

E⁴Q

Einbindung **erneuerbarer Energieträger**
in die **Energieversorgung vernetzter Quartiere**

Ergebnisbroschüre



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Institut für
Massivbau



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

<p>Hintergrund 3</p> <hr/> <p>Projektziele 3</p> <hr/> <p>Das Vorgehen im Projekt 4</p> <hr/> <p>Quartierstypisierung 5</p> <hr/> <p>Ein Bewertungswerkzeug für Quartierskonzepte 6</p> <p><i>Methodik zur Erstellung der Energiebedarfsbibliothek</i></p> <p><i>Vorgehen bei der Bewertung der Modernisierungskonzepte</i></p> <p><i>Bewertungsindikatoren</i></p> <hr/> <p>Funktionsweise des Bewertungstools 9</p> <hr/> <p>Untersuchung eines Realquartiers 10</p> <p><i>Bestandsaufnahme</i></p> <p><i>Vorgesehenes Modernisierungskonzept</i></p> <p><i>Variantenvergleich</i></p>	<p>Szenarioanalyse von Energiekonzepten für Typquartiere 12</p> <p><i>Vorgehen</i></p> <p><i>Ergebnisse</i></p> <hr/> <p>Allgemeine Handlungsempfehlungen 14</p> <p><i>Biomassepotenziale</i></p> <p><i>Allokation ökonomischer Aufwände und Erträge</i></p> <p><i>Schlussfolgerungen</i></p> <hr/> <p>Impressum 16</p>
---	--

Wir verstehen das generische Maskulinum (und auch Femininum) als neutrale grammatikalische Ausdrucksweise, die grundsätzlich alle Geschlechtsidentitäten einbezieht und verzichten deshalb auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers. In diesem Sinne gelten sämtliche Personenbezeichnungen gleichermaßen für alle Geschlechter.

2 | VORWORT

Der Klimawandel ist nun auch in Europa deutlich spürbar – extreme Wetterbedingungen wie Dürren oder Starkregen treten immer häufiger auf. Weltweit besteht enormer Handlungsdruck, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperaturen auf deutlich unter 2 °C zu begrenzen. Dazu müssen die Treibhausgasemissionen durch die Verbrennung fossiler Energieträger als auch von Industrieprozessen drastisch reduziert werden.

Im Gebäudesektor muss der Energieverbrauch für Wärme und Strom erheblich gesenkt werden und die verbleibende Energieversorgung zukünftig weitestgehend regenerativ erfolgen. Im Neubau müssen deshalb bereits heute die höchsten Effizienzstandards genutzt und im Bestand die Sanierungsraten zur Verbesserung der energetischen Qualität der Gebäudehülle mindestens verdoppelt werden. Für die Wärmeversorgung ist ein verstärkter Umstieg auf Wärmepumpen erforderlich. Wärmenetze bieten zudem bei dichter Bebauung die Möglichkeit, durch den Einsatz von z. B. industrieller Abwärme oder Großwärmepumpen ganze Stadtteile zu dekarbonisieren.

Mit der Verringerung des Energiebedarfs in der Nutzungsphase rücken die „grauen“ Treibhausgasemissionen, die bei Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäude entstehen, verstärkt in den Fokus. Nachhaltige, möglichst wiederverwertbare Baumaterialien, robuste Bauweisen sowie umnutzungs- und rück-

baufähige Konstruktionen müssen künftig vorrangig verwendet werden, um einen Kreislauf der Baumaterialien zu ermöglichen.

Die Bewältigung dieser großen Herausforderungen kann nur gelingen, wenn die Forschung zusammen mit gesellschaftlichen Akteuren anwenderorientierte Problemlösungen erarbeitet. Insbesondere tragfähige Lösungen für nachhaltige, energiearme Baustoffe und das Recycling von Bauwerksbestandteilen sind durch Partnerschaften von Forschung und Bauwirtschaft erst noch zu entwickeln und im Markt zu etablieren.

Das Projekt E⁴Q ist ein gutes Beispiel für eine Forschung, die das Praxiswissen der betroffenen Akteure in den Forschungsprozess und die Evaluation der Ergebnisse miteinbezieht, um gesellschaftlich anschlussfähige Konzepte zu erzielen. Zusammen mit Vertretern aus der Energie-, Bau- und Wohnungswirtschaft sowie der kommunalen Verwaltung wurden Verfahren zur realitätsnahen Analyse von Energieversorgungskonzepten für urbane Bestands- und Neubauquartiere und ihre Bewertung unter energetischen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten weiterentwickelt. Für die energetische Planung steht nun ein digitales Bewertungswerkzeug für Quartierskonzepte zur Verfügung. Diese Broschüre stellt der interessierten Fachöffentlichkeit das Projekt und seine wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst vor.



Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann-Diederich

*Professorin am Institut für Massivbau des
Fachbereichs Bau- und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Darmstadt*

Hintergrund

Die Klimakrise erfordert ein zielgerichtetes Handeln auf allen politischen und räumlichen Ebenen sowie in allen Lebensbereichen unserer Gesellschaft. Die Notwendigkeit dazu ergibt sich aus den erwartbaren Folgen des Klimawandels und den begrenzten Lösungskorridoren. Um die Treibhausgasemissionen drastisch zu reduzieren, muss an vielen Schrauben gleichzeitig gedreht werden.

Die effiziente Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Versorgung von Gebäuden mit Wärme und Strom stellt einen wichtigen Baustein des Klimaschutzprogramms und des Klimaschutzplans der Bundesregierung dar. Dafür müssen Neubauten allerdings bereits heute so errichtet werden, dass Wärmeschutz und Anlagentechnik schon in naher Zukunft einen klimaneutralen Gebäudebetrieb erlauben. Zudem muss ein Großteil des Gebäudebestandes in der vergleichsweise kurzen verbleibenden Zeit bis 2045 energetisch modernisiert und mit effizienten Versorgungstechnologien ausgestattet werden, die den Einsatz erneuerbarer Energien ermöglichen.

Erschwerend wirkt dabei die besondere Komplexität des Gebäudesektors. Damit eine Energiewende gelingt, müssen für eine Vielzahl von unterschiedlichen Gebäudetypen mit verschiedenen energetischen Ausgangszuständen und individuellen technischen Versorgungssystemen integrierte Konzepte entwickelt werden. Dazu kommen unterschiedliche Eigentumsverhältnisse mit ihren jeweils eigenen Entscheidungsprozessen und -hemmnissen.

Projektziele

Wichtiges Ziel des Forschungsvorhabens EG2050:E⁴Q war es, die in der Quartiersentwicklung handelnden Personen dabei zu unterstützen, die möglichen Varianten für eine energetische Modernisierung städtischer Quartiere bereits in frühen Planungsphasen zu erkennen und ihre Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen. Dazu untersuchten die Projektpartner, das Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt und das Institut Wohnen und Umwelt Darmstadt, verschiedene Wärmeschutz- und Energieversorgungskonzepte für unterschiedliche Quartierstypen und bewerteten die Wirkung der Konzeptvarianten mithilfe energetischer, ökologischer und ökonomischer Indikatoren.

Eines der Ergebnisse sind allgemeingültige Handlungsempfehlungen für die Modernisierung städtischer Quartiere. Darüber hinaus wurde ein digitaler Quartierskatalog in Form eines Excel-basierten Werkzeugs entwickelt, welcher bei Modernisierungsvorhaben bereits früh Erkenntnisse über mögliche Wärmeschutz- und Versorgungskonzepte liefern kann. Dies reduziert den Arbeitsaufwand für einen Konzeptvergleich und erhöht gleichzeitig die Qualität der für die Entscheidungen verfügbaren Datenbasis. Die im Vorhaben definierten Bewertungsindikatoren sowie der gewählte Bilanzrahmen machen dabei den Beitrag von Modernisierungskonzepten zu den Klimaschutzzielen transparent und erlauben eine Abschätzung der Investitionsrisiken, was zum Abbau von Hemmnissen bei den Eigentümern beiträgt.

