

KLIMANEUTRAL EASY – PLANUNGSTOOL FÜR DIE KLIMANEUTRALE ENERGIEVERSORGUNG VON WOHNQUARTIEREN

Daniel Stegmaier, Johannes Schrade, Heike Erhorn-Kluttig

Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart, Deutschland,

E-Mail: Daniel.Stegmaier@ibp.fraunhofer.de

Kurzfassung

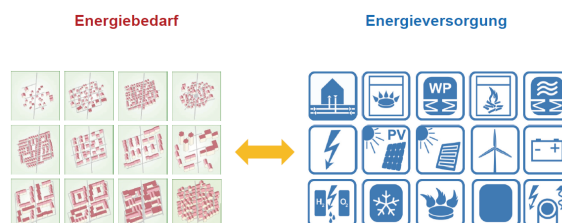
Um das Klimaschutzziel der Bundesregierung (Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045) zu erreichen, muss eine effektive Transformation des Gebäudesektors erfolgen. Im Rahmen des Forschungsprojekts „STADTQUARTIER 2050“ wurde hierfür eine standardisierte Methodik zur Modellierung und Bewertung von Wohnquartieren entwickelt, mit der Entscheidungsträger in der frühen Planungsphase unterstützt werden. Hierbei werden verschiedene Versorgungskonzepte unter Berücksichtigung der Siedlungsstruktur und standortspezifischer Rahmenbedingungen miteinander verglichen. Berücksichtigt werden monetäre Bewertungskriterien wie Investitionskosten, Energiekosten, Erträge aus erneuerbaren Energien und Kompensationskosten sowie ‚weiche‘ Faktoren wie Zukunftsfähigkeit, Umsetzbarkeit und Übertragbarkeit der Versorgungskonzepte. Die Methodik wurde in die Webanwendung „Klimaneutral Easy“ überführt, die sich durch benutzerfreundliche Eingabemasken und eine übersichtliche Ergebnisdarstellung auszeichnet.

Abstract

To achieve the German government's climate protection goal (greenhouse gas neutrality by 2045), an effective transformation of the building sector is necessary. As part of the research project “STADTQUARTIER 2050”, a standardized methodology for modelling and evaluating residential districts has been developed to support decision-makers in the early planning phase. This methodology compares different supply concepts, considering the settlement structure and site-specific conditions. It considers monetary evaluation criteria such as investment costs, energy costs, revenues from renewable energies, and compensation costs, as well as ‘soft’ factors such as future viability, feasibility, and transferability of the supply concepts. The methodology has been implemented in the web application “Klimaneutral Easy”, which stands out for its user-friendly input masks and clear presentation of results.

Einleitung

Die Wahl geeigneter Versorgungskonzepte für Quartiere ist für handelnde Personen und Entscheidungsträger in Kommunen eine große Herausforderung. Sie müssen sich mit vielschichtigen, teils gegensätzlichen Interessen auseinandersetzen. Neben wichtigen Themen wie Klimaschutz, bezahlbarem Wohnraum, Versorgungssicherheit und Anpassung an den Klimawandel müssen auch individuelle Interessen von Eigentümern, Investoren und Betreibern berücksichtigt werden. Abbildung 1 zeigt einen Ausschnitt der Vielfalt potenziell vielversprechender Technologien zur Deckung des Energiebedarfs verschiedener Siedlungstypen. Darüber hinaus können siedlungsspezifische Rahmenbedingungen sowie politische Zielsetzungen die Entwicklung von guten Lösungen erschweren (Schrade et al., 2023).



*Abbildung 1: Gegenüberstellung von
Energiebedarfskennwerten verschiedener
Quartierstypen mit einer Auswahl potenzieller
Komponenten einer klimaneutralen
Energieversorgung*

Das Gelingen der Transformation von Wohnquartieren und die Eignung hierfür erstellter Konzepte hängt stark von der Qualifikation und Erfahrung der beteiligten Akteure in den Bereichen Bauen und Energie ab (dena, 2023). Den Gebäudesektor zu dekarbonisieren und in diesem Zusammenhang die nationalen Klimaschutzziele zu erreichen, erfordert die Mitwirkung aller, auch kleiner Kommunen. Gemäß der Aufwandschätzung des Entwurfs zum Wärmeplanungsgesetz, gibt es deutschlandweit über 9.000 Gemeindegebiete, die bis 2028 zu einer kommunalen Wärmeplanung verpflichtet werden (WPG, 2023). Diese Gemeindegebiete setzen sich wiederum aus mehreren Quartieren

zusammen. Ein Quartier bezeichnet eine kleinräumige Einheit innerhalb einer Stadt oder Gemeinde mit einer bestimmten räumlichen, sozialen und funktionalen Struktur (Breuer, 2013).

Kleine Kommunen verfügen häufig nur über begrenzte personelle und finanzielle Ressourcen für die Durchführung der Konzeptionierung und Umsetzungsplanung. Insbesondere kleinere Kommunen stehen daher vor der großen Herausforderung, innerhalb kürzester Zeit eine strategische Wärmeplanung zu entwickeln, die ohne entsprechend niederschwelliger Hilfestellungen nicht leistbar erscheint.

Ein webbasiertes Planungstool kann diese Hilfestellung ermöglichen. Um eine gute Anwendbarkeit sicherzustellen, sollte besonderer Wert auf Benutzerfreundlichkeit und eine Fokussierung auf Relevantes gelegt werden. Dies ist möglich durch eine geringe Anzahl an benötigten Daten bei der Eingabe, bei gleichzeitig großer Anpassbarkeit der Rahmenbedingungen und umfangreichen Erläuterung zur Unterstützung der Benutzer.

Das Planungstool „Klimaneutral Easy“, das in diesem Beitrag vorgestellt wird, folgt den genannten Prinzipien. Es basiert auf Vorarbeiten aus dem Projekt „STADTQUARTIER 2050“. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Leitfaden zur Entwicklung klimaneutraler Energieversorgungskonzepte für Wohnquartiere erstellt (Schrade et al., 2022). „Klimaneutral Easy“ ist eine Weiterentwicklung dieser Methodik zu einer Webanwendung mit benutzerfreundlicher Oberfläche, einfacher Handhabung, geringen Anforderungen an fachliches Vorwissen, einer hohen Anpassbarkeit der Rahmenbedingungen und guter Nachvollziehbarkeit der Berechnungen.

