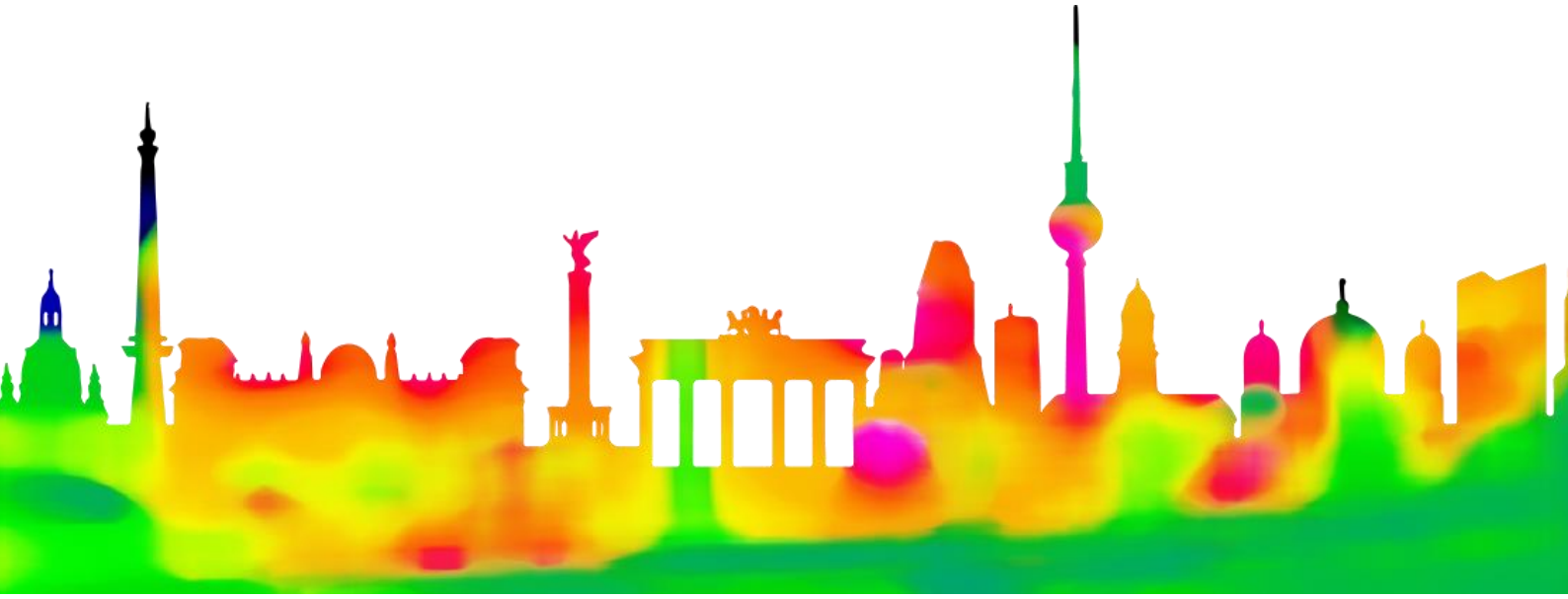
Urbane Wärmewende

Dunkelberg, Elisa, Alexander Deisböck, Bernd Hirschl, Tino Mitzinger, Johannes Röder, Steven Salecki, Pablo Thier, Timo Wassermann

Keimzellen für eine Quartiers-wärmeversorgung

Abwasserwärmenutzung durch Gebäude einer städtischen Wohnungsbaugesellschaft in einem Berliner Bestandsquartier

Arbeitsbericht Nr. 1



Impressum

Autor/innen:
Elisa Dunkelberg (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, IÖW), Alexander Deisböck (IÖW), Bernd Hirschl (IÖW), Tino Mitzinger (Universität Bremen), Johannes Röder (Universität Bremen), Steven Salecki (IÖW), Pablo Thier (Universität Bremen), Pablo Thier (Universität Bremen), Timo Wassermann (Universität Bremen)

Projektleitung:
Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)
Potsdamer Str. 105, 10785 Berlin
www.ioew.de

Kooperationspartner:
Land Berlin, vertreten durch Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz (SenUVK), Referat Klimaschutz und Klimaanpassung; Brückenstraße 6, 10179 Berlin
www.stadtentwicklung.berlin.de

Technische Universität Berlin, Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik, Straße des 17. Juni 135, 10623 Berlin
www.wip.tu-berlin.de

Universität Bremen, Fachgebiet Resiliente Energiesysteme, Enrique-Schmidt-Str. 7, 28359 Bremen
www.res.uni-bremen.de

Der vorliegende Bericht entstand im Forschungsprojekt „Urbane Wärmewende – Partizipative Transformation von gekoppelten Infrastrukturen mit dem Fokus auf die Wärmeversorgung am Beispiel Berlin“. Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) in der Förderinitiative „Nachhaltige Transformation urbaner Räume“ des Programms Sozial-ökologische Forschung (SÖF) gefördert. (Förderkennzeichen: 01UR1601A)

Für nähere Informationen zum Projekt: www.urbane-waermewende.de

Zitiervorschlag:
Dunkelberg, Elisa, Alexander Deisböck, Bernd Hirschl, , Tino Mitzinger, Johannes Röder, Steven Salecki, Pablo Thier, Timo Wassermann (2020): Keimzellen für eine Quartierswärmeversorgung. Abwasserwärmenutzung durch Gebäude einer städtischen Wohnungsbaugesellschaft in einem Berliner Bestandsquartier, Arbeitsbericht 1, Berlin.

Berlin, Juli 2020

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

FONA Sozial-ökologische Forschung BMBF

INSTITUT FÜR ÖKOLOGISCHE WIRTSCHAFTSFORSCHUNG

Berlin

Technische Universität Berlin

Universität Bremen

Zusammenfassung

Quartierskonzepte haben vor allem dort eine Umsetzungschance, wo es eine Keimzelle für Mitversorgungskonzepte gibt. Das Projekt Urbane Wärmewende versteht darunter ein größeres Gebäude oder einen Gebäudekomplex, der durch einen Akteur verwaltet wird und von dem aus eine Mitversorgung anderer Gebäude über ein Wärmenetz erfolgen kann. Keimzellen stellen einen Großteil des Wärmeverbrauchs im Quartier und/oder können ein Standort für eine Erzeugungsanlage sein. In Kombination mit einem lokalen Potenzial an erneuerbarer Wärme oder Abwärme kann an einem solchen Standort ein klimaschonendes Quartierswärmekonzept entstehen. Abwasser(wärme) stellt eine der wenigen nachhaltigen Wärmequellen dar, die in allen Städten über das ganze Jahr hinweg bereitstehen.