4 | DAS VORGEHEN IM PROJEKT

Das Vorgehen im Projekt

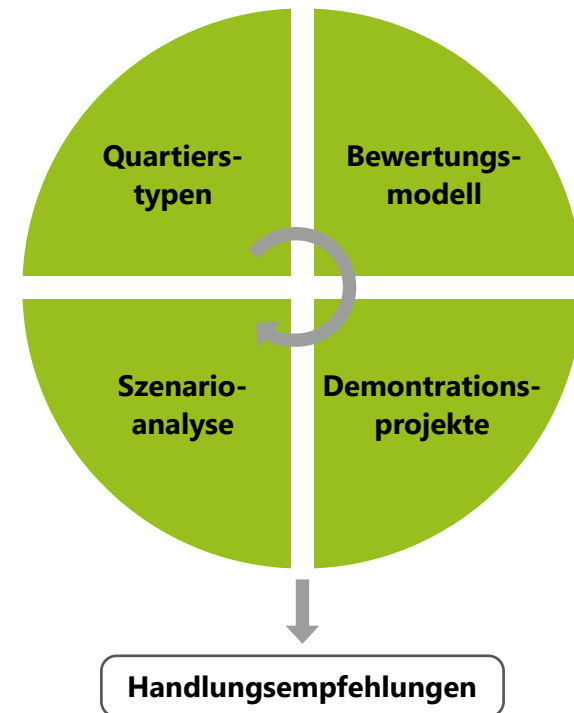
Modernisierungskonzepte für konkrete Quartiere und ihre Ergebnisse können nur auf andere Quartiere übertragen werden, wenn diese, z. B. im Hinblick auf Bauweisen, Baualterklassen und Nutzertypen, vergleichbar sind. Deshalb erarbeitete das Institut Wohnen und Umwelt zunächst Definitionen unterschiedlich strukturierter Typquartiere. Diese bilden übliche Bebauungssituationen im deutschen Wohngebäude- bzw. Quartiersbestand ab und erlauben es damit, einen grundlegenden Konzeptvergleich durchzuführen. Neben den für das Vorhaben definierten Typquartieren wurde auch der Gesamtbestand Deutschlands unter Zuhilfenahme von Geoinformationsdaten untersucht und mittels klassifizierender statistischer Verfahren eine weiterführende Typisierung und Quantifizierung vorgenommen.

Um für die definierten Typquartiere Wärmeschutz- und Versorgungskonzepte fundiert bewerten zu können, entwickelte das Institut für Massivbau eine integrale Bewertungsmethodik. Darauf gestützt erstellte es eine Bibliothek simulationsbasierter

Last- und Erzeugungsgänge für Typgebäude unterschiedlicher Baualterklassen und energetischer Effizienzniveaus sowie für unterschiedliche Technologien zur Nutzung und Erzeugung von Wärme und Strom. Die Inhalte dieser Bibliothek können vergleichsweise einfach genutzt werden, um Typquartiere nachzubilden und die energetischen, ökologischen und ökonomischen Wirkungen der Energieversorgungskonzepte zu untersuchen.

Methodik und Bewertungsergebnisse wurden dann mit Unterstützung der Praxispartner auf ihre praktische Relevanz und Umsetzbarkeit hin überprüft. Das daraus entwickelte Quartierbewertungswerkzeug setzten die Forschungspartner nun zur Untersuchung von Demonstrationsvorhaben sowie für eine breit angelegte Szenarioanalyse ein. Diese Analyse führte zu verallgemeinerungsfähigen Bewertungsergebnissen für Modernisierungskonzepte. Mit Bezugnahme auf die Klimaschutzstrategie der Bundesregierung konnten allgemeine Handlungsempfehlungen für verschiedene Akteursgruppen der Quartiersentwicklung abgeleitet werden.

Abbildung 1: Vorgehensweise im Projekt



Quartierstypisierung

Forschungs- und Modellprojekte zeigen, dass energetische Quartierskonzepte zu Synergien hinsichtlich Energieeffizienz und Kostenreduktion führen können. Eine Typisierung des Gebäudebestandes in Typquartiere erleichtert die realistische Abschätzung solcher Potenziale für den deutschen Bestand. Auch ermöglicht sie zu einem frühen Zeitpunkt der energetischen Quartiersplanung einen verlässlichen Variantenvergleich ohne den Aufwand einer detaillierten Datenerhebung.

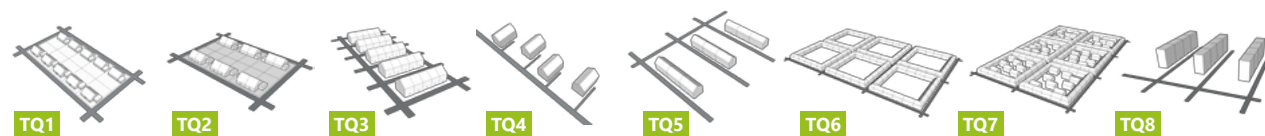
In Anlehnung an die Vorarbeiten anderer Forschergruppen wurden 9 Typquartiere unterschiedlicher baulicher Struktur definiert. Die Typquartiere bilden übliche urbane Bebauungssituationen ab und liegen hinsichtlich räumlicher Ausdehnung und Anzahl der Gebäude in insgesamt 23 Varianten vor. Dies wird der individuellen Abgrenzung von Quartieren in verschiedenen Arbeitsfeldern gerecht. So betrachten Energieversorger z. B. häufig Klein(st)quartiere für Contracting-basierte Wärmeversorgungskonzepte, während die Stadtentwicklungsplanung eher großmaßstäbliche Projekte vorantreibt.

Die Basis für eine Bewertung des Ausgangszustandes und der möglichen Modernisierungskonzepte der als homogene Wohnquartiere definierten Typquartiere bilden Typgebäude. Die oftmals bestehende Mischnutzung wurde vereinfacht durch die Ergänzung festgelegter Nichtwohntypgebäude nachgebildet.

Abbildung 2: Definition von neun urbanen Typquartieren

Typquartier	Freiflächenpotenziale für erneuerbare Energien			Gebäudeanzahl		
	Solarthermie	Geothermie-sonden	oberflächennahe Geothermie	klein	mittel	groß
TQ1 Einfamilienhaussiedlung	●	●	●	10	96	–
TQ2 Doppelhäuser	●	●	●	12	96	–
TQ3 Reihenhäuser	●	●	○	5	25	125
TQ4 Mehrfamilienhäuser, freistehend a) Schrägdach b) Flachdach	●	○	○	4	16	–
TQ5 Mehrfamilienhäuser, Zeilenbebauung a) Schrägdach b) Flachdach	●	○	○	3 Zeilen	8 Zeilen	–
TQ6 Blockrandbebauung geringer – mittlerer Dichte	●	○	–	1 Block	6 Blöcke	24 Blöcke
TQ7 Blockrandbebauung hoher Dichte	●	○	–	1 Block	6 Blöcke	24 Blöcke
TQ8 Zeilenbebauung hoher Geschossigkeit	–	○	○	3 Zeilen	8 Zeilen	–
TQ9 Innerstädtisches Mischquartier	●	○	–	–	50	–

Abbildung 3: Bebauungsstrukturen der definierten Typquartiere



6 | EIN BEWERTUNGSWERKZEUG FÜR QUARTIERSKONZEPTE

Ein Bewertungswerkzeug für Quartierskonzepte

Auf Grundlage der Quartierstypisierung entwickelten die Forschungspartner das Quartierbewertungstool als eines der Kernergebnisse des Forschungsprojekts EG2050:E⁴Q. Das Tool dient der Bewertung verschiedener Wärmeschutz- und Modernisierungsvarianten für Typquartiere. Es basiert auf der nachfolgend beschriebenen Methodik.

Methodik zur Erstellung der Energiebedarfsbibliothek

In die Modellierung der unterschiedlichen Quartierstypen gingen Modelle einer Vielzahl von Einzelgebäuden mit unterschiedlichen für den Energiebedarf relevanten Merkmalen wie Geometrie, Ausrichtung, Bauteilqualitäten, Nutzungsprofile und Anlagenkonfigurationen ein. Außerdem wurden verschiedene Varianten der Versorgung mit Wärmenetzen simuliert.