Parallel zur Entwicklung des Planungstools „Klimaneutral Easy“ sind vergleichbare Tools entstanden, wie das „E4Q-Quartierbewertungstool“ des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU), (Müller & Koert, 2022) und das „nPro-Tool“ der nPro Energy GmbH (nPro Energy GmbH, 2023), die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Das „nPro-Tool“ ist webbasiert und zeichnet sich durch ein ansprechendes Design aus, das einen besonderen Fokus auf Benutzerfreundlichkeit und intuitive Bedienung legt. Die wichtigsten Funktionen werden durch eine demonstrative Einführung erklärt. Die Nutzung des Tools wird durch eine ausführliche Hilfe und Dokumentation erleichtert. Um ein Projekt anzulegen, wählen die Nutzenden zunächst eine Versorgungslösung (Wärmenetz oder gebäudeweise Versorgung) sowie den Standort aus. Anschließend wird eine erweiterbare Liste von Gebäuden verschiedener Typen erstellt und der Energiebedarf dargestellt. Bei Vorhandensein eines Wärmenetzes können zudem die Netztemperatur und die Netzverluste angepasst werden. In einer Übersicht können verschiedene Varianten von Energieerzeugungstechnologien angelegt werden. Diese können dann mithilfe einer Simulation dimensi-

oniert werden, um eine Systemoptimierung zu ermöglichen.

Das „E4Q-Quartierbewertungstool“ ist ein Excel-basiertes Tool mit Makros. Das Anlegen eines Quartiers erfolgt in wenigen Schritten, bei denen der Quartierstyp ausgewählt und Rahmenbedingungen wie Baualtersklassen, Dämmstandards, Soll-Innentemperaturen und der Standort festgelegt werden. Die Auswahl der Energieversorgung erfolgt im Anschluss. Es besteht die Möglichkeit, bis zu vier verschiedene Sanierungskonzepte zu erstellen, wobei die Nutzenden das energetische Sanierungsniveau der Gebäudehülle, das Wärmeversorgungskonzept und die Nutzung von Solarenergie auf den Gebäudedächern festlegen. Zusätzlich können ökonomische und ökologische Parameter sowie verschiedene Emissions- und Energiepreisszenarien angepasst werden. Als Ergebnis der Quartiersbewertung werden Steckbriefe sowohl für den Status Quo als auch für jede ausgewählte Variante generiert.

Die beiden beschriebenen Tools haben unter anderem die Gemeinsamkeit, dass die Rahmenbedingungen des Quartiers zusammen mit dem Versorgungskonzept detailliert erfasst und angegeben werden müssen. „Klimaneutral Easy“ verfolgt hier einen anderen Ansatz, welcher im Folgenden erläutert wird.

Einführung in „Klimaneutral Easy“

„Klimaneutral Easy“ folgt einem bewusst einfach gehaltenen Aufbau: Auf der linken Seite der Benutzeroberfläche befindet sich eine feste Navigationsleiste, während auf der rechten Seite der Inhalt des jeweils ausgewählten Menüpunktes wiedergegeben wird. Im Kopfbereich werden die Nutzenden mit Hilfe eines erläuternden Textes in das Thema des jeweiligen Menüpunktes eingeführt. Mit Hilfe von „Info-Buttons“ werden viele weitere Erklärungen gegeben. Detailliertere Erklärungen einschließlich Quellenangaben und Darstellungen sämtlicher Funktionen finden sich in einem technischen Benutzerhandbuch.

Die Berechnung innerhalb des Tools wird im Rechenkern der Fraunhofer IBP-Software „District Energy Concept Advisor (D-ECA)“ durchgeführt. Dieser basiert auf dem Rechenkern „ibp18599kernel“, welcher vollumfänglich die Rechenvorschriften der DIN V 18599 umsetzt (IBP, 2018).

Dateneingabe

Um das Tool nutzen zu können, müssen die Nutzenden Angaben zu den Siedlungskennwerten, dem Standort und den limitierenden Faktoren des zu bewertenden Quartiers machen. Abbildung 2 veranschaulicht den Ablauf der Toolnutzung als Prozessdiagramm.

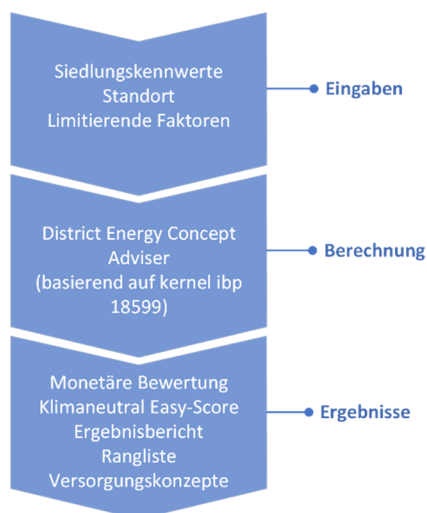


Abbildung 2: Prozessschema zum Ablauf der Toolnutzung

Für die Modellierung des Quartiers stehen basierend auf der Klassifizierung von Blesl et al. (2001) zehn verschiedene Siedlungstypen zur Verfügung, die hauptsächlich für Wohnzwecke genutzt werden:

- ST 1: Lockere offene Bebauung (Streusiedlung)
- ST 2: Einfamilienhaus- und Doppelhaus-siedlung
- ST 3a: Städtischer Dorfkern
- ST 3b: Ländlicher Dorfkern
- ST 4: Reihenhaussiedlung
- ST 5a: Siedlung kleiner Mehrfamilienhäuser
- ST 5b: Zeilenbebauung mit kleinen und großen Mehrfamilienhäusern
- ST 6: Zeilenbebauung mit großen Mehrfamilienhäusern und Hochhäusern
- ST 7a: Blockbebauung niedriger Dichte
- ST 7b: Blockbebauung hoher Dichte

Es ist zudem möglich, eine Kombination aus Bestands- und Neubauflächen sowie eine Mischung mehrerer verschiedener Siedlungstypen einzugeben.

