv. gewichtet | €/kWel | 1.468 € | | | | | | |
| | Inv. gewichtet | [%] | 41,93% | | | | | | |
| | Inv. gewichtet | €/kWth | 2.096 € | | | | | | |
| Lebensdauer | a (geschätzt) | 20 | | | | | | | |
| M/O-Kosten | % Invest (gesch.) | 3,5% | | | | | | | |
| Wgr.Holzgas-Erz. | % | 71,3% | Berechnet | | | | | | |

Quelle
Fraunhofer ISE
Studie

| Hypothesen | | | | | | | | | |
|---|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------|-----------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| | Hypothese 1 Power to Gas (PtG) | Hypothese 2 PtG + KWK | Hypothese 2a PtG + KWK+WP | Hypothese 3a Holz-BHKW | Hypothese 4 Sanierung | | Szenario x.1 weiter wie bisher | Szenario x.2 moderat | Szenario x.3 Zielszenario 2035 |
| Gesamtverbrauch Wärme Ausg.Zustand | 142.070.197 | 142.070.197 | 142.070.197 | 142.070.197 | 142.070.197 | | | | |
| davon FW | 80.852.474 | 80.852.474 | 80.852.474 | 80.852.474 | 80.852.474 | | | | |
| davon Gas | 61.217.723 | 61.217.723 | 61.217.723 | 61.217.723 | 61.217.723 | | | | |
| Gesamtverbrauch Strom | 46.473.297 | 46.473.297 | 46.473.297 | 46.473.297 | 46.473.297 | | | | |
| Erfolg San. Altbau (Wärme) auf % | | | | | | 25,0% | 25,00% | 25,0% | 25,0% |
| Erfolg San. Denkmal (Wärme) auf % | | | | | | 50,0% | 50,00% | 50,0% | 50,0% |
| Erfolg San. Ensemble (Wärme) auf % | | | | | | 40,0% | 40,00% | 40,0% | 40,0% |
| Erfolg San. Altbau (Strom) auf % | | | | | | 105,0% | 105,00% | 105,0% | 105,0% |
| Erfolg San. Denkmal (Strom) auf % | | | | | | 105,0% | 105,00% | 105,0% | 105,0% |
| Erfolg San. Ensemble (Strom) auf % | | | | | | 105,0% | 105,00% | 105,0% | 105,0% |

Finanzierungskosten

| | |
|-------------------------------------|------|
| Finanzierungs-Zinssatz (Kredit) [%] | 0,0% |
|-------------------------------------|------|

Festlegung KEM 01.07.2021

Einspeisvergütung

| | | |
|--------------------------------|-------|-----------------------|
| Einspeisvergütung für PV-Strom | 80,0% | des Erzeugungspreises |
|--------------------------------|-------|-----------------------|

PV-Modul-Daten

| | |
|--------------------------------|--------------------------------|
| Modultyp | Monokristallin |
| Modulleistung | 380 W |
| Modulgröße | 1,860988 m ² |
| Leistung je kWp/m ² | 0,204192612 kWp/m ² |

Quelle:
JA SOLAR Datenblatt JAM60S20-380/MR