Als Ergebnis der Simulation stehen Jahres-Endenergiebedarfsprofile der Gebäude und bei vernetzten Wärmeversorgungskonzepten auch der Quartierszentralen in 15-Minuten-Schritten zur Verfügung. Separat wurden PV-Erzeugungsprofile für verschiedene Ausrichtungen und Neigungswinkel simuliert.

Diese dynamische Simulation erlaubt es, die vor Ort produzierte erneuerbare Energie und den Bedarf zeitlich hochaufgelöst miteinander zu verrechnen, womit eine realitätsnahe Auskunft über

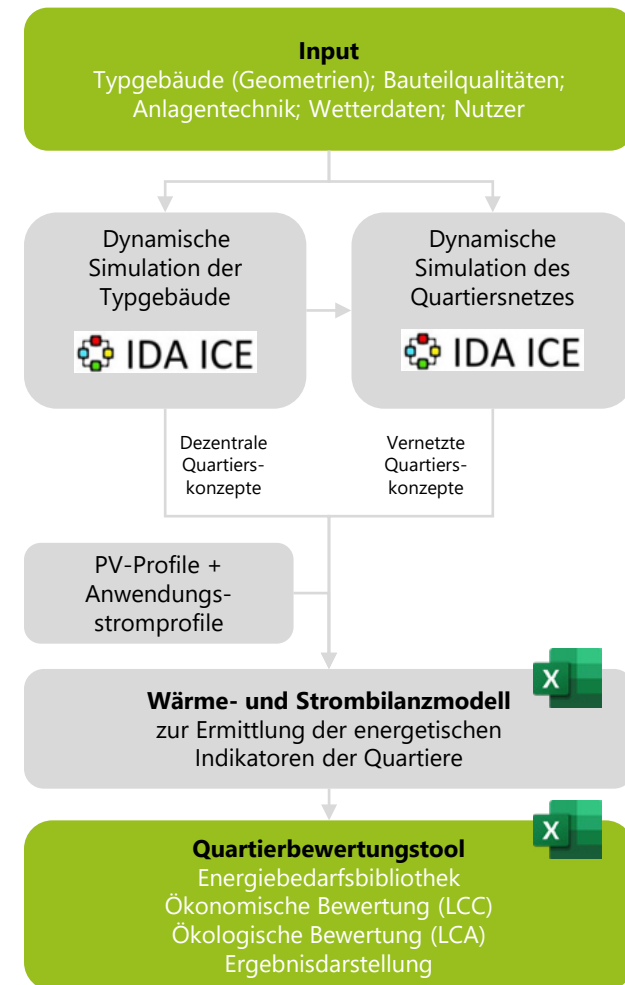
den Deckungsgrad der erneuerbaren Energien am Gesamtenergiebedarf sowie den Eigennutzungsgrad erreicht wird.

Um die Datenmenge für das Bewertungstool handhabbar zu halten, wurden die Energiebedarfsprofile in einem ebenfalls im Rahmen des Projekts entwickelten Bilanzierungstool zusammen mit den Nutzerstrombedarfen sowie etwaigen PV-Erzeugungsprofilen zu Jahressummen bilanziert. Diese Energiebedarfe, Deckungsgrade und Eigennutzungsanteile wurden anschließend in der Energiebedarfsbibliothek des Quartierbewertungstools hinterlegt. In Abbildung 4 ist das Vorgehen schematisch dargestellt.

Vorgehen bei der Bewertung der Modernisierungskonzepte

Für die Bewertung der energetischen und ökonomischen Auswirkungen der Modernisierungsmaßnahmen werden in Bezug auf die Gebäudehülle die Effekte der zusätzlich aufzubringenden oder auszutauschenden Bauteile berechnet. In Bezug auf die Komponenten zur Wärme- und Stromversorgung wird dagegen angenommen, dass diese vollständig neu installiert werden müssen. In realen Quartiersprojekten kann eine Weiternutzung der existierenden Anlagentechnik oder von Teilen davon (z. B. Leitungsinfrastruktur von Nahwärmenetzen oder erst kürzlich installierte Wärmeerzeuger) sowohl die Wirtschaftlichkeit als auch den nötigen Aufwand an grauen Emissionen (der Herstellung) gegenüber den Ergebnissen im Projekt EG2050:E⁴Q erheblich verbessern.

Abbildung 4: Methodik zur Erzeugung der Energiebedarfsbibliothek



Bewertungsindikatoren

Das im Forschungsprojekt entwickelte Planungstool weist für das jeweils betrachtete Quartier sieben Indikatoren zur Bewertung der energetischen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der verschiedenen Sanierungskonzepte aus (vgl. Abbildung 5). Die Indikatoren werden als Absolutwerte für jede Variante angegeben; es lassen sich allerdings problemlos Differenzen mit den Werten des Status quo bilden, um die Einsparpotenziale zu berechnen. Für das Quartier wird nur ein gemeinsamer Wert je Indikator ausgegeben, d.h. die Emissionen und Energiebedarfe werden auch bei unvernetzten Versorgungskonzepten über alle Gebäude verteilt.

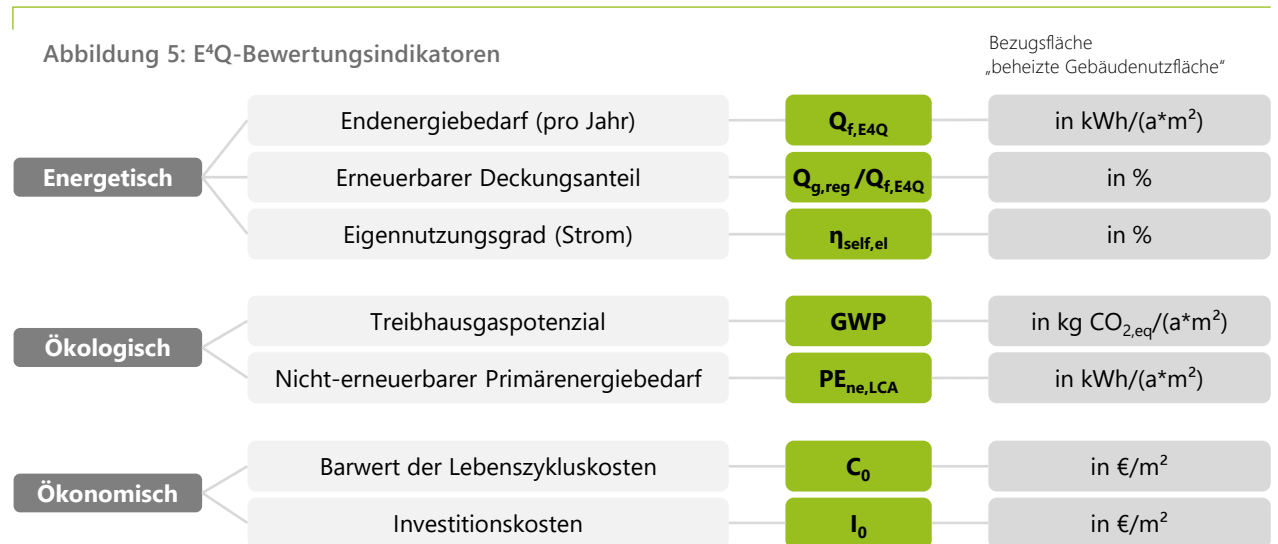
Zu den energetischen Indikatoren gehört der Jahres-Endenergiebedarf ($Q_{f,E4Q}$) des Quartiers bezogen auf die Nutzfläche. Mit diesem Indikator lässt sich die allgemeine Energieeffizienz der verschiedenen Konzeptvarianten des Quartiers vergleichen. Er enthält auch den Haushaltsstrombedarf der Gebäudenutzer und weicht deshalb von dem nach Gebäudeenergiegesetz (GEG) definierten Bedarf ab (siehe auch Infobox „Bilanzrahmen“). Die Integration des vollständigen Strombedarfs in die Abschätzung des tatsächlichen Eigenverbrauchs an ggf. gebäudenah erzeugtem Strom erlaubt eine realistischere Berechnung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen und hat deshalb hohe praktische Relevanz. Zudem wird der Deckungsgrad des Endenergiebedarfs mit im Quartier erzeugten erneuerbaren Energien ($Q_{g,reg}/Q_{f,E4Q}$) sowie der Eigennutzungsgrad ($\eta_{self,el}$) des ggf. selbst erzeugten Stroms angegeben. Damit kann der Autarkiegrad der Energieversorgung

des Quartiers sowie eine eventuelle Überdimensionierung der Anlagen zur Stromerzeugung beurteilt werden.