Für die Anpassung des Quartiers an standortspezifische Gegebenheiten kann entweder eine Postleitzahl oder ein Ortsname eingegeben werden. Dadurch wird das Quartier einer der 15 Klimaregionen zugeordnet, die in Anhang E des Teil 10 der DIN V 18599 aufgeführt sind. Zudem werden regionale Kostenunterschiede berücksichtigt, indem Regionalfaktoren des Baukosteninformationszentrums für Architekten (BKI, 2022) angewendet werden.

Nicht jedes Versorgungskonzept kann an jedem Standort umgesetzt werden. Durch die Abfrage von

Ja/Nein-Fragen kann die Auswahl der zu berücksichtigenden Versorgungskonzepte begrenzt und an standortspezifische technische und rechtliche Restriktionen angepasst werden. So beeinflussen beispielsweise die Verfügbarkeit von nutzbarer Abwasserwärme oder das Vorhandensein eines quartiersübergreifenden Fernwärmenetzes die Energieversorgungsmöglichkeiten.

Energieversorgungsvarianten

Für die Auswertung werden mehr als 30 verschiedene Versorgungskonzepte in Betracht gezogen. Diese umfassen dezentrale, gebäudeweise Lösungen, Lösungen mit Gebäude- und Quartiersnetzen sowie mit quartiersübergreifenden Fernwärmenetzen. Als potenzielle Wärmeerzeuger werden unter anderem Wärmepumpen (WP), Brennwertkessel, Blockheizkraftwerke (BHKW) und Brennstoffzellen betrachtet. Die verwendeten Energieträger umfassen Solarenergie, Strom, Biomasse, Erdgas und synthetisches Gas, sowie konventionelle und nahezu klimaneutrale Fernwärme. Für die zentralen Versorgungskonzepte werden sowohl kalte Nahwärmenetze als auch konventionelle Wärmenetze in Betracht gezogen.

Es werden vier unterschiedliche Energiestandards für den Zielzustand der thermischen Gebäudehülle in Betracht gezogen. In Anlehnung an den KfW-Effizienzhausstandard (EH) werden die Effizienzniveaus EH 40 und EH 55 betrachtet (KfW, 2022). Das Effizienzniveau EH 100 wird als Referenz für den sanierten Bestand angenommen, während für den unsanierten Bestand ein mittleres Wärmeschutzniveau entsprechend der Baualtersklasse 1969 bis 1978 angesetzt wird. Die Energieversorgungsvarianten setzen sich als Kombination aus den verschiedenen betrachteten Versorgungskonzepten und Energiestandards der thermischen Gebäudehülle im Zielzustand zusammen. Darüber hinaus können unterschiedliche Lüftungskonzepte wie Zuluftanlagen mit Wärmerückgewinnung, Abluftanlagen und Fensterlüftung in den Varianten berücksichtigt werden. Die Lüftungskonzepte sind anpassbar, werden als Voreinstellung jedoch in Abhängigkeit des Energiestandards den verschiedenen Gebäudetypen zugeordnet. Die Vielfalt an Varianten ermöglicht eine umfassende Bewertung und Analyse verschiedener Möglichkeiten zur Energieversorgung im Quartier.

Ergebnisdarstellung

Abhängig von den eingegebenen Daten werden Investitionskosten, Energiekosten, Kompensationskosten und jährliche Gesamtkosten als volkswirtschaftliche Betrachtung für die verschiedenen Varianten berechnet. Diese Kostenwerte können entweder als absolute Beträge oder in Relation zur gesamten Nettoraumfläche der Gebäude im Quartier dargestellt werden. In einem sogenannten „Klimaneutral Easy-Score“ werden die Bewertungen der verschiedenen Kostenkategorien aggregiert.

Die berechneten Ergebnisse werden in tabellarischer Form wiedergegeben. Neben einer kombinierten Bewertungstabelle, in der die verschiedenen ausgewählten Siedlungstypen des Quartiers gemeinsam bewertet dargestellt werden, gibt es auch Reiter zu den Ergebnissen der einzelnen Siedlungstypen.

In Abbildung 3 wird ein Ausschnitt der kombinierten Ergebnistabelle gezeigt, in der die verschiedenen Varianten nach dem „Klimaneutral Easy-Score“ sortiert dargestellt werden. Die Kosten werden spezifisch pro Quadratmeter der Nettoraumfläche angegeben. Auf der rechten Seite, außerhalb des Screenshots, befinden sich die Spalten „Kompensationskosten“ und „volkswirtschaftliche Betrachtung“.

Kombination Bestand Reihenhaussiedlung Neubau Zeilenbebauung mit kl. und gr. Mehrfamilienhäus

Bezogen auf Nettoraumfläche der Gebäude (140.179 m²) Absolute Erget

Versorgungs-konzept	Gebäude-Standards	Klimane... Easy-Score	Investitionen [€/m²]	Energie-kosten [€/m²a]
Nahwärme Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Abwasserwärm...	unsaniert, EH55	16	382	21
Nahwärme Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden	unsaniert, EH55	16	375	22
Nahwärme Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Agrothermie	unsaniert, EH55	16	382	22
Fernwärme (konventionell)	EH55	14	369	21
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	EH40, EH55	11	428	21

Abbildung 3: Screenshot mit einem Ausschnitt der Ergebnistabelle des Tools „Klimaneutral Easy“

Es besteht die Möglichkeit, bis zu zehn Varianten aus der Ergebnistabelle in einem Quartiersbericht zusammenzufassen. Dieser Bericht enthält eine Beschreibung des Versorgungskonzepts sowie eine vereinfachte Visualisierung des Anlagenschemas. Die Kosten werden in ihre Bestandteile aufgeschlüsselt und wesentliche Teilergebnisse der energetischen und ökologischen Bewertung werden präsentiert.