Der Bericht stellt die Ergebnisse der Entwicklung eines Quartierswärmekonzepts basierend auf Abwasserwärme für ein Berliner Altbauquartier vor. Die Ergebnisse der Simulation und ökonomischen und ökologischen Bewertung zeigen, dass eine Kombination einer Abwasserwärmepumpe mit einem größeren BHKW sowie mit PV-Anlagen mit Blick auf die CO_{2eq}-Emissionen und die CO_{2eq}-Vermeidung pro Euro günstig ist. Zudem trägt eine energetische Sanierung zu einer hohen CO_{2eq}-Vermeidung pro Euro bei. Für eine Kommune, die sich das Ziel gesetzt hat die städtischen CO_{2eq}-Emissionen zu reduzieren, ist es daher sinnvoll, sowohl die energetische Sanierung als auch die Nutzung von Abwasserwärme voranzubringen und zu unterstützten. Allerdings sind die Wärmegestehungskosten eines Versorgungssystems mit Abwasserwärmepumpe und BHKW auch bei Berücksichtigung des nationalen CO_2-Preises und der MAP-Förderung höher als die des aktuellen rein gasbasierten Wärmeversorgungssystems. Der CO_2-Preis und die bestehenden Förderungen sind wichtige Instrumente für die Umsetzung von Wärmeversorgungskonzepten mit Abwasserwärme. Sie reichen aber nicht aus, um eine breite Umsetzung solcher Wärmekonzepte zu erreichen. Eine weiterführende Förderung durch die Länder oder den Bund ist daher notwendig, um eine breite Umsetzung zu bezahlbaren Wärmepreisen zu ermöglichen.

Abstract

District heating concepts have a good chance for implementation if there is a nucleus: Larger buildings or a complex of buildings that is managed by an actor and from which other buildings can be supplied via a heating network. A nucleus in a district represents a large part of the heat consumption in the district and / or can be a location for a heat production plant. In combination with a local potential for renewable heat or waste heat, a climate-friendly district heating concept can be created. Waste water (heat) is one of the few sustainable heat sources that are available in all cities throughout the year.

The report presents the results of the development of a district heating concept based on waste water heat for an existing building district in Berlin. The results of the simulation and economic and ecological assessment show that a combination of a wastewater heat pump with a larger CHP unit and with PV systems is favourable with respect to CO_{2eq} emissions and CO_{2eq} avoidance per euro. In addition, an energetic renovation contributes to a high avoidance of CO_{2eq} per euro. For a municipality that has set itself the goal of reducing urban CO_{2eq} emissions, it therefore makes sense to support both the energetic renovation and the use of waste water heat. However, even if the national CO_2 price and MAP funding programme are taken into account, the heat production costs of a supply system with a waste water heat pump and a CHP unit are higher than those of the current purely gas-based heat supply system. The CO_2 price and the existing subsidies are important instruments for the implementation of sustainable heat supply concepts. However, they are not sufficient to achieve a broad implementation of heating concepts based on waste water heat. Further funding from the federal states or the federal government is therefore necessary to enable widespread implementation at affordable heating prices.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 1
2 Ausgangslage im Kiez ... 2
2.1 Relevante Akteure für die Wärmewende ... 3
3 Bestandsaufnahme ... 4
3.1 Vorgehensweise ... 5
3.2 Charakterisierung des Gebäudebestandes ... 9
3.2.1 Energetischer Zustand der Gebäude ... 10
3.2.2 Wärmebedarf im Gebiet ... 10
3.3 Sozialstruktur und Milieuschutz ... 11
3.4 Aktuelle Wärmeversorgung ... 12
4 Wärmeerzeugungspotenziale ... 12
4.1 Abwasserwärmepotenziale ... 12
4.2 Solarthermie und PV ... 14
4.3 Gewerbliche Abwärme ... 17
4.4 Biomasse ... 18
5 Entwicklungsoptionen für die Wärmeversorgung ... 19
5.1 Entwicklung des Wärmeverbrauchs ... 19
5.2 Entwicklung der Wärmeerzeugung ... 20
5.2.1 Vorgehen bei der Simulation ... 21
5.2.2 Vergleich der Wärmeerzeugungsoptionen ... 22
5.3 Ökonomische Bewertung ... 24
5.3.1 Vorgehen bei der ökonomischen Bewertung ... 24
5.3.2 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung ... 26
5.4 Ökologische Bewertung ... 28
5.4.1 Vorgehen bei der ökologischen Bewertung ... 28
5.4.2 Ergebnisse der ökologischen Bewertung ... 29
5.5 Resilienz-Bewertung ... 32
5.5.1 Vorgehen bei der Resilienz-Bewertung ... 32
5.5.2 Ergebnisse der Resilienz-Bewertung ... 33
6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen ... 36
7 Literaturverzeichnis ... 38
8 Anhang ... 42

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Lage des Untersuchungsgebietes Klausenerplatz-Kiez mit Baualter der Gebäude 2
Abb. 2.1: Öffentliche Gebäude und Gebäude kommunaler Wohnungsunternehmen 4
Abb. 3.1: Denkmalgeschützte Gebäude im Klausenerplatz-Kiez 9
Abb. 3.2: Denkmalgeschützte Gebäude im Klausenerplatz-Kiez 10
Abb. 4.1: Mögliche Blöcke für ein Wärmeversorgungskonzept mit Abwasserwärme..... 14
Abb. 4.2: Anzahl der potenziell für PV geeigneten, noch ungenutzten Dächer und kumulierte Summe der potenziellen Kollektorfläche 16
Abb. 5.1: Wärmemengen pro Technologie und Energieträger bei unterschiedlichen Sanierungsszenarien 23
Abb. 5.2: Wärmegestehungskosten verschiedener Wärmeversorgungsysteme..... 26
Abb. 5.3: Gesamtkosten (Annuitäten) verschiedener Wärmeversorgungsysteme..... 27
Abb. 5.4: CO_{2eq}-Emissionen verschiedener Wärmeversorgungsysteme..... 31
Abb. 5.5: CO_{2eq}-Vermeidung pro Euro verschiedener Wärmeversorgungsysteme 31
Abb. 5.6: Vergleich des Stirling-Index zur Bewertung der Diversität verschiedener Erzeugerszenarien unter Berücksichtigung der Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungsstand“ und „Vollsanierung“ 33
Abb. 5.7: Darstellung des Redundanz-Index der Erzeugerszenarien für den aktuellen Sanierungszustand und bei Vollsanierung 34
Abb. 5.8: Anteile der Wärmeerzeugungsmengen aus lose gekoppelten Anlagen in den Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungszustand“ und „Vollsanierung“..... 35

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Annahmen zu Vorlauf- und Rücklauftemperaturen in Abhängigkeit vom Baualter und Sanierungszustand der Gebäude 8
Tab. 2: Sozialstrukturdaten zum Gebiet Klausenerplatz..... 11
Tab. 3: Anzahl und kumulierte Summe der potenziellen Kollektorflächen für PV..... 15
Tab. 4: Anzahl und kumulierte Summe der potenziellen Kollektorflächen für Solarthermie..... 16
Tab. 5: Annahmen zu den Sanierungsszenarien..... 20
Tab. 6: Thermische Leistung der Wärmeerzeugungstechnologien bei aktuellem Sanierungszustand der Gebäude 22
Tab. 7: Thermische Leistung der Wärmeerzeugungstechnologien im Sanierungsszenario Vollsanierung 23
Tab. 8: CO_{2eq}-verschiedener Wärmeerzeugungsanlagen im Status quo und in 2030 30
Tab. 22: Angenommene Kalkulationszinssätze..... 42
Tab. 20: Brennstoffpreise..... 42
Tab. 21: Angenommene Preisänderungsraten..... 43
Tab. 23: Investitions- und Betriebskosten der bewerteten Wärme- und Stromerzeugungsanlagen44