Die beiden ökologischen Indikatoren – das jährliche Treibhausgaspotenzial (GWP), also die Treibhausgasemissionen, sowie der jährliche nicht-erneuerbare Primärenergiebedarf ($PE_{ne,LCA}$) – werden jeweils bezogen auf die Nutzfläche über eine Lebenszyklusanalyse (LCA) berechnet. Das bedeutet, dass auch die bei der Herstellung und Entsorgung von Komponenten entstehenden Umweltwirkungen berücksichtigt werden. Die jeweiligen Primärenergie- und Emissionsfaktoren der Energieträger sowie der Bauteile und Komponenten der Anlagentechnik entstammen einer einheitlichen Datenbasis, der Ökobaudat 2021.

Der Betrachtungszeitraum für die ökobilanzielle und ökonomische Bewertung ist standardmäßig auf 30 Jahre (2020–2050) festgelegt und kann individuell angepasst werden.

Für die ökonomische Bewertung stehen als Ergebnis einer Lebenszykluskostenanalyse zwei ebenfalls flächenbezogene Indikatoren zur Verfügung. Die Angabe der Investitionskosten (I_0) für die Sanierung zeigt die Durchführbarkeit innerhalb eines zur Verfügung stehenden Budgets bzw. den notwendigen Kapitalbedarf auf. Der ebenfalls ausgewiesene Barwert der Lebenszykluskosten (C_0) ermöglicht einen ökonomischen Vergleich zwischen den verschiedenen Varianten.

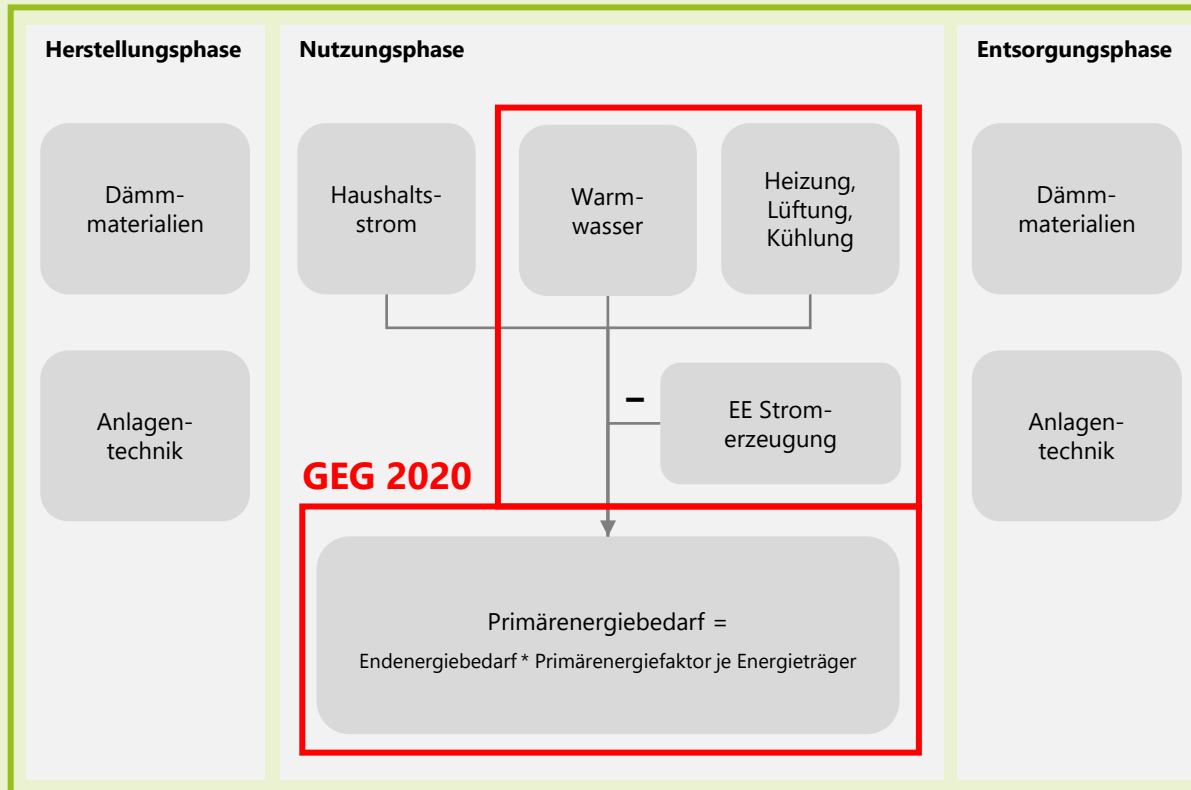


8 | EIN BEWERTUNGSWERKZEUG FÜR QUARTIERSKONZEPTE

Bilanzgrenzen und Vergleichbarkeit der energetischen und ökologischen Indikatoren mit dem GEG

Abbildung 6: Bilanzgrenzen

E⁴Q



Die Bewertungsmethodik im Projekt E⁴Q unterscheidet sich von den Vorgaben im Gebäudeenergiegesetz (GEG 2020) in mehrfacher Hinsicht.

Abweichend von der Definition nach GEG beinhaltet der für ein betrachtetes Quartier bzw. Quartierskonzept ausgewiesene Endenergiebedarf auch den Strombedarf der Nutzer. Zudem wird nicht beachtet, welchen Endenergiebedarf jedes Gebäude für sich aufweist. Deshalb unterscheiden sich die Berechnungsweisen für den Deckungsanteil mit im Quartier erzeugter erneuerbarer Energie sowie für den Eigennutzungsgrad selbst erzeugten Stroms ebenfalls und führen im Projekt E⁴Q in der Regel zu vergleichsweise niedrigeren Werten.

Da für die ökologischen Faktoren im Projekt E⁴Q ein Lebenszyklusansatz gewählt wurde, während das GEG nur die Nutzungsphase der Gebäude betrachtet, ist auch der jeweils ausgewiesene Primärenergiebedarf nicht vergleichbar. Um die Unterschiede bei der Definition der genannten Indikatoren zum GEG 2020 deutlich zu machen, werden die im Projekt verwendeten Begriffe mit einem klärenden Index versehen.

Abbildung 6 stellt die Bilanzgrenzen des GEG (in rot) und des weitergefassten Forschungsprojekts E⁴Q (in grün) dar.

Funktionsweise des Bewertungstools

Das Quartierbewertungstool steht der Öffentlichkeit in Form einer Excel-Arbeitsmappe zur Verfügung, um eine möglichst breite Anwendbarkeit zu erreichen. Die Verwendung des Tools läuft in vier Schritten ab.

Schritt 1: Beschreibung des Quartiers

Im ersten Schritt ist der Status quo des betrachteten Quartiers zu definieren. Dazu wird diejenige der 23 Varianten der im Projekt definierten Typquartiere gewählt, die das zu untersuchende Quartier am besten repräsentiert. Dann werden die Ausrichtung der Gebäude, das Baualter und der Sanierungszustand sowie Nutzungsparameter bestimmt und die Wärmeversorgung im Quartier angegeben. Für ältere Gebäude können z. B. verschiedene Kessel und Anbindungsformen der Warmwasserbereitung oder ein Fernwärmeanschluss gewählt werden.