Weiterhin enthält der Quartiersbericht eine Bewertung der ‚weichen‘ Faktoren für jedes Versorgungskonzept. Diese Faktoren umfassen die Zukunftsfähigkeit, Umsetzbarkeit, Übertragbarkeit, Erweiterbarkeit, Klimaanpassung, Robustheit und Netzdienlichkeit. Die Bewertung erfolgt qualitativ anhand eines dreistufigen Bewertungssystems. Für jede Bewertung wird eine Erläuterung gegeben. Eine tabellarische Gesamtübersicht ermöglicht den Vergleich mit anderen Versorgungskonzepten. Beispielsweise erhalten Lösungen mit Wärmepumpen eine positive Bewertung für ihre Zukunftsfähigkeit, während Versorgungskonzepte mit fossilen Energieträgern und Biomasse negativ bewertet werden. Diese Einordnung basiert auf der Begrenztheit der Ressourcen und der politischen Bedeutung für die Transformation des Energiesystems. Die Einbeziehung ‚weicher‘ Faktoren trägt dazu bei, eine

umfassendere Bewertung über finanzielle und ökologische Aspekte hinaus vornehmen zu können.

Klimaneutralität und Bilanzrahmen

Das Ziel der Klimaneutralität wird im Tool definiert als das Erreichen einer ausgeglichenen Jahresbilanz der Treibhausgasemissionen, die durch den Betrieb von Gebäuden (Heizung und Stromversorgung einschließlich Nutzerstrom) freigesetzt werden. Hierfür werden die Treibhausgase in eine entsprechende Menge an CO₂-Äquivalenten umgerechnet. Die erstellte Bilanz basiert auf der Methodik der Verursacherbilanz, bei der die Endenergieverbräuche ermittelt und mit spezifischen Emissionsfaktoren verrechnet werden, um die Treibhausgasemissionen zu bestimmen (Hertle et al., 2019). Für den eingespeisten Strom aus PV wird eine Gutschrift gewährt, indem die Menge des eingespeisten PV-Stroms mit dem Emissionsfaktor für Strom multipliziert und von der Gesamtmenge der Treibhausgasemissionen abgezogen wird.

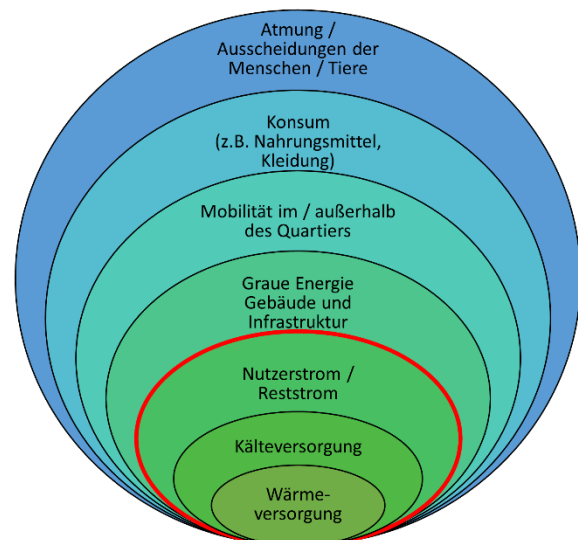


Abbildung 4: Grafische Darstellung verschiedener Bilanzrahmen für die Betrachtung von Treibhausgasemissionen

In Abbildung 4 wird mit einer roten Linie der allgemeine Bilanzrahmen dargestellt, der berücksichtigt wird. Die Treibhausgasemissionen im Zusammenhang mit der grauen Energie, der Mobilität, dem Konsum und der Atmung der Bewohner werden in dieser Bilanzierung nicht berücksichtigt.

Berechnungsmodell

Für die Berechnungen werden die charakteristischen Werte der Siedlungstypen zur Gebäudeanzahl, Länge der Straßen und prozentualen Zusammensetzung der Gebäudetypen verwendet, die in einer Studie zur pluralistischen Wärmeversorgung von Blesl et al. (2001) ermittelt wurden. In „Klimaneutral Easy“ wird diese Siedlungstypologie mit der deutschen Gebäudetypologie kombiniert, die im Rahmen des EU-Projekts

TABULA entwickelt wurde (Loga et al., 2015). Dadurch entsteht ein modellierter Gebäudebestand des Quartiers aufgeteilt in Einfamilienhäuser (EFH), Reihenhäuser (RH), kleinen Mehrfamilienhäuser (MFH), große Mehrfamilienhäuser (GMH) und Hochhäuser (HH) verschiedener Baualtersklassen.

Energetische Bewertung

Die energetische Bewertung der Gebäude erfolgt gemäß der DIN V 18599:2018-09 durch Anwendung des Monatsbilanzverfahrens (DIN, 2018). Dabei werden Standardnutzungsprofile für Wohngebäude verwendet. Die Heizlast der Gebäude wird gemäß Teil 2 der Norm und die thermische Leistung der Trinkwarmwasserbereitstellung gemäß Teil 8 der Norm ermittelt. Die Heizlast wird unter Berücksichtigung der Klimaregion mit einem Korrekturfaktor angepasst, der mithilfe der Normaußentemperaturen der DIN SPEC 12831 (DIN, 2017) wie in Gleichung 1 dargestellt, berechnet wird. Als Referenzklima für Deutschland gilt die Klimaregion Potsdam.

$$f_{\text{Heiz}} = \frac{(\theta_i - \theta_{e,\text{Potsdam}})}{(\theta_i - \theta_{e,\text{Klimaregion}})} \quad (1)$$

f_{Heiz} = Heizkorrekturfaktor; θ_i = Innentemperatur (hier: 20 °C); θ_e = Normaußentemperatur

Die erforderlichen Vorlauftemperaturen für die Gebäudeheizung werden in Abhängigkeit von der Heizlast und der Art der Wärmeübergabe gemäß Tabelle 1 bestimmt. Für die Erhitzung des Trinkwarmwassers unter Verwendung eines gebäudezentralen Trinkwarmwasserspeichers wird eine erforderliche Vorlauftemperatur von 67 °C angenommen. Im Gebäudemodell von „Klimaneutral Easy“ wird die Beheizung von Neubauten mittels Flächenheizung abgebildet, während Bestandsgebäude mit Radiatoren beheizt werden.