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr
AfS	Amt für Statistik Berlin/Brandenburg
ALK	Automatisierten Liegenschaftskarte
BauGB	Baugesetzbuch
BEK	Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm
BHKW	Blockheizkraftwerk
BHKWgr	Blockheizkraftwerk groß
BHKWkl	Blockheizkraftwerk klein
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
B.&S.U.	Beratungs- und Service-Gesellschaft Umwelt mbH
BWB	Berliner Wasserbetriebe
CO_{2eq}	CO_2-Äquivalent
ct	Cent
GWh	Gigawattstunde
GWh_{el}	Gigawattstunde elektrisch
GWh_{th}	Gigawattstunde thermisch
GWP	Global Warming Potential
h	Stunde
IÖW	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung
ISE	Institut für Solare Energiesysteme
IWU	Deutsche Wohngebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt
kg	Kilogramm
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
kWh_{th}	Kilowattstunde thermisch
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
LCA	Life Cycle Assessment
LOR	Lebensweltlich orientierten Räume
LUP	Luftbild Umwelt Planung GmbH
m	Meter
m^2	Quadratmeter
Mio.	Millionen
MUGV	Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg

MW	Megawatt
MWh	Megawattstunde
MWh_{th}	Megawattstunde thermisch
NGF	Nettogrundfläche bzw. Nettogeschossfläche
NKI	Nationale Klimaschutzinitiative
PIR	Polyisocyanurat
PJ	Petajoule
PUR	Polyurethan
PV	Photovoltaik
SenUVK	Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz
SGB	Sozialgesetzbuch
SÖF	Sozial-ökologische Forschung
TRY	Testreferenzjahr
UBA	Umweltbundesamt
UNK	Unternehmensnetz-Klausenerplatz e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VGSD	Verband der Gründer und Selbständigen Deutschland e. V.
WLS	Wärmeleitstufe

1 Einleitung

Die Entwicklung des Wärmesektors ist aus Klimaschutzsicht weiterhin ernüchternd. Während Strom inzwischen zu über 35 Prozent aus Erneuerbaren Energien erzeugt wird, liegt der Anteil bei der Wärme bei nur etwa 14 Prozent (BMWi 2019). Der Rückgang des Gebäudeenergieverbrauchs stagnierte ebenfalls in den letzten 10 Jahren (Singhal und Stede 2019). Eine Zunahme des Anteils erneuerbarer Wärme und Abwärme ist erforderlich, um die Klimaschutzziele zu erreichen. Zugleich muss der Wärmeverbrauch durch energetische Sanierung des Gebäudebestandes weiter sinken. Für das Jahr 2012 bezifferte die Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050 den Endenergieverbrauch der Gebäude auf 158 PJ und damit auf nahezu 60 Prozent des gesamten Endenergiebedarfs in Berlin (PIK et al. 2014). Das auf diese Studie aufbauende Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm (BEK) formuliert eine Reihe von Maßnahmen, die zur Klimaneutralität beitragen sollen (Hirschl et al. 2015). Einige Maßnahmen adressieren den Wärmesektor. Im Bereich der Wärmewende bestehen jedoch weiterhin Unsicherheiten dahingehend, wie verschiedene Entwicklungsoptionen zu bewerten sind und wie eine breite Umsetzung erfolgreicher Ansätze erreicht werden kann.

Das durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt Urbane Wärmewende setzte an dieser Stelle an und untersuchte in der ersten Projektphase in drei Gebieten verschiedene Themenschwerpunkte rund um die Wärmewende in Städten.

Das Projekt verfolgte das Ziel klimaschonende und sozialverträgliche Konzepte zu identifizieren, welche gleichzeitig auch zu einem resilienteren Wärmesystem hinsichtlich der Versorgung der Endkunden mit Wärme führen. Neben konzeptionellen Arbeiten sollten auch Impulse für ihre Umsetzung gesetzt werden. Die drei Themenschwerpunkte waren

- Transformation der Fernwärme,
- Transformation der Wärmeversorgung in Netzrandgebieten und
- Keimzellen für innovative energetische Quartiers- und Wärmekonzepte.

Der Klausenerplatz-Kiez war eines von drei Gebieten, die im Projekt Urbane Wärmwende vertieft untersucht wurden. In diesem Beispielquartier ging es vor allem um die Frage, welche innovativen energetischen Quartiers- und Wärmekonzepte durch Keimzellen entstehen können. Unter Keimzellen für gebäudeübergreifende Wärmekonzepte versteht das Projektteam etwa größere Gebäudekomplexe, die durch einen Akteur verwaltet werden und die Impulse für die Quartiersentwicklung geben können. Sie stellen einen Großteil des Wärmeverbrauchs im Gebiet und/oder können ein Standort für eine Erzeugungsanlage sein. In Kombination mit einem lokalen Potenzial an erneuerbarer Wärme oder Abwärme kann an einem solchen Standort ein klimaschonendes Quartierswärmekonzept entstehen.

Im Charlottenburger Klausenerplatz-Kiez, ein typisches Altbau-Wohnquartier, sind die Gebäude des kommunalen Wohnungsunternehmens Gewobag Wohnungsbau-Aktiengesellschaft Berlin mit mehr als 50 Prozent der Wohngebäude im Kiez eine solche Keimzelle. Das Gebiet ist zugleich umrahmt von den Netzen des Fernwärmeverbundnetzes der Vattenfall Europe Wärme AG, sodass auch das Thema Transformation der Fernwärme beziehungsweise Ausbau der Fernwärme hier eine Rolle spielen kann.

Das Quartier Klausenerplatz wird im Norden durch den Spandauer Damm, im Osten durch die Schloßstraße, im Süden durch den Kaiserdamm sowie im Westen durch die Sophie-Charlotten-Straße begrenzt. Im Jahr 1963 wurde ein Teil des Gebietes (im Süden begrenzt durch die Knobelsdorffstraße) als Sanierungsgebiet ausgewiesen. Das im Jahr 2011 erstellte Integrierte Kommunale Klimaschutzkonzept bezieht sich ebenfalls auf diesen Zuschnitt (Land Berlin 2011). Analog hierzu wurde auch für diese Arbeit die Begrenzung durch die Knobelsdorffstraße gewählt (s. Abb. 1.1 . Dies ist zudem insofern sinnvoll, als dass die durch die Gewobag verwalteten Gebäude in diesem Teil des Quartiers liegen.