Schritt 2: Definition der Sanierungsvarianten

In einem zweiten Schritt können dann bis zu vier zu untersuchende Sanierungsvarianten definiert werden. Dies erfolgt durch die Auswahl eines Sanierungsniveaus, dargestellt über das Verhältnis des Transmissionswärmeverlusts HT' der Gebäudehüllen im Verhältnis zu dem im GEG geforderten HT', und die Wahl eines Wärmeversorgungskonzeptes. Zur Auswahl

stehen eine Vielzahl von dezentralen und vernetzten Lösungen unter Einbezug erneuerbarer Energien wie bspw. Wärmepumpen, PV- oder Solarthermieranlagen sowie Fern- oder Nahwärmenetze mit KWK-Anlagen oder Geothermie. Zudem können Batteriespeicher für die verstärkte Eigennutzung von vor Ort erzeugtem Strom in die Konzepte integriert werden.

Schritt 3: Anpassung von Berechnungsparametern

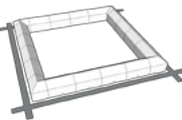



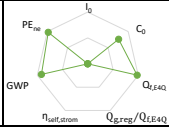
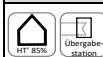

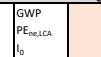


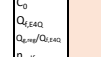
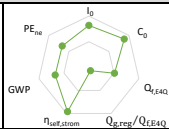
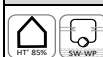
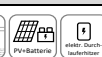
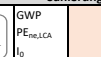
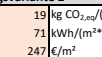




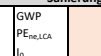


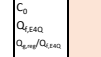
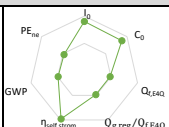

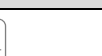
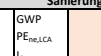

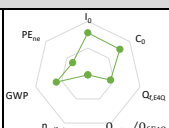
Ein dritter Schritt erlaubt die Definition verschiedener Berechnungsparameter z. B. des Betrachtungszeitraums, des Zinssatzes oder der erwarteten Preissteigerungsraten.

Schritt 4: Berechnung

Das Tool führt für den Status quo sowie für die angegebenen Sanierungsvarianten eine Lebenszykluskostenrechnung und eine Ökobilanzierung durch. Grundlage sind die Energiebedarfe der Typquartiere, die im Vorhinein dynamisch zeitlich hochaufgelöst simuliert und bilanziert wurden und in einer Bilanzbibliothek im Tool hinterlegt sind.

Die Ergebnisse werden grafisch aufbereitet im Tabellenblatt *Auswertung* bzw. komprimiert im Tabellenblatt *Zusammenfassung* präsentiert. Zusätzlich können die einzelnen Berechnungsschritte der verwendeten Methoden in den Tabellenblättern *Energiebilanz*, *Ökobilanz* und *Kostenberechnung* nachvollzogen werden.

Abbildung 7: Bewertungstool – Präsentation der Ergebnisse als Zusammenfassung (Beispiel)

Quartiers Steckbrief				
TQ6a - Blockrandbebauung (Schrägdach) geringer bis mittlerer Dichte - Größe S				
Anzahl Gebäudekörper				
Blockrand	1			
Anzahl WE				
Netto-GF	14.070 m ²			
Status Quo				
		GWP	32	kg CO _{2,eq} /(m ² *a)
		PE _{no,LCa}	137	kWh/(m ² *a)
		I ₀	0	€/m ²
		C ₀	495	€/m ²
		Q _{E,EAQ}	132	kWh/(m ² *a)
		Q _{EW,EAQ} /Q _{E,EAQ}	0	%
		η _{self,strom}	0	%
				
Sanierungsvariante 1				
			GWP	24
			PE _{no,LCa}	93
			I ₀	205
			C ₀	574
			Q _{E,EAQ}	69
			Q _{EW,EAQ} /Q _{E,EAQ}	7
			η _{self,strom}	96
				
Sanierungsvariante 2				
				GWP
				19
			PE _{no,LCa}	71
			I ₀	247
			C ₀	642
			Q _{E,EAQ}	47
			Q _{EW,EAQ} /Q _{E,EAQ}	22
			η _{self,strom}	90
				
Sanierungsvariante 3				
			GWP	17
			PE _{no,LCa}	67
			I ₀	226
			C ₀	572
			Q _{E,EAQ}	65
			Q _{EW,EAQ} /Q _{E,EAQ}	49
			η _{self,strom}	98
				
Sanierungsvariante 4				
			GWP	21
			PE _{no,LCa}	51
			I ₀	196
			C ₀	497
			Q _{E,EAQ}	59
			Q _{EW,EAQ} /Q _{E,EAQ}	0
			η _{self,strom}	0
				

10 | UNTERSUCHUNG EINES REALQUARTIERS

Untersuchung eines Realquartiers

Die Praxistauglichkeit der im Forschungsvorhaben entwickelten Methodik und Bewertungsverfahren wurde anhand mehrerer Demonstrationsprojekte im Rahmen eines Variantenvergleichs überprüft.

Bestandsaufnahme eines Demonstrationsprojekts

Das Kleinquartier besteht aus vier Baukörpern mit je drei Vollgeschossen und unbeheiztem Dachgeschoss in der Struktur einer Blockrandbebauung, die nicht ganz geschlossen ist. Die Gebäude aus dem Jahr 1955 beinhalten 51 Wohneinheiten mit 3.600 m² Wohnfläche. Die Außenwand wurde mit 6 cm Dämmstärke nachträglich gedämmt und die Fenster ausgetauscht.

Vorgesehenes Modernisierungskonzept

Durch Aufstockung der Bestandsgebäude sowie durch die Bebauung der bestehenden Baulücken soll die Wohnfläche auf ca. 6.600 m² vergrößert und der Block zu einem geschlossenen Blockrand vervollständigt werden. Die Hüllbauteile der Bestandsgebäude erfahren keine weitere Verbesserung. Die neuen Wohneinheiten werden mittels Wohnungsübergabe- und Frischwasserstationen an das Wärmenetz angeschlossen. Die Wärmeerzeugung wird zukünftig durch ein Gasblockheizkraftwerk mit Gasspitzenlastkessel erfolgen.

Variantenvergleich

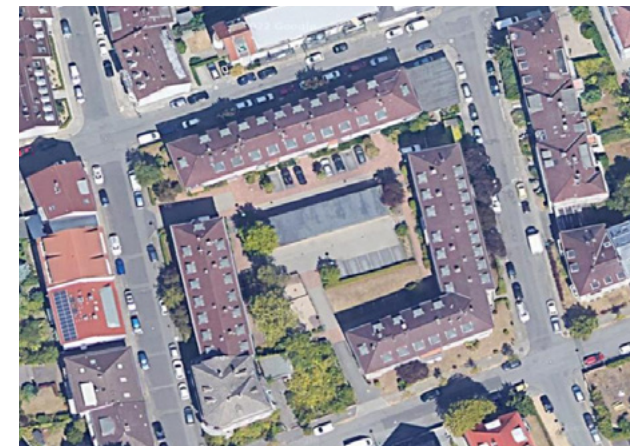
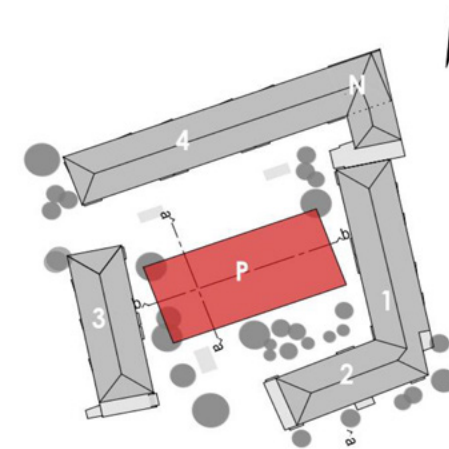
Neben dem beschriebenen Modernisierungskonzept (Variante A) wurden noch zwei weitere Konzepte (Varianten B und C) mit dem Quartierbewertungstool untersucht. Für die alternativen Varianten wurden eine zentrale Versorgung, die Einbindung von erneuerbaren Energien zur Strom- oder zur Strom- und Wärmeerzeugung sowie eine Verbesserung der Wärmeschutzniveaus vorgesehen. Für Variante C wurde ein höchst anspruchsvolles Wärmeschutzniveau mit einem hüllflächenbezogenen Transmissionswärmeverlust HT' von 55 % des GEG-Anforderungswertes sowie der Einsatz einer Großwärmepumpe für das Wärmenetz angenommen.