Tabelle 1: Vorlauftemperaturen der Gebäudeheizung in Abhängigkeit der Heizlast und der Art der Wärmeübergabe (Schrade et al., 2022)

HEIZLAST [W/M ²]	VORLAUFTEMPERATUR [°C] BEI	
	RADIATOREN	FLÄCHEN- HEIZUNGEN
> 120	90	-
> 80	70	-
> 50	55	55
> 30	55	45
≤ 30	45	35

Die DIN V 18599 bildet den Nutzerstrom nicht ab. In „Klimaneutral Easy“ wird der Nutzerstrom in Abhängigkeit der Haushaltsgröße und Haushaltsgrößenverteilung je Gebäudetyp, abgeleitet aus dem Zensus 2011 (Destatis, 2011) sowie dem Stromverbrauch pro Haushalt, abgeleitet aus dem Stromspiegel 2019 (co2online, 2019), ermittelt.

Die Wärmenetzlösungen der zentralen Versorgungskonzepte werden als Zweileitersystem mit drei Strahlen modelliert. Die Trassenlänge wird basierend auf den Siedlungscharakteristika als Gesamtlänge der Straßen angenommen. Der Druckverlust von 100 Pascal pro Meter wird zur Dimensionierung der Rohrdurchmesser verwendet. Die elektrische Leistung der Netzpumpe wird durch den Druckverlust, den Wirkungsgrad der Pumpe (mit einer Annahme von 60 Prozent) und die Volllaststunden der angeschlossenen Verbraucher bestimmt. Die Verluste des Wärmenetzes werden unter Berücksichtigung von Betriebstemperatur, Bodentemperatur, Netzlänge und dem Wärmedurchgangskoeffizienten der Rohrleitungen berechnet. Die Betriebstemperatur des Wärmenetzes wird anhand der Temperaturanforderungen der angeschlossenen Gebäude und der spezifischen Heizlast ermittelt.

Bei der Dimensionierung der Wärmeerzeuger für zentrale Versorgungskonzepte wird die Gleichzeitigkeit des Wärmebedarfs berücksichtigt. Unter der Annahme einer homogenen Verteilung der Verbraucher kann der Gleichzeitigkeitsfaktor mithilfe der Approximationsgleichung 2 von Winter et al. (2001) bestimmt werden:

$$\text{GLF} = a + \frac{b}{1 + (\frac{n}{c})^d} \quad (2)$$

GLF = Gleichzeitigkeitsfaktor; n = Anzahl Abnehmer; a, b, c, d = Parameter der Approximationsfunktion

Um die Gleichzeitigkeit nicht zu überschätzen, wenn der Wärmebedarf großer Gebäude (HH) und kleiner Gebäude (EFH) gemeinsam mit Hilfe eines Wärmenetzes gedeckt wird, werden verschiedene Gruppen der Gleichzeitigkeit gebildet. Die Aufteilung wird entsprechend der Wärmeleistung vorgenommen (Winter et al., 2001).

Den EFH, RH und MFH werden Satteldächer zugeordnet und den GMH und HH Flachdächer. Die im Berechnungsmodell als geeignet angenommene Fläche für den Ausbau von PV-Modulen basiert auf der Annahme, dass 40 Prozent der Satteldachflächen in Südost-Ausrichtung mit 30° Neigung sowie 50 Prozent der Flachdachflächen mit einer Ost-West-Orientierung und 10° Neigung genutzt werden können. Diese Abschätzung orientiert sich an den Erkenntnissen der Studie „Erneuerbare Energien 2020 - Potenzialatlas Deutschland“ (Schmidt & Mühlhoff, 2010). Die spezifische Leistung der PV-Module wird gemäß den „PV-Fakten“ des Fraunhofer-Instituts für Solare

Energiesysteme ISE mit 200 Watt Peak pro Quadratmeter für Dachflächen angenommen (Wirth, 2023). Der spezifische Ertrag wird nach den in der DIN V 18599 hinterlegten mittleren Strahlungsangebotswerten der Klimaregion, in der sich der betrachtete Standort befindet, bestimmt. Verluste aufgrund erhöhter Betriebstemperatur, variabler Einstrahlungsbedingungen, und Verschmutzungen sowie Verluste durch Leitungswiderstände und die Wandlungsverluste werden berücksichtigt.

Monetäre Bewertung

Die Investitionskosten umfassen Komponenten wie den baulichen Wärmeschutz, die Lüftung, die Wärmeerzeuger und PV-Module. Für zentrale Versorgungskonzepte kommen weitere Komponenten des Wärmenetzes hinzu.

Die Energiekosten setzen sich aus Heizkosten, Kosten für die Trinkwarmwasserbereitung und Stromkosten zusammen. Die Energiekosten werden durch Multiplikation der Endenergieverbräuche mit den Energiepreisen der eingesetzten Energieträger ermittelt.

Die Kompensationskosten werden berechnet, indem die Menge an Treibhausgasemissionen für Heizung, Trinkwarmwasserbereitung, und Strom unter Berücksichtigung einer Gutschrift für die Einspeisung des Stroms aus PV mit den vom Umweltbundesamt empfohlenen Klimakosten multipliziert werden (Bünger & Matthey, 2018). Die Treibhausgasemissionen ergeben sich durch Multiplikation der Endenergieverbräuche mit spezifischen Emissionsfaktoren gemäß DIN V 18599 Teil 1. Für Strom wird ein prospektiver mittlerer Emissionsfaktor des Betrachtungszeitraums angesetzt, welcher auf Studien des Internationalen Instituts für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH (IINAS) basiert, die ein Szenario des Strommixes in Deutschland prognostizieren (Fritsche & Stetz, 2021).

Für die volkswirtschaftliche Betrachtung werden die jährlichen Gesamtkosten abgeschätzt, indem die Investitionskosten über die Nutzungsdauer linear abgeschrieben (40 Jahre für baulichen Wärmeschutz, 20 Jahre für technische Anlagen) werden. Zusätzlich werden Energie- und Kompensationskosten addiert und die Erträge aus der Stromeinspeisung abgezogen.