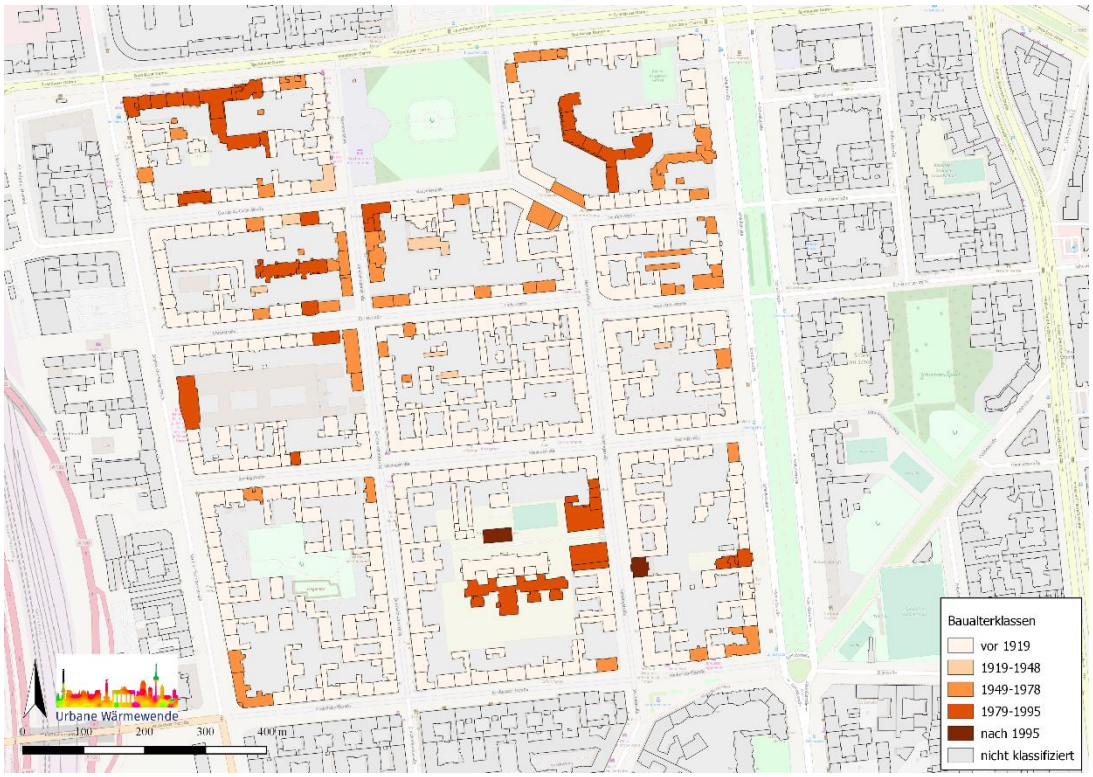


Abb. 1.1: Lage des Untersuchungsgebietes Klausenerplatz-Kiez mit Baualter der Gebäude
Quelle: IÖW, eigene Darstellung auf Basis von OpenStreetMap ©OpenStreetMap-Mitwirkende; www.openstreetmap.org/copyright

Um eine zukunftsfähige Wärmeversorgung planen zu können, bedarf es zunächst einer Bestandaufnahme und Potenzialabschätzung. Die Bestandaufnahme umfasst eine Charakterisierung des Gebäudebestandes inklusive einer Beschreibung des energetischen Zustandes der Gebäude, der derzeit genutzten Heizungsanlagen, der Eigentümerstruktur und der Zusammensetzung der Bewohner/innen (s. Kapitel 3) sowie zweitens eine Erhebung der vorhandenen Wärmeerzeugungspotenziale im Quartier (s. Kapitel 4). Anschließend werden die simulierten Wärmeversorgungskonzepte, die Ergebnisse der ökonomischen, ökologischen und der Resilienz-Bewertung beschrieben (s. Kapitel 5). Schlussfolgerungen und Empfehlungen, die sich aus den Ergebnissen ableiten lassen, runden den Bericht ab (s. Kapitel 6).

2 Ausgangslage im Kiez

Im Jahr 1963 wurde der Klausenerplatz-Kiez als Sanierungsgebiet ausgewiesen, woraufhin im Quartier bei Erhalt der Vorderhäuser die Blockinnenbereiche entkernt wurden (Land Berlin 2011). Die Sanierungen fanden im Jahr 1995 ihren Abschluss. Vier Jahre nach dem offiziellen Abschluss der Sanierungen gründete sich 1999 das Kiezbündnis Klausenerplatz e. V. aus einer Gruppe von engagierten Bürger/innen und ansässigen Gewerbetreibenden. Ziele der Vereinigung waren die Vernetzung der Anwohnenden und deren aktive Mitgestaltung des Gebiets zu Themen wie Wohnumfeld, Verkehr und Umweltschutz (Land Berlin 2011). 2008 gründete sich auf einer „Kiezkonferenz“ aus dem Anliegen, einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten, die Arbeitsgemeinschaft Ökokiez 2020.

Zunächst beinhaltete das gleichnamige Modellprojekt die Erstellung eines kommunalen Klimaschutzkonzeptes. Mit der Ausarbeitung des Integrierten kommunalen Klimaschutzkonzeptes wurde die Beratungs- und Service-Gesellschaft Umwelt mbH (B.&S.U.) beauftragt. Das im Jahr 2011 veröffentliche Konzept umfasste vorerst eine Energie- und CO_2 Bilanz sowie eine Potenzialanalyse zur CO_2-Minderung. Das Ergebnis war ein Maßnahmenkatalog, bestehend aus sieben Handlungsfeldern: Allgemeine Aufgaben, Energetische Sanierung, Nutzerverhalten, Klimaanpassung Gewerbe, Energieversorgung und Verkehr. Insgesamt sind diesen Handlungsfelder 42 konkrete Maßnahmen zugeordnet. Ferner wurden neun Schwerpunktmaßnahmen definiert, welche laut den Verfasser/innen eine öffentlichkeitswirksame und verhaltensändernde Funktion haben und innerhalb von drei Jahren umgesetzt werden sollen (Land Berlin 2011). Die Forderung nach der Stelle eines Klimaschutzmanagers wurde erfüllt.

Die zweite Phase des Projektes beinhaltete die gezielte Umsetzung ausgewählter Maßnahmen im Zeitraum 2014 bis 2017. Realisiert wurden kleinere Projekte mit unterschiedlichen Schwerpunkten. So wurde z. B. eine Ladesäule für die Elektro-Autos einer örtlichen Fahrschule installiert. Zum Thema Nutzerverhalten wurde die Aktion "Klimaschutz bei dir und mir" durchgeführt, indem die Kiezbewohner/innen kostenlose Energieberatungen in Anspruch nehmen konnten (O A).

Die städtische Wohnungsbaugesellschaft Gewobag Wohnungsbau-Aktiengesellschaft Berlin verwaltet 52 Prozent des gesamten Immobilienbestands im Klausenerplatz-Kiez. Die Mieter/innen werden durch die Gewobag regelmäßig zum Thema Energiesparen informiert. Die Gewobag investiert regelmäßig in die Modernisierung der Anlagentechnik. Aktuell werden einige Blöcke über Heizzentralen mit Arealnetzen versorgt, wobei Gaskessel als Technologie überwiegen und vereinzelt BHWK im Einsatz sind.