Der Variantenvergleich zeigt, dass alle betrachteten Modernisierungskonzepte hinsichtlich der energetischen^[1] und ökologischen Indikatoren $Q_{f,E4Q}$, $Q_{g,reg}/Q_{f,E4Q}$, GWP und $PE_{ne,LCA}$ zu einer Verbesserung führen. Insbesondere die Varianten mit einem hohen Anteil lokal erzeugter erneuerbarer Energien (Varianten B und C) reduzieren die Treibhausgasemissionen im Lebenszyklus um bis zu 60 %.

Allerdings steigen die Investitionskosten bei steigendem Wärmeschutzniveau und Installation von PV-Anlagen deutlich (vgl. Abbildung 9). Dennoch führt der Einsatz von PV-Anlagen zu einer Verbesserung des Barwertes der Lebenszykluskosten C_0

[1] Für Variante A wird in Abbildung 9 modellbedingt ein erhöhter flächenspezifischer Endenergiebedarf $Q_{f,E4Q}$ ausgegeben. Dies ist begründet durch die Modellierung als vollständig zentral mit Trinkwasser versorgtes Konzept in den Varianten A bis C.

Abbildung 8: Bebauungssituation des Demonstrationsprojekts



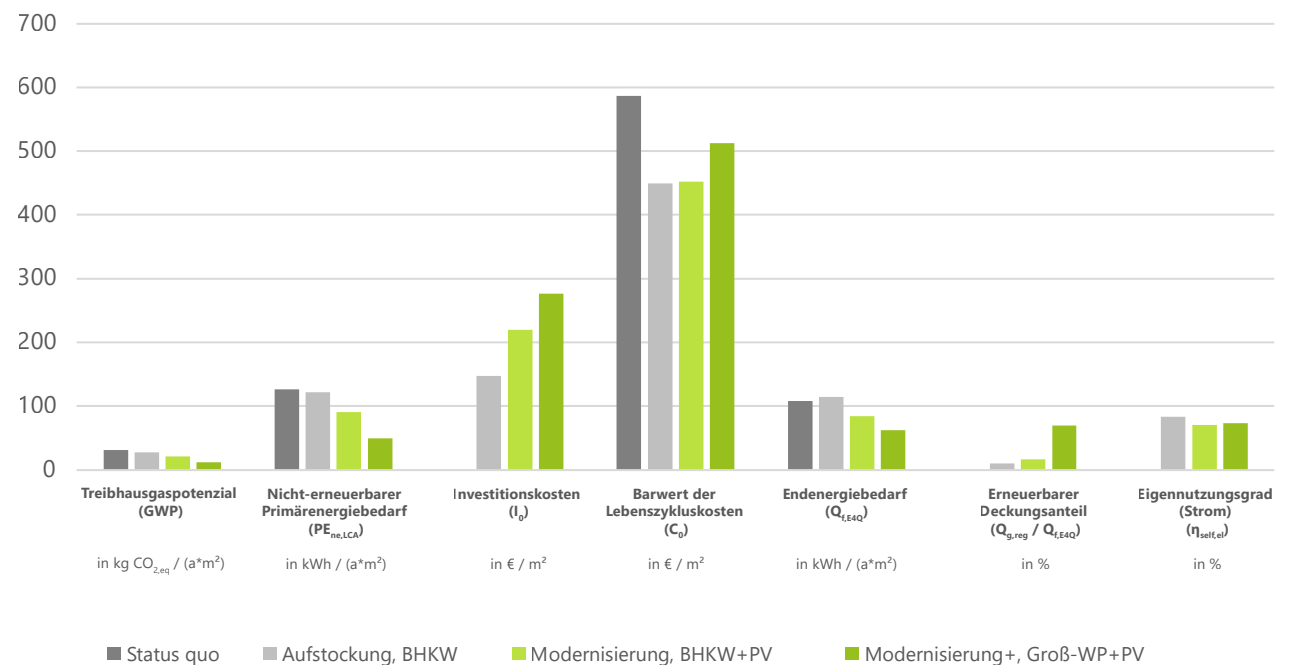
Quellen: oben bauverein AG 2020, unten Google Maps 2022
Bilder: © 2022 AeroWest, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies, Kartendaten © 2022

in Variante B gegenüber Variante A und kann damit die Kostenwirkung der Gebäudedämmung überkompensieren. Das höchst anspruchsvolle Effizienzniveau in Variante C, welches die höchsten THG-Einsparungen ermöglicht, ist im Vergleich zum Status quo des Quartiers ebenfalls rentabel. Kann die Leitungsinfrastruktur des im Quartier vorliegenden Nahwärmenetzes weiter genutzt werden, reduzieren sich die Investitionskosten bei gleichzeitig steigenden Barwerten der Lebenszykluskosten sogar für alle beispielhaft untersuchten Modernisierungsvorhaben.

Der Variantenvergleich für das Realquartier zeigt, dass die beteiligten Unternehmen – ohne Berücksichtigung der erforderlichen Investitionskosten der nachträglichen Neubebauung – im Quartier anspruchsvolle Konzepte zur Minderung der Treibhausgasemissionen wirtschaftlich umsetzen können. Maßgeblich hierfür ist jedoch die Integration von Geschäftsmodellen, die es erlauben, die möglichen ökonomischen Ertragspotenziale auch zu realisieren (vgl. „Allokation ökonomischer Aufwände und Erträge“ auf Seite 14).

Die beim Variantenvergleich dargestellten Kostenindikatoren wurden mit Kosten und Randbedingungen des Jahres 2021 (1. Quartal) berechnet. Die hier getroffenen Annahmen sowie die Möglichkeiten ihrer Anpassung werden im wissenschaftlichen Endbericht des Projekts E⁴Q ausgewiesen.

Abbildung 9: Variantenvergleich für das betrachtete Demonstrationsprojekt und Minderungspotenziale anhand der E⁴Q-Indikatoren



12 | SZENARIOANALYSE

Szenarioanalyse von Energiekonzepten für Typquartiere

Die Forschungspartner setzten die im Projekt entwickelte Methodik zur Bewertung von Quartierskonzepten nicht nur zur Programmierung des Quartierbewertungstools, sondern auch für eine breit angelegte Untersuchung von Modernisierungsmöglichkeiten der verschiedenen Typquartiere ein. Aus dieser Szenarioanalyse konnten allgemeine Empfehlungen zu Wärmeschutz- und Energieversorgungsvarianten von Quartieren abgeleitet werden.

Vorgehen

Für die Szenarioanalyse wurde für den Ausgangszustand der Typquartiere das mittlere Wärmeschutzniveau des Altbaubestandes bis einschließlich 1978 (jeweils getrennt nach Mehrfamilienhäusern und anderen Gebäudetypen) festgelegt. Bezüglich der Wärmeversorgung wurden 26 Anlagenvarianten untersucht. Die als Status quo der Typquartiere angenommenen Eigenschaften lassen sich Abbildung 10 entnehmen.