Zur Ermittlung des „Klimaneutral Easy-Scores“ einer Variante werden die Investitionskosten, Energiekosten, Kompensationskosten sowie die volkswirtschaftliche Betrachtung in Relation zu den anderen Varianten betrachtet, um das Perzentil zu ermitteln. Dabei wird eine Punktzahl von 1 bis 5 zugewiesen, die sich nach den prozentual günstigsten Kosten aufteilt. Die Bewertungsskala in Relation der für jede Kostenkategorie kostengünstigsten Variante (entspricht 100 Prozent) sieht wie folgt aus:

$$1: \begin{cases} 0 \% \\ \vdots \\ 20 \% \end{cases} \quad 2: \begin{cases} 20 \% \\ \vdots \\ 40 \% \end{cases} \quad 3: \begin{cases} 40 \% \\ \vdots \\ 60 \% \end{cases} \quad 4: \begin{cases} 60 \% \\ \vdots \\ 80 \% \end{cases} \quad 5: \begin{cases} 80 \% \\ \vdots \\ 100 \% \end{cases}$$

Die einzelnen Bewertungen werden zu einem „Klimaneutral Easy-Score“ aggregiert, der eine Gesamtbewertung der jeweiligen Variante ermöglicht und Werte zwischen 4 und 20 annehmen kann. Darüber hinaus kann der Einfluss der einzelnen Bewertungen auf den „Klimaneutral Easy-Score“ durch eine Gewichtung individuell angepasst werden. Diese Funktion erlaubt es, unterschiedlichen Bewertungsperspektiven gerecht zu werden. Investoren legen größeren Wert auf die Investitionskosten, während für die Bewohner vor allem die Energiekosten von Bedeutung sind. Die Kompensationskosten spiegeln die anfallenden Treibhausgasemissionen wider und sind somit für eine Umweltbewertung relevant.

Die ausgewiesenen Energiekosten sind die mittleren jährlich anfallenden Kosten eines Betrachtungszeitraums. Unter Berücksichtigung einer jährlich konstanten Preissteigerung in diesem Zeitraum zeigt Gleichung 3, wie der Faktor der Preisänderung berechnet wird. Dieser Faktor wird mit dem Ausgangspreis multipliziert, um die mittleren jährlich anfallenden Energiekosten zu erhalten.

$$f_{\text{Preis}} = \sum_{n=1}^b \frac{(1 + \frac{x}{100})^n}{b} \quad (3)$$

f_{Preis} = Mittlerer Preisänderungsfaktor; b = Betrachtungszeitraum; x = Prozentuale jährliche Preisänderungsrate

Im Tool sind standardmäßig für die verschiedenen eingesetzten Energieträger Energiepreise des Jahres 2020 als Ausgangspreise hinterlegt. Diese werden anschließend mit dem Faktor f_{Preis} multipliziert, um den mittleren Energiepreis im Betrachtungszeitraum zu erhalten. Der Ausgangspreis der einzelnen Energieträger, der Betrachtungszeitraum und die jährliche Preisänderungsrate können von den Nutzenden angepasst werden.

Die geschätzten Investitionskosten für die Umsetzung eines Versorgungskonzepts basieren auf Kostenkennwerten. Die Kosten für die Wärmedämmung werden abhängig von den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der einzelnen Bauteile abgeschätzt. Für die Wärme- und Stromerzeugung werden Kostenkurven verwendet, die einen degressiven Verlauf mit zunehmender Leistung aufweisen. Die verwendeten Kostenfunktionen können dem Anhang des Leitfadens von Schrade et al. (2022) entnommen werden.

Anwendungsbeispiel und Testnutzung

Im Projekt „STADTQUARTIER 2050“ wurden Konzepte für eine klimaneutrale Energieversorgung für zwei Quartiere entwickelt. Eines davon befindet sich

in Stuttgart und soll hier als Anwendungsbeispiel für „Klimaneutral Easy“ dienen.

Projektpartner der Landeshauptstadt Stuttgart und der Stadt Überlingen haben eine Beta-Version der Software zu Testzwecken genutzt. Im folgenden Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse des Anwendungsbeispiels und anschließend eine Auswertung der Rückmeldung der Projektpartner präsentiert.

Bürgerhospital in Stuttgart

Das Quartier erstreckt sich über eine Fläche von etwa 5 ha und liegt in einem hochverdichteten städtischen Kontext. Geplant sind mehr als 600 Wohneinheiten sowie Kindertagesstätten, Pflegeeinrichtungen, Einkaufsmöglichkeiten, Büroflächen und Kleingewerbe­flächen. Die meisten Bestandsgebäude werden abgerissen und durch Neubauten ersetzt. Das Ziel besteht darin, bezahlbaren Wohnraum zu schaffen. Der städtebauliche Entwurf sieht eine Blockrandbebauung mit bis zu acht Vollgeschossen vor, die um innenliegende Freiflächen angeordnet ist.

Im ersten Schritt wird der Siedlungstyp des Quartiers und der Standort festgelegt. Im Falle des Bürgerhospitals in Stuttgart handelt es sich um den Siedlungstyp „ST 7a: Blockbebauung niedriger Dichte“. Das Quartier liegt in einer Region mit mildem Klima und hoher Solarstrahlung.

Im nächsten Schritt werden die standortspezifischen limitierenden Faktoren eingegeben, um die Versorgungskonzepte einzuschränken. Es gibt diverse rechtliche und technische Restriktionen, wie die Vermeidung von Feinstaub, das Vorkommen von Anhydrid-Gestein im Untergrund und baurechtliche Einschränkungen durch Notwasserbrunnen, Tunnelbauwerke, Thermalwasservorkommen und einen erhaltenswerten Baumbestand im Projektgebiet.

Nach der Eingrenzung durch die limitierenden Faktoren ergeben sich drei dezentrale Versorgungskonzepte (Luft-Wasser-WP, Sole-Wasser-WP mit Hybridkollektoren bzw. PVT-Kollektoren und Sole-Wasser-WP mit Erdsonden) sowie vier zentrale Versorgungskonzepte (Nahwärme Sole-Wasser-WP mit Erdsonden oder Abwasserwärmerückgewinnung und kalte Nahwärme aus Abwasserwärme oder gespeist aus Erdsonden). Zusätzlich könnte auch die in der Nähe gelegene Fernwärme genutzt werden, die jedoch derzeit noch ein hohes Treibhausgaspotenzial aufweist. Die Varianten mit dem Energiestandard EH 100 und der unsanierte Bestand werden nicht betrachtet, da es sich um ein Neubaugebiet handelt, wodurch eine Mindestanforderung an den Energiestandard im Gebäudeenergiegesetz (GEG, 2023) festgelegt ist.