2.1 Relevante Akteure für die Wärmewende

Die Transformation der Wärmeversorgung in einem Quartier bedarf der Beteiligung und des Engagements unterschiedlicher Akteursgruppen, insbesondere der Gebäudeeigentümer/innen, der Energieversorgungsunternehmen, der Gewerbetreibenden und der Verwaltung. Zugleich betrifft eine Transformation der Wärmeversorgung, z. B. über eine energetische Gebäudesanierung und eine Umlegung der Kosten oder eine Änderung der Wärmeerzeugung und sich verändernde Wärmepreise, die Bewohner/innen im Kiez. Diese Akteursgruppen zusammen und ihre Interessen in Einklang zu bringen sind daher wichtige Aufgaben im Zuge der Entwicklung von Quartierskonzepten.

Die im Jahr 2013 gegründete Gewobag ED Energie- und Dienstleistungsgesellschaft mbH ist der Energiedienstleister der Gewobag, der für die Wärmeversorgung der zentralbeheizten Quartiere, den Anlagenbetrieb und den Energieeinkauf verantwortlich und somit ein zentraler Akteur für die Transformation der Wärmeversorgung im Klausenerplatz-Kiez ist. Die restlichen Gebäude gehören Privateigentümer/innen und Wohnungsunternehmen. Außerdem gibt es mehrere Wohneigentümergemeinschaften. Im Quartier befindet sich als kommunale Liegenschaft die Nehring- und die Peter-Jordan-Schule inklusive Bibliothek und zwei Sporthallen, sodass auch der Bezirk Berlin-Charlottenburg als Verwalter der öffentlichen Gebäude Entscheidungen in Bezug auf die Wärmeversorgung einzelner Gebäude treffen kann.

Die Gebäude der Gewobag – und prinzipiell auch die öffentlichen Gebäude – können Keimzellen für innovative Wärmekonzepte darstellen. Denn der kumulierte Wärmebedarf erlaubt es gebäudeübergreifende Konzepte umzusetzen und auf diese Weise Potenziale zu nutzen, die bei einer objektbezogenen Versorgung nicht wirtschaftlich rentabel und/oder nicht umfassend ausgeschöpft werden können. Günstig ist mit Blick auf die Umsetzung gebäudeübergreifender Wärmekonzepte auch, dass in einigen Blöcken bereits Heizzentralen und Areal-Wärmenetze bestehen. Seitens der Infrastrukturen erfüllt das Quartier somit viele Voraussetzungen für eine gebäudeübergreifende Wärmeversorgung.

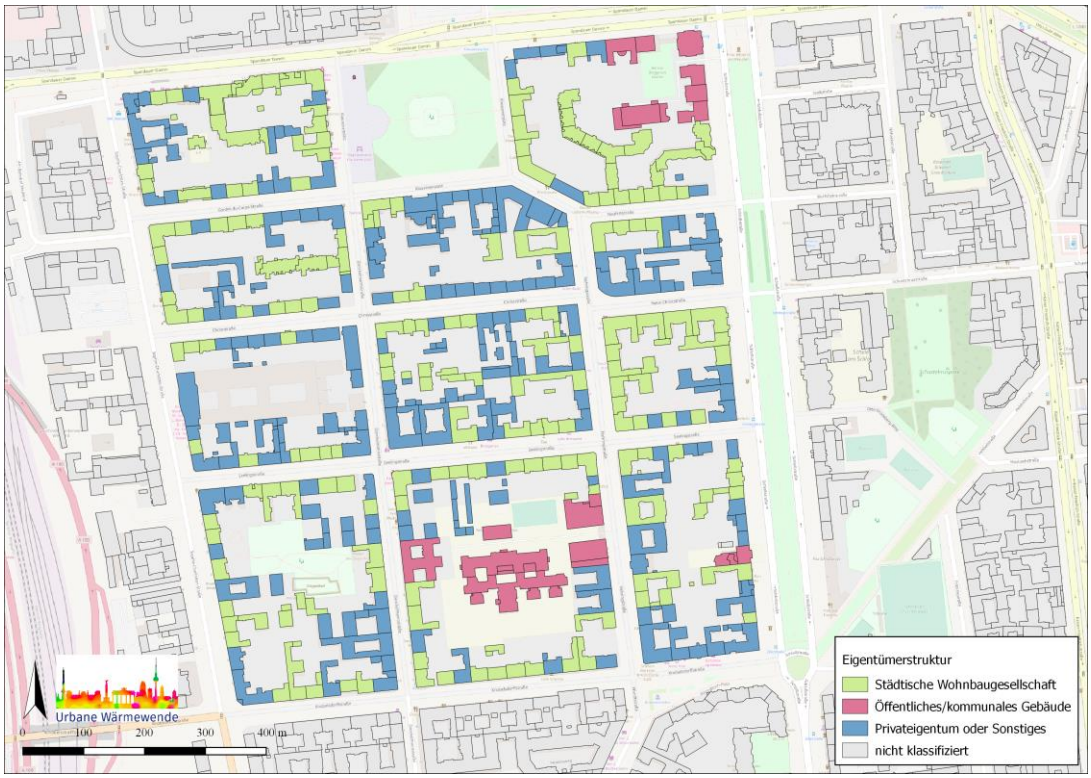


Abb. 2.1: Öffentliche Gebäude und Gebäude kommunaler Wohnungsunternehmen
Quelle: IÖW, eigene Darstellung auf Grundlage von AfS 2013, Informationen von Gewobag ED sowie von OpenStreetMap ©OpenStreetMap-Mitwirkende; www.openstreetmap.org/copyright

Der Klausenerplatz-Kiez zeichnet sich dadurch aus, dass seitens der Bürger/innen seit vielen Jahren verschiedene Prozesse rund um das Thema Klimaschutz im Kiez laufen. Das „Kiezbündnis Klausenerplatz“ bestand zunächst aus 30 Anwohner/innen und Gewerbetreibenden mit dem Ziel verschiedene Lebensbereiche in der Nachbarschaft mitgestalten zu können. Seit 2000 ist das Bündnis ein eingetragener Verein. In mehreren Bereichen wurden und werden Veranstaltungen, Initiativen und Aktionen durchgeführt. Das Projekt Ökokiez 2020 entstand ebenfalls aus einer Arbeitsgemeinschaft des Kiezbündnisses. Das Kiezbündnis und das Projekt Ökokiez 2020 stehen in Kontakt mit dem ansässigen Gewerbe. Verschiedene Unternehmer/innen im Gebiet sind seit vielen Jahren vernetzt. So zählt das „Unternehmensnetz Klausenerplatz e. V.“ (UNK), dessen Hauptaugenmerk auf gegenseitiger Werbung und gemeinsamen Aktionen, wie z. B. einen plastiktütenfreien Tag, liegt, mittlerweile 19 Vollmitglieder. Das Netzwerk ist Teil des „Verbands der Gründer und Selbstständigen Deutschland e. V.“ (VGSD).