Für die Ausgangszustände wurden im Anschluss unterschiedliche Modernisierungskonzepte berechnet und ausgewertet. Sie umfassten neben verschiedenen Effizienzniveaus der Hüllbauteile eine breite Auswahl an zentralen und dezentralen, d. h. vernetzten und nicht-vernetzten Wärme- und Stromversorgungsstrukturen im Quartier. Außer klassischen Versorgungsstrukturen, wie bspw. einer Einzelgebäudeversorgung

mit Heizkesseln oder einem Fernwärmenetz, wurden Konzepte zur stärkeren Einbindung erneuerbarer Energieträger durch Kraftwärmekopplungsanlagen, solarthermische Wärmebereitstellung, die Nutzung von Umweltwärme in zentralen oder dezentralen Versorgungsstrukturen sowie die Stromerzeugung durch gebäudeintegrierte oder Freiflächen-Photovoltaikanlagen untersucht und gegenübergestellt. Für Feuerungsanlagen, d. h. dezentrale Heizkessel sowie Heizwerke oder Blockheizkraftwerke in Nahwärmenetzen, wurden zudem die Auswirkungen verschiedener fossiler und biogener Brennstoffe in der Szenarioanalyse berücksichtigt. Abbildung 11 gibt einen Überblick über die untersuchten Wärme- und Stromversorgungstechnologien für Modernisierungskonzepte.

Vereinfachend wurde in der Szenarioanalyse nur eine der bis zu vier möglichen Gebäudeausrichtungen im Quartier berücksichtigt. Der Standort Potsdam mit den Wetterdaten des Testreferenzjahres 2015 sowie die Soll-Innentemperatur der Gebäude von 20 °C (für Gebäude mit geringem Wärmeschutzniveau mit zusätzlicher Nachtabsenkung) entsprechen den im Quartierbewertungstool hinterlegten Bibliotheksdaten.

Ergebnisse

Im Rahmen der Szenarioanalyse wurden je Typquartier mehr als 1 Million Szenarien berechnet. Die Ergebnisse wurden für verschiedene Indikatorwertepaare dargestellt und die Modernisierungsvarianten sowohl in Bezug auf die Veränderungen gegenüber dem Status quo, als auch die absoluten

Abbildung 10: Tabelle – Definition des Status quo für die Szenarioanalyse der E⁴Q-Typquartiere

Wärmeschutzniveau

mittlere Eigenschaften des Wohngebäudebestandes mit Baujahr bis 1978

Versorgungskonzept und Wärmeerzeuger

Dezentral

konventioneller Kessel
(niedrige/ hohe Effizienz; Gas oder Öl)

Zentral

Fernwärme; Nahwärmenetze mit Kesselanlagen oder Blockheizkraftwerk (Gas, Biogas, Holzhackschnitzel)

Wärmeübergabesystem

Hohes Temperaturniveau

Vorlauftemperaturen innerhalb des Gebäudes zwischen 60 °C und 75 °C; mit Radiatoren

Hohes Temperaturniveau

Vorlauftemperaturen des Wärmenetzes zwischen 70 °C und 95 °C; Vorlauftemperaturen innerhalb des Gebäudes zwischen 60 °C und 75 °C; mit Radiatoren

Warmwasserbereitung

Dezentral

über Wärmeerzeuger; elektrisch an der Zapfstelle

Zentral

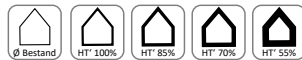
über Wärmeerzeuger; elektrisch an der Zapfstelle

Abbildung 11: In der Szenarioanalyse untersuchte Wärme- und Stromversorgungstechnologien für Modernisierungskonzepte

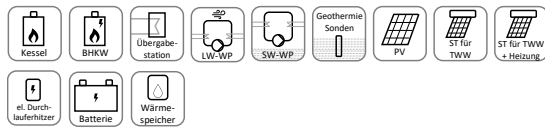
Versorgungskonzepte



Wärmeschutzniveau Gebäudehülle



Anlagentechnik – Gebäude



Anlagentechnik – Quartier



Umweltwirkungen untersucht. Für die Auswertung wurde festgelegt, dass ein Wärmeschutz- und Energieversorgungskonzept für jeden der Indikatoren – oder zumindest für einen als wichtig betrachteten Teil – zu einer Verbesserung im Vergleich zum Status quo führen soll, also zu einer Reduktion der Treibhausgasemissionen und/oder zu einer Verringerung des Barwertes der Lebenszykluskosten (C_0). Dies bedeutet

allerdings noch nicht, dass eine solche Modernisierungsvariante auch einen ausreichenden Beitrag zur Erreichung eines klimaneutralen Gebäudebestandes liefert.

Die Abbildungen 12 und 13 stellen beispielhaft die Szenarioanalyse für das Typquartier 6 (Blockrandbebauung geringer bis mittlerer Dichte mit Schrägdach, klein) dar.

Übergreifend lieferte die Szenarioanalyse folgende Ergebnisse:

- Der Einsatz von Photovoltaikanlagen führt generell zu einer höheren Kosten- und GWP-Reduktion als der von solarthermischen Anlagen.
- Die Investitionskosten (I_0) der Photovoltaiknutzung stehen in den untersuchten Konzepten einem verringerten Barwert der Lebenszykluskosten (C_0) gegenüber.
- Stromspeichersysteme führen zwar zu einer Erhöhung des Deckungsgrads des Endenergiebedarfs mit im Quartier erzeugten erneuerbaren Energien ($Q_{g,reg}/Q_{f,E4Q}$), gleichzeitig jedoch zu einer Verschlechterung sowohl hinsichtlich der Investitionskosten als auch der Lebenszykluskosten.
- Der Einsatz biogener Brennstoffe führt erwartungsgemäß zu einer starken Reduktion der Treibhausgasemissionen über den Lebenszyklus. Entsprechend der Kostenbasis aus dem Jahr 2021 mit nur moderat angesetzten Preissteigerungen waren Hackschnitzelanlagen gegenüber Biogasanlagen ökonomisch vorteilhafter.

Abbildung 12: Veränderung der ökonomischen und ökologischen Indikatoren der Szenariovarianten im Vergleich zum Status quo*

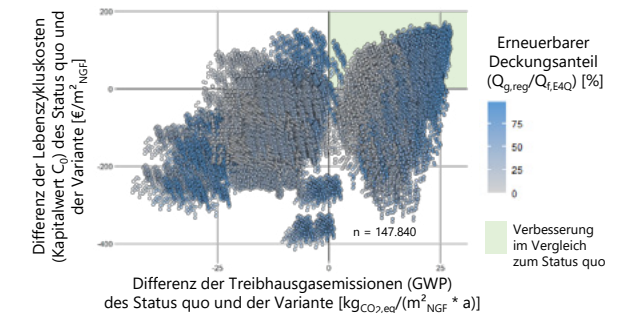
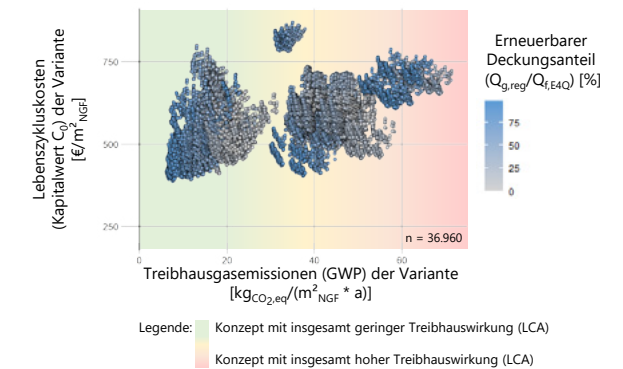


Abbildung 13: Absolute ökonomische und ökologische Wirkung der Modernisierungsvarianten*



* Kostenbasis: 1. Quartal 2021

14 | ALLGEMEINE HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

Allgemeine Handlungsempfehlungen

Bei der Ableitung allgemeiner Handlungsempfehlungen aus den Ergebnissen der Szenarioanalyse müssen die regulatorischen, sozioökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen miteinbezogen werden. Beispiele hierfür sind die begrenzte Verfügbarkeit biogener Brennstoffe oder die unterschiedliche Betroffenheit verschiedener Personengruppen durch die Kosten der Maßnahmen.