Möchte man aus dieser eingeschränkten Auswahl eine Rangliste der besten Versorgungskonzepte bei Gleichgewichtung der verschiedenen Kostenkategorien erstellen, bietet es sich an, die Versorgungskonzepte mit den höchsten „Klimaneutral Easy-Scores“ zu betrach-

ten. Für den Energiestandard **EH 55** sind dies die folgenden zentralen Versorgungskonzepte mit einem Wärmenetz:

Sole-Wasser-WP mit Erdsonden:	17
Sole-Wasser-WP mit Abwasserwärme:	17
Fernwärme (konventionell)	14

Für den Energiestandard **EH 40** fällt der „Klimaneutral Easy-Score“ geringer aus:

Sole-Wasser-WP mit Erdsonden:	15
Sole-Wasser-WP mit Abwasserwärme:	15
Fernwärme (konventionell)	13

Der negative Effekt der erhöhten Kosten für den baulichen Wärmeschutz der Gebäudehülle auf den „Klimaneutral Easy-Score“ ist im Vergleich zu dem positiven Effekt der Emissions- und Energieeinsparungen größer. Wenn ein ambitionierter Klimaschutz eine Grundprämisse der jeweiligen Quartiersentwicklung ist, sollten die Kompensationskosten als entscheidende Größe betrachtet werden. Sowohl diese als auch die Energiekosten fallen in den Wärmenetzlösungen mit Sole-Wasser-WP und der Ausführung des Energiestandards EH 40 am geringsten aus. Für Investoren jedoch fallen beim Anschluss an das bereits vorhandene konventionelle Fernwärmenetz bei EH 55-Ausführung die geringsten Kosten an.

Um die Versorgungskonzepte umfassend zu bewerten, können ausgewählte Quartiersberichte der vielversprechendsten Versorgungsvarianten erstellt werden. Hierin findet sich eine Beschreibung und Skizze des Versorgungskonzepts und eine Bewertung der ‚weichen‘ Faktoren. So zeigt sich zum Beispiel, dass das Konzept der Sole-Wasser-WP mit Abwasserwärmerückgewinnung negativ in den Punkten Umsetzbarkeit, Übertragbarkeit und Erweiterbarkeit ausfällt. Als wichtiger Bestandteil der Klimaschutzstrategie und durch den Ausbau erneuerbarer Energien ist es jedoch eine zukunftsfähige Technologie.

Im Quartier Bürgerhospital soll tatsächlich ein Nahwärmekonzept mit Sole-Wasser-WP umgesetzt werden. Dieses Konzept nutzt sowohl die Wärmequelle des Erdreichs als auch Abwasserwärme zur Wärmeversorgung. Zusätzlich sollen PVT-Kollektoren eingesetzt werden, um das Erdreich zu regenerieren. Der angestrebte Energiestandard entspricht dem Effizienz-niveau EH 55 (Schrade et al., 2020).

Testnutzung

Im Rahmen der Testnutzung wurden den Projektpartnern verschiedene Leitfragen zur Nutzerfreundlichkeit, Verständlichkeit, Nutzbarkeit und Ergebnisdarstellung gestellt. Es ergab sich folgendes Bild:

Nutzerfreundlichkeit und Verständlichkeit des Tools wurden positiv bewertet. Dass dieses Tool für Quartiere und somit auch für ganze Städte nutzbar bzw. an-

wendbar ist, wurde positiv vermerkt. Die Ergebnisdarstellung des Tools erhielt insgesamt gute Bewertungen. Hierbei wurde die Aufteilung der Ergebnisse im Quartiersbericht auf zwei Seiten, wobei auf der ersten Seite die Kosten und auf der zweiten Seite detaillierte Informationen dargestellt werden, als besonders zufriedenstellend aufgenommen.

Es wurde angemerkt, dass eine klare Reihenfolge bei der Dateneingabe hilfreich wäre, beispielsweise durch eine Durchnummerierung der Schritte. Darüber hinaus wurde gewünscht, bekannte Energiekennwerte aus der kommunalen Wärmeplanung für Bestandssiedlungen in das Tool einbinden zu können. Es wurden zusätzliche Informationen und Kennwerte vorgeschlagen, die in den Ergebnissen berücksichtigt werden könnten, wie beispielsweise die Leistung der PV-Anlagen und die Länge des Wärmenetzes.

Die Verbesserungsvorschläge aus der Testnutzung wurden in einem Release des Software-Tools umgesetzt. Das finale Software-Tool steht als webbasierte Applikation kostenfrei auf der Projektwebseite zur Verfügung.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Umsetzung von klimaneutralen Versorgungslösungen für Quartiere spielt eine zentrale Rolle bei der Erreichung der ambitionierten Klimaschutzziele der Bundesregierung. Eine besondere Herausforderung besteht darin, die unterschiedlichen Interessen der Akteure im Quartier im Planungsprozess zu berücksichtigen und tragfähige Lösungen anzubieten. Um die gewaltige Dimension der kommunalen Energiewende stemmen zu können, werden Hilfestellungen benötigt, die deutschlandweit und zeiteffizient anwendbar sind. Mit „Klimaneutral Easy“ steht den handelnden Personen ein Werkzeug zur Verfügung, das auch Laien in kurzer Zeit eine Spanne an Lösungsmöglichkeiten zur Unterstützung in der frühen Planungsphase bietet. Es zeichnet sich besonders durch die hohe Nutzerfreundlichkeit sowie Anpassbarkeit und Transparenz des Berechnungsmodells aus.

Die Anwendung des Planungstools auf das Wohnquartier in Stuttgart und die Testnutzung durch die Projektpartner haben verdeutlicht, dass das Tool gut einsetzbar ist. Es ermöglicht den handelnden Personen einen umfassenden Überblick über die Vielzahl der verfügbaren Versorgungsvarianten zu erhalten und diese miteinander zu vergleichen. Dabei können die verschiedenen Optionen unter Berücksichtigung der gegebenen Rahmenbedingungen umfassend analysiert und bewertet werden.