Zukünftig könnten weitere Akteure im Zuge der Wärmewende an Bedeutung gewinnen. Dies sind beispielsweise die Berliner Wasserbetriebe (BWB) als potenzielle Abwasserwärmelieferanten. Außerdem liegen die Leitungen des Fernwärmeverbundnetzes der Vattenfall Berlin Wärme AG an das Gebiet an und versorgen einzelne Gebäude bereits mit Fernwärme. Der Fernwärmebetreiber ist somit ebenfalls ein Akteur, der in der zukünftigen Wärmeversorgung des Gebietes eine Rolle spielen kann.

3 Bestandsaufnahme

Um geeignete Wärmekonzepte zu entwickeln, bedarf es einer möglichst genauen Ermittlung der aktuellen und zukünftigen Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarfe. Hierfür müssen die Gebäude und ihr energetischer Zustand erfasst werden. Ziel war es zunächst die Gebäudestruktur im Klausenerplatz-

Kiez sowie den Wärmebedarf, bestehend aus Heizwärme- und Trinkwarmwasserbedarf, möglichst detailliert zu erfassen. Ein wichtiger Bestandteil dabei ist es, die Ergebnisse des durch das IÖW eingesetzten Gebäudemodells zur Berechnung der Wärmebedarfe mit Realverbräuchen abzugleichen, um sicherzustellen, dass der Status quo gut abgebildet wird und die Szenarien für zukünftige Wärmeversorgungskonzepte auf einer soliden Grundlage basieren.

3.1 Vorgehensweise

Die Berechnung der Heiz- und Trinkwarmwasserbedarfe orientiert sich an der IWU-Gebäudetypologie, die insgesamt 44 Gebäudetypen (Mehrfamilien-, Ein- und Zweifamilienhäuser) verschiedener Baualtersklassen enthält und für jeden Gebäudetyp mehrere Sanierungszustände unterscheidet. Für die Gebäudetypen und die Sanierungszustände gibt die IWU-Gebäudetypologie jeweils spezifische Heizwarmwasser- und Trinkwarmwasserbedarfe an. Für die Ermittlung dieser spezifischen Werte bedarf es diverser Informationen und Daten. Dies sind neben dem Gebäudetyp (Mehr- oder Einfamilienhaus) vor allem das Baualter und der energetische Zustand des Gebäudes. Um letztlich die kumulierten Wärmebedarfe für das Quartier hochzurechnen wird zudem als Input die beheizte Wohnfläche pro Gebäude benötigt. Die Projektmitarbeiter/innen nutzten mehrere Methoden und Kanäle zur Gewinnung der erforderlichen Daten und Informationen, die im Folgenden beschrieben sind.

1) Objektgenaue Daten aus 3D-Gebäudemodell

Im Zuge der Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050 wurden Gebäudedaten der Automatisierten Liegenschaftskarte (ALK) (Stand 2012) genutzt und unter Verwendung des 3D-Stadtmodells (CityGML) (Stand 2007) relevante Gebäudedaten für die Energiebedarfsberechnung kalkuliert. Dazu gehören für jedes Gebäude bzw. jeden Gebäudeabschnitt die Grundfläche, die Geschossanzahl, die Dachfläche, die Außenhüllfläche sowie das Gebäudevolumen mit und ohne Dach. Aus der Bruttogeschossfläche (Grundfläche multipliziert mit der Geschossanzahl, wobei Dachgeschosse mit dem Faktor 0,5 berücksichtigt werden) kann darauf aufbauend nach einem vereinfachten Verfahren die beheizte Wohnfläche durch Multiplikation mit dem Faktor 0,59 bei Mehrfamilienhäusern und 0,71 bei Ein- und Zweifamilienhäusern errechnet werden (BUE 2016). Bei Nichtwohngebäuden wird als Bezugsgröße die beheizte Nettogrundfläche bzw. Nettogeschossfläche (NGF) herangezogen, die in Übereinstimmung mit Reusswig et al. (2014) über den Faktor 0,77 aus der Bruttogeschossfläche berechnet wird. Die Gebäudedaten der ALK enthalten zudem Angaben zur Nutzung, wobei die Kategorien Wohnen, Nichtwohngebäude, Industrie und unbeheizte Gebäude unterschieden werden. Die Nichtwohngebäude werden in ihrer Art wie z. B.l Ladengebäude, Sporthalle, Öffentliche Verwaltung oder Fabrikgebäude charakterisiert, sodass dies in der Energiebedarfsberechnung berücksichtigt werden kann.

2) Ermittlung der objektgenauen Baujahre

Das Berliner Gebäudemodell, das im Rahmen der Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050 entwickelt wurde, enthält keine gebäudespezifischen Daten zum Gebäudealter. Diese wurden daher im Rahmen des Projekts Urbane Wärmewende erhoben. Die im Unterauftrag eingebundene Luftbild Umwelt Planung GmbH (LUP) stellte die jeweiligen Daten zum Gebäudealter objektgenau zur Verfügung, wobei auf die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise zurückgegriffen wurde.

In einem ersten Schritt wurden Informationen aus der Denkmaldatenbank vom Landesdenkmalamt Berlin und die zugehörige Denkmalliste (Stand 10.8.2017) genutzt. Mithilfe der räumlichen Informationen aus der Denkmalkarte (Geoportal Berlin) konnten je nach Vorhandensein von Baudenkmälern, Gebäuden in Denkmal-Ensembles und in Gesamtanlagen adressgenau ein Baualter zugeordnet werden. Bei Adressangaben in Denkmalbereichen wurde das Haupthaus genommen. In einem weiteren Schritt wurden Informationen aus aktuellen und historischen Luftbildern herangezogen, die über das Geoportal Berlin heruntergeladen bzw. bestellt worden sind. Hier lagen Bilder zwischen 1938 und 2017 vor. Vor ca. 1955 gab es nur die Bilder von 1938, die aufgrund ihrer schlechten Qualität für die Baualtersbestimmung kaum nutzbar waren. Ansonsten waren die Luftbild-Zeitreihen etwa vierjährlich aufgenommen. In

den Zeitbereichen zwischen ca. 2000 und 2017 konnten teilweise auch die historischen Bilder aus Google Earth zu Hilfe genommen werden, sowie einige Bilder aus den Jahren zuvor. Das Baualter wurde jeweils mit der Zeitspanne angegeben, mit dem Zeitpunkt, zu welchem das Gebäude in der Luftbild-Zeitreihe das erste Mal zu sehen war und dem Zeitpunkt, zu welchem es zuletzt nicht zu sehen war. Für weitere Berechnungen wurden Mittelwerte herangezogen.