Biomassepotenziale

Entsprechend der Szenarioanalyse führen vernetzte Versorgungslösungen mit überwiegender Nutzung von biogenen Brennstoffen zu einer deutlichen Minderung der absoluten Umweltwirkungen ($P_{ne,LCA}$ und GWP), zu einem hohen erneuerbaren Deckungsanteil ($Q_{g,reg}/Q_{f,E4Q}$) und zudem meist zu einer Reduktion des Barwertes der Lebenszykluskosten (C_0) bei moderaten Investitionen (I_0). Damit empfehlen sie sich als Wärmewendestrategie für Quartiere. Dem steht jedoch eine begrenzte Verfügbarkeit von biogenen Brennstoffen gegenüber, sei es aufgrund mangelnder lokaler Verfügbarkeit oder der nationalen bzw. internationalen Potenzialgrenzen für Anbauflächen. Deshalb sollten diese Varianten nur umgesetzt werden, wenn andere Wärmeschutz- und Versorgungskonzepte nicht oder nur unter Inkaufnahme erheblicher Zusatzanstrengungen möglich sind.

Allokation ökonomischer Aufwände und Erträge

Die im Forschungsvorhaben festgelegte Bewertungsmethodik nimmt keine Allokation der Kosten und Nutzen getätigter Investitionen auf unterschiedliche Personengruppen im Quartier vor. Insbesondere durch den im Vergleich zum GEG erweiterten Bilanzrahmen ist jedoch im Hinblick auf allgemeine Empfehlungen für Quartierskonzepte eine differenziertere Betrachtung sinnvoll. So führt im Bewertungsansatz des Vorhabens die Erzeugung erneuerbaren Stroms innerhalb des Quartiers zu einer Verringerung der Strombezugs-kosten für Anlagentechnik und Haushaltsstrom, also für alle Verbraucher. In der Praxis stellt sich das Beziehungsgeflecht von Eigentümern lokaler Stromerzeugungsanlagen, Immobilienbesitzern sowie Bewohnern jedoch viel komplexer und im Hinblick auf die Nutzung lokaler erneuerbarer Energien stärker durch den regulatorischen Rahmen bestimmt dar.

Dennoch liefert die Szenarioanalyse hilfreiche Hinweise für die ökonomische Bewertung z. B. der lokalen Erzeugung von Strom aus Photovoltaikanlagen. Der Vergleich der Barwerte der Lebenszykluskosten von Quartierskonzepten ohne und mit Photovoltaikanlagen zeigt, dass in Abhängigkeit der im Quartier verfügbaren und belegten Dachflächen deutliche Kosteneinsparungen erzielt werden können. Diese Einsparungen weisen aus, wie hoch der zusätzliche ökonomische Aufwand für die Etablierung geeigneter Geschäftsmodelle zur Bereitstellung lokal erzeugten Stroms für die Haushalte

im Quartier (z. B. Mieterstromkonzepte) sein darf, damit der klimaschützende Beitrag der PV-Anlagen ohne Mehrkosten im Lebenszyklus erreicht werden kann.

Auch die realen immobilienwirtschaftlichen Zusammenhänge zwischen Vermietern und Mietern bildet die angewandte Barwertmethode zur Kostenberechnung nicht vollständig ab. Während Vermieter die Umlage zur Finanzierung von Investitionen häufig als zu niedrig ansehen, sind deutliche Preissteigerungen der Kaltmieten bereits im heutigen gesetzlichen Rahmen für einige Miethaushalte eine kaum tragbare Mehrbelastung.

Jedoch kann auch hier die Szenarioanalyse mit ihrer Betrachtung der Gesamtkosten und Erträge im Quartiersmaßstab Lösungswege aufweisen. So zeigt sie, dass bei der kombinierten Umsetzung von Maßnahmen zur Bedarfsreduktion und zur Erzeugung von Wärme und insbesondere von Strom aus erneuerbaren Energien die Belastungen der Miethaushalte innerhalb einer Warmmietbetrachtung ausgeglichen werden können. Dies ergibt sich aus der Möglichkeit, die im heutigen regulatorischen Rahmen für Vermieter nicht immer wirtschaftlich darstellbare Verbesserung der Gebäudehülle oder Installation treibhausgasarmer Wärmeerzeuger durch Erträge von Photovoltaikanlagen zu „subventionieren“. Auch die Mehrbelastung der Miethaushalte durch gestiegene Kaltmieten kann z. B. bei Etablierung eines Mieterstromkonzeptes durch eine Reduktion der Strombezugskosten gedämpft oder gänzlich verhindert werden.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend lassen sich daraus vier Handlungsempfehlungen formulieren.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens E⁴Q zeigen, dass insbesondere durch eine übergreifende Modernisierungsplanung und den Zusammenschluss unterschiedlicher (wirtschaftlicher) Akteure Konzepte erarbeitet werden können, welche insgesamt tragfähig sind und dabei einen deutlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudebestand leisten. Die Projektergebnisse – und hier insbesondere das E⁴Q-Bewertungstool – können den handelnden Personen, Intermediären, wie z. B. Quartiers- oder Klimaschutzmanagern, sowie den Entscheidungsträgern der beteiligten Unternehmen hierfür den Weg bereiten.

Abbildung 14: Handlungsempfehlungen

Klimaschutz als Entscheidungskriterium berücksichtigen

Eine Vielzahl von Quartierskonzepten reduziert Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Status quo drastisch und zwar bei hinreichender Wirtschaftlichkeit. Deshalb sollten die Lebenszyklusbetrachtung und die Wirkung der Maßnahmen auf den Klimaschutz als Entscheidungskriterium herangezogen werden.

Die Systemzusammenhänge anerkennen

Modernisierungskonzepte für Quartiere führen zu langfristig besseren Ergebnissen für alle Beteiligten, wenn auf eine Optimierung nur einzelner Handlungsfelder verzichtet und ein integriertes Gesamtkonzept verfolgt wird.

Den Blick öffnen

Handelnde müssen über die bisherigen Wirkungsbereiche und Grenzen der Sektoren und/oder Geschäftsfelder hinaus denken und planen.

Den Weg bereiten

Heute noch anspruchsvoll wirkende Wärmeschutz- und Versorgungsstrategien bergen ein nur geringes Risiko für investierende Parteien, sind jedoch unverzichtbar auf dem Weg zum klimaneutralen Gebäudebestand. Je früher diese Prozesse und Konzepte zum Standard werden, desto besser platzieren sich die wirtschaftlichen Akteure im Wettbewerb.

Impressum

Ansprechpartner



**Institut für Massivbau,
Technische Universität Darmstadt**

Johannes Koert M.Sc.
+49 (0)6151 16 21400
info@massivbau.tu-darmstadt.de



Institut Wohnen und Umwelt

André Müller M.Sc.
+49 (0)6151 2904-18
a.mueller@iwu.de

Redaktion und Grafik

Kornelia Müller, Judith Heilmann (IWU)
Katrin Schalk, Ivonne Müller, Christoph Dahinten (HoE)

Projektlaufzeit

Dezember 2018 bis August 2022

Projektpartner


- Institut für Massivbau,
Technische Universität Darmstadt
- Institut Wohnen und Umwelt

Projektkoordination

**Institut für Massivbau,
Technische Universität Darmstadt**

- Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann-Diederich
- Prof. Dr.-Ing. Carl-Alexander Graubner (2018-2020)

Projektförderung

Gefördert durch:  Durch das Bundesministerium für
Wirtschaft und Klimaschutz
(BMWK) – Förderkennzeichen:
03EGB0014A/B

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Assoziierte Projektpartner

- ABGnova GmbH
- Amt für Umwelt, Energie und
Klimaschutz, Stadt Offenbach
- Bauverein AG
- Entega AG
- E.ON Energy Solutions GmbH
- Fraunhofer-Institut für Energie-
wirtschaft und Energiesystemtechnik
- House of Energy e.V.
- Institut für Politikwissenschaften,
Technische Universität Darmstadt, Prof. Dr. Kai Schulze
- Intelligent Energy System Services GmbH
- LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH

*Wir bedanken uns herzlich bei unserem Förder-
mittelgeber, dem Projektträger des Förderprogramms
„EnEff.Gebäude.2050“ sowie allen Projektpartnern
für die gute Zusammenarbeit.*



Link zur Projektwebsite:
[https://www.iwu.de/
forschung/energie/e4q/](https://www.iwu.de/forschung/energie/e4q/)