Danksagung

Das in diesem Artikel beschriebene Vorhaben wurde im Rahmen des Verbundvorhabens EnStadt mit dem Projekttitle „STADTQUARTIER 2050 - Herausforderungen gemeinsam lösen“ gefördert. Die Förderung erfolgte durch das Bundesministerium für Bildung

und Forschung (BMBF) und das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03SBE116C. Abbildung 5 zeigt das „STADTQUARTIER 2050“-Logo und die Logos der Projektpartner.



Abbildung 5: Logo des Projekts „STADTQUARTIER 2050“ und Logos der Projektpartner und assoziierten Partner



Literatur

- Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH (BKI) (2022). BKI Kostenplaner. Regionalfaktoren 2022. Version 2021.62.9: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH (BKI).
- Blesl, M.; Neuffer, H.; Witterhold, F.-G.; Pfaffenberger, W.; Gregorzewski, A.; Schulz, W.; Fahl, U.; Voß, A.; Jochem, E.; Radgen, P.; Schmid, C.; Dribbisch, M.; Sager, J.; Sander, T.; Zschernig, J.; Carter, J. M.; Mauch, W.; Dötsch, C.; Fahlenkamp, H.; Hölder, D., 2001. Strategien und Technologien einer pluralistischen Fern- und Nahwärmeversorgung in einem liberalisierten Energiemarkt unter besonderer Berücksichtigung der Kraft-Wärme-Kopplung und regenerativer Energien: Kurztitel: Pluralistische Wärmeversorgung; AGFW-Hauptstudie - erster Bearbeitungsabschnitt. Band 1, Grundlagen der Kraft-Wärme-Kopplung, Zertifizierungsverfahren und Fördermodelle. Unter Mitarbeit von Universität Stuttgart.
- Breuer, B., 2013. Ziele nachhaltiger Stadtquartiersentwicklung. Hg. v. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR). Bonn.

- Bünger, B.; Matthey, A., 2018. Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- co2online gemeinnützige GmbH (Hrsg.), 2019. Stromspiegel für Deutschland 2019.
- Deutsche Energie-Agentur (dena) (Hrsg.), 2023. Erste Schritte in der Kommunalen Wärmeplanung: Die Vorbereitungsphase. Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) :DIN EN 12831. Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast. Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN) :DIN V 18599. Energetische Bewertung von Gebäuden. Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 2018. District Energy Concept Adviser. Online verfügbar unter <https://district-eca.de>.
- Fritsche, U. R.; Stetz, T., 2021. Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG-Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2020 sowie Ausblicke auf 2030 und 2050. Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien GmbH. Darmstadt.
- Gebäudeenergiegesetz (GEG), 2023. Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden.
- Hertle, H.; Dünnebeil, F.; Gugel, B.; Rechsteiner, E.; Reinhard, C., 2019. Empfehlungen zur Methodik der kommunalen Treibhausgasbilanzierung für den Energie- und Verkehrssektor in Deutschland. ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg (Bilanzierungs-Systematik Kommunal (BISKO)).
- Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW) (2022). Merkblatt Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG). Nichtwohngebäude. Online verfügbar unter [www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-\(Inlandsf%C3%B6rderung\)/PDF-Dokumente/6000004860_M_463.pdf](http://www.kfw.de/PDF/Download-Center/F%C3%B6rderprogramme-(Inlandsf%C3%B6rderung)/PDF-Dokumente/6000004860_M_463.pdf), zuletzt geprüft am 08.02.2023.
- Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N.; Born, R., 2015. Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut Wohnen und Umwelt. Darmstadt.
- Müller, A.; Koert, J., 2022. Ergebnisbroschüre E4Q. Einbindung erneuerbarer Energieträger in die Energieversorgung vernetzter Quartiere. Institut für Massivbau, TU Darmstadt, Institut Wohnen und Umwelt (IWU):
- nPro Energy GmbH, 2023. nPro. Planungstool für Gebäude & Quartiere. Online verfügbar unter <https://app.npro.energy/>.
- Schmidt, J.; Mühlhoff, J., 2010. Erneuerbare Energien 2020. Potenzialatlas Deutschland. Hg. v. Agentur für Erneuerbare Energien e.V.
- Schrade, J.; Erhorn, H.; Erhorn-Kluttig, H., 2020. Entwicklung eines klimaneutralen Versorgungskonzepts für das Bürgerhospital Stuttgart – Wissenschaftliches Hintergrunddokument (D2.1.1). erstellt im Rahmen des Forschungsvorhaben „Stadtquartier 2050“. Fraunhofer IBP. Stuttgart.
- Schrade, J.; Illner, M.; Erhorn-Kluttig, H.; Erhorn, H., 2022. Wege zur klimaneutralen Energieversorgung von Quartieren – ein Leitfaden (D3.2.1). Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. Stuttgart.
- Schrade, J.; Illner, M.; Erhorn-Kluttig, H.; Erhorn, H. (2023). Solutions for Climate-Neutral District Concepts. In: Sven Leonhardt, Tobias Nusser, Jürgen Görres, Sven Rosinger, Gerhard Stry-Hipp und Martin Eckhard (Hg.): Innovations and challenges of the energy transition in smart city districts: De Gruyter, S. 505–522.
- Statistische Ämter des Bundes und der Länder, 2011. Zensusdatenbank - Ergebnisse des Zensus 2011. Online verfügbar unter <https://ergebnisse2011.zensus2022.de/datenbank/online?operation=result&code=4000W-3021>.
- Wärmeplanungsgesetz (WPG), 2023. Entwurf eines Gesetzes für die Wärmeplanung und zur Dekarbonisierung der Wärmenetze.
- Winter, W.; Haslauer, T.; Obernberger, I., 2001. Untersuchungen der Gleichzeitigkeit in kleinen und mittleren Nahwärmenetzen - Teil 1 (Euroheat and Power) 53-57.
- Wirth, H. (2023). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE. Freiburg. Online verfügbar unter www.pv-fakten.de, zuletzt aktualisiert am 01.03.2023, zuletzt geprüft am 01.04.2023.