Bei jenen Gebäuden, die nach beschriebenem Vorgehen noch ohne Baualter waren, wurden weitere Datensätze herangezogen. Beispielsweise wurden die Angaben zu den Baualtersklassen auf Ebene der ISU5 (Blöcke und Teilblöcke) vom Amt für Statistik Berlin/Brandenburg (AfS) genutzt. Da hier keine gebäudescharfen Angaben vorliegen, sondern nur die Anzahl der Gebäude pro Altersklasse (Klassenbreite >= 20 Jahre) in einem Block angegeben ist, wurde eine visuelle Abschätzung des möglichen Baualters mithilfe der 3D-Ansicht in Google-Earth und den Luftbild-Schrägaufnahmen aus bing durchgeführt. Hilfreich waren weitere Text- und Bildquellen zu baualtersspezifischen Merkmalen von Gebäuden (z.B. www.Baunetzwissen.de und Deutsche Wohngebäudetypologie des Instituts für Wohnen und Umwelt (IWU)). Flächentypen aus der Stadtstrukturkarte Berlins wurden außerdem zur Unterstützung herangezogen (Geoportal Berlin). Schließlich blieben kleinere Gebäude, die meist in Hinterhöfen schlecht einsehbar gelegen sind, ohne Baualtersangabe. Hier wurde, je nach Plausibilität, das Baualter des Haupthauses oder von in der Nähe befindlichen großen Gebäuden mit gesicherten Baualtern bzw. die Spanne des Denkmalbereich-Alters zugewiesen.

3) Ermittlung des energetischen Gebäudezustands

Dem Projektteam wurden Energieausweise zu den Gebäuden der städtischen Wohnungsbaugesellschaften überlassen, sodass der energetische Zustand sowie Art und Baualter der Heizungsanlage für einige Gebäude im Gebäudemodell genau festgelegt werden konnte. Es erfolgte zudem eine Befragung der weiteren Gebäudeeigentümer/innen. Der Fragebogen zur Abfrage der gebäudespezifischen Daten wurde postalisch versandt, zudem konnte er online ausgefüllt werden. Die Ergebnisse des zahlenmäßig sehr überschaubaren Rücklaufs wurden in das Gebäudemodell übernommen. Da nicht zu allen Gebäuden Informationen zum energetischen Zustand von den Eigentümer/innen bereitgestellt wurden, erfolgte eine Begehung des Quartiers. Anhand äußerlich erkennbarer oder spürbarer Eigenschaften (neue Fenster, Kanten durch Dämmungen, Abklopfen der Fassade) wurden die Gebäude in die Kategorien unsaniert, teilsaniert und vollsaniert eingeteilt. Mit dieser Methode gehen Unsicherheiten einher. Es ist zwar relativ leicht zu erkennen, wenn an alten Gebäuden aus den Gründerzeiten noch keine Fassadensanierungen erfolgt sind. Wenn die Fassaden jedoch saniert wurden, so ist auf Basis einer Begehung häufig nicht mit Sicherheit zu sagen, ob eine Dämmung der Fassade vorliegt. Der Zustand der Dächer, Keller und Außenwände der Hinterhäuser und Seitenflügel kann meist nicht erhoben werden, da diese Bauteile nicht zugänglich sind. Die Begehung diente zudem dazu die Art der Nichtwohngebäude genauer zu beschreiben. Ein Abgleich der Einschätzung aus der Begehung war für einige Gebäude anhand der Energieausweisdaten möglich.

4) Berechnung der Wärmebedarfe und Trinkwarmwasserbedarfe mit IWU-Gebäudetypologie

Die Abschätzung der Endenergiebedarfe für Heizwärme und Trinkwarmwasser der Wohngebäude orientiert sich an den vom IWU im Zuge des TABULA-Projektes ermittelten Bedarfsdaten zu insgesamt 44 Wohngebäudetypen und -subtypen (IWU 2015). Es erfolgte eine Anpassung der Werte nach einem Abgleich der Werte mit den witterungsbereinigten Fernwärmeabsatzdaten aus Untersuchungen zu einem Berliner Stadtteil mit einem umfangreichen Gebäudebestand (Dunkelberg et al. 2020).

Die IWU-Gebäudetypen beziehen sich auf unterschiedliche Baualtersklassen und Gebäudetypen. Das IWU stellt für diese Gebäudetypen Daten für Heizwärme- und Warmwasserbedarfe zur Verfügung. Der Heizwärmebedarf wird vor allem durch die Lage der Gebäude, die Geometrie und Größe sowie die Baumaterialien bestimmt. Die durch das IWU (2015) bereitgestellte Datengrundlage enthält neben den Angaben zu den unsanierten Wohngebäuden, Werte für zwei Sanierungszustände mit unterschiedlicher

Sanierungstiefe. Die Endenergie- und Heizwärmebedarfsdaten basieren nicht auf realen Verbrauchsdaten der Bewohner/innen, sondern sind theoretische, auf festgelegten U-Werten basierende Werte. Das IWU stellt allerdings für alle Gebäudetypen und Sanierungszustände Werte für die Endenergie zur Verfügung, die eine Korrektur auf das Niveau von Verbrauchswerten enthalten. Dabei wird der nach Standard-Randbedingungen berechnete Energiebedarf durch Anwendung eines pauschalen Faktors an das typische Verbrauchsniveau angepasst (IWU 2015).

Bei der Modellierung der Wärmeversorgung im Rahmen des Projekts Urbane Wärmewende verläuft die Schnittstelle zwischen dem Gebäudemodell und der Simulation der Wärmeerzeugung an der Gebäudegrenze. Um die Heizenergiebedarfe abzuschätzen müssen daher die Wärmeverluste im Gebäude berücksichtigt werden. Die Wirkungsgrade bei der Wärmeerzeugung sowie mögliche Verluste von Wärmenetzen liegen außerhalb des Gebäudemodells. In den durch das IWU angegebenen Endenergiebedarfen sind die Wärmeverluste der Erzeuger inbegriffen. Mit den angegebenen Energieaufwandszahlen für die Wärmeversorgungssysteme können die Erzeugungsverluste und damit die Wärmeverluste für die Gebäudetypen abgeschätzt und herausgerechnet werden. Die sich daraus ergebenden Werte für Heizwärme und Trinkwarmwasser fanden zunächst Eingang in die Berechnungen. Nach einem Abgleich der Heizwärme- und Trinkwarmwasserverbräuche mit witterungsbereinigten Realverbräuchen des Gebäudebestandes des vergleichbaren Stadtteil Nord-Neukölln erfolgte eine weitere Anpassung der Werte nach unten (s. Dunkelberg et al. 2020).

Die beiden Sanierungszustände, die die IWU-Gebäudetypologie bereitstellt, decken die vorzufindenden Sanierungszustände der Bestandsgebäude nicht hinreichend ab, da teilweise nur einzelne Bauteile gedämmt sind. Aus diesem Grund wurden mit dem Sanierungskonfigurator des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) Werte für die prozentuale Reduktion des Endenergiebedarfs für weitere Sanierungszustände der IWU-Referenzgebäude berechnet. Die Berechnungen dieses Tools erfolgen nach DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10 und haben einen modellhaften Charakter, der für diese Zwecke hinreichend ist. Die auf Basis des Sanierungskonfigurators berechnete prozentuale Reduktion wurde anschließend auf die Werte angewandt, die mit dem IWU-Tool berechnet wurden.

Die IWU-Gebäudetypologie enthält keine hinreichenden Angaben zu Nichtwohngebäuden, weshalb auf eine veröffentlichte Studie des Umweltbundesamtes (UBA) aus dem Jahr 2016 zurückgegriffen wird (Bürger et al. 2016). In dieser Studie werden sechs Nichtwohngebäudetypen mit teils mehren Baujahren und jeweils zwei Sanierungszuständen unterschiedlicher Sanierungstiefe (vollsaniert und vollsaniert plus) aufgeführt. Neben dem Heizenergiebedarf ist in der Studie ein für den jeweiligen Nichtwohngebäudetyp typischer Warmwasserbedarf ausgewiesen. Die beiden Sanierungszustände werden ergänzt um eine Vollsanierung nach aktuellem Standard (Reduktion um 50 % des Wertes im unsanierten Zustand) sowie die Sanierung von Fenstern, Dach/Oberster Geschossdecke und Kellerdeckte (Reduktion um 30 % des Wertes im unsanierten Zustand).

Im Gebäudemodell werden die Gebäude im Untersuchungsgebiet anhand der Informationen zu dem jeweiligen Baujahr des Gebäudes, der Anzahl der Geschosse und der beheizten Wohnfläche den IWU-Gebäudetypen zugeordnet. Im Durchschnitt über alle Gebäude im Untersuchungsgebiet liegt der spezifische Heizwärmebedarf nach der Anpassung bei 139 kWh/m^{2}a.

Für die Wohngebäude wird bei Warmwasser für den Status quo von einem Endenergiebedarf (inklusive der Verluste im Gebäude aber ohne die Erzeugungsverluste) von 35 kWh/m^{2}a ausgegangen und für sanierte Gebäude von 25 kWh/m^{2}a. Im Zuge von Sanierungen kann eine Reduktion der Trinkwarmwasserbedarfe durch eine Verminderung der Zirkulationsverluste erzielt werden, weshalb daraufhin von geringeren Werten ausgegangen wird. Im Durchschnitt über alle Gebäude im Untersuchungsgebiet liegt der spezifische Trinkwarmwasserbedarf bei 27 kWh/m^{2}a.

5) Abgleich der errechneten Werte mit den Realverbräuchen

Ein Abgleich der berechneten Werte mit den Realverbräuchen war teilweise auf Ebene der Einzelgebäude und teilweise auf Blockebene möglich. Energieausweise standen für die Gebäude der städtischen Wohnungsbaugesellschaft zur Verfügung. Diese enthalten neben dem Energieverbrauch Informationen zur beheizten Fläche, zum Sanierungszustand der Gebäude und zur Art und Baujahr der Heizung. Zudem stellte die städtische Wohnungsbaugesellschaft Daten zu den Heizzentralen wie Alter der Kessel, Brennstoffverbräuche und Wirkungsgrade zur Verfügung. Zuletzt lagen auf Blockebene Daten zu den Verbräuchen an Fernwärme und Gas vom Fernwärmebetreiber und der GASAG AG vor.

6) Berechnung der Jahresverbrauchsprofile für Heizwärme und Trinkwarmwasser

Für die Simulation des Wärmeverbrauchs und der Wärmeerzeugung über das Jahr, bedarf es Jahresverbrauchsprofile mit mindestens stündlicher Auflösung. Als Grundlage für Verbrauchsprofile, die durch die BLS Energieplan GmbH erstellt wurden, dient der Temperaturverlauf eines Jahres mit mittlerem Witterungsverhältnis der Region Potsdam basierend auf den Testreferenzjahren (TRY)-Daten des Deutschen Wetterdienstes. Der Modulationsgrad der Heizlast wird als linear ansteigend zwischen der Heizgrenztemperatur und der Normaußentemperatur angenommen. Über die Grädigkeit von Außentemperatur zu Innentemperatur wird für jede Stunde des Testreferenzjahres der Heizwärmebedarf bestimmt. Im Zeitraum von Ende April bis Ende September wird bei dauerhaftem Überschreiten der Heizgrenztemperatur die Heizwärmebereitstellung eingestellt. Die Kurven wurden als relative Jahresverbrauchsprofile auf die gebäudespezifischen Wärmebedarfe aus dem Gebäudemodell angewandt.

7) Verteilung von Heizkörpern und von Vorlauf- und Rücklauftemperaturen im Heizkreislauf

Für die Modellierung sind die Art der Heizkörper sowie die Vor- und Rücklauftemperaturen im Heizkreis wichtige Inputparameter. Hierzu müssen Annahmen getroffen werden. Bei der Art der Heizkörper handelt es sich bei Bestandsgebäuden fast ausschließlich um Radiatoren, für die ein Heizkörperexponent von 1,3 angenommen wird. Bei Neubau und Vorlauftemperaturen im Heizkreis von weniger als 60 °C kann davon ausgegangen werden, dass Fußbodenheizungen mit einem Heizkörperexponenten von 1,1 vorliegen (vgl. Recknagel et al. 2010). Die Vor- und Rücklauftemperaturen im Raumheizsystem hängen vom energetischen Zustand des Gebäudes und der Art des Heizkörpers ab. Jede Heizfläche kühlt die Vorlauftemperatur ab wenn Wärme abgegeben wird, wobei die Rücklauftemperatur umso geringer ist je besser der Durchfluss durch die Heizfläche (unter Berücksichtigung der Bauweise) (UBA 2018). Die Vor- und Rücklauftemperaturen werden auf Grundlage des Baualters des Gebäudes sowie dessen Sanierungszustand angenommen (vgl. UBA 2018; Recknagel et al. 2010).

Tab. 1: Annahmen zu Vorlauf- und Rücklauftemperaturen in Abhängigkeit vom Baualter und Sanierungszustand der Gebäude
Quelle: Eigene Annahmen basierend auf UBA (2018)

Baualter	unsaniert		teilsaniert		vollsaniert	
	VL °C	RL °C	VL °C	RL °C	VL °C	RL °C
Vor 1968	90	70	70	50	60	45
1968-1994	70	50	70	50	60	45
1995-2001	60	45	60	45	60	45
Nach 2001	45	35	45	35	45	35

Für denkmalgeschützte Gebäude bedeutet dies, dass es für eine Absenkung der Vorlauftemperaturen auf 60 °C Hemmnisse gibt, da diese meist nur bei einer kompletten Sanierung der Gebäudehülle inklusive eines Fenstertauschs sowie eines Austauschs der Radiatoren erfolgen kann.

3.2 Charakterisierung des Gebäudebestandes

Das zur Charakterisierung des Gebäudebestandes verwendete 3D-Stadtmodell (CityGML) beschreibt für den Klausenerplatz-Kiez insgesamt 560 Gebäude/-teile bezüglich unterschiedlicher Eigenschaften (u.a. Grundfläche, Geschossanzahl, Dachfläche, Außenhüllfläche sowie Gebäudevolumen mit und ohne Dach). Es enthält zudem Angaben zum Gebäudetyp und unterscheidet dabei die Kategorien Wohnen, Nichtwohngebäude, Industrie und unbeheizt. In die Kategorie Wohnen fallen 76 % der Gebäude/-teile, in die Kategorie Nichtwohngebäude und Industrie 16 % und in die Kategorie unbeheizte Gebäude 7 %. Bezogen auf die beheizte (Wohn-)Fläche entfallen 86 % auf die Kategorie Wohnen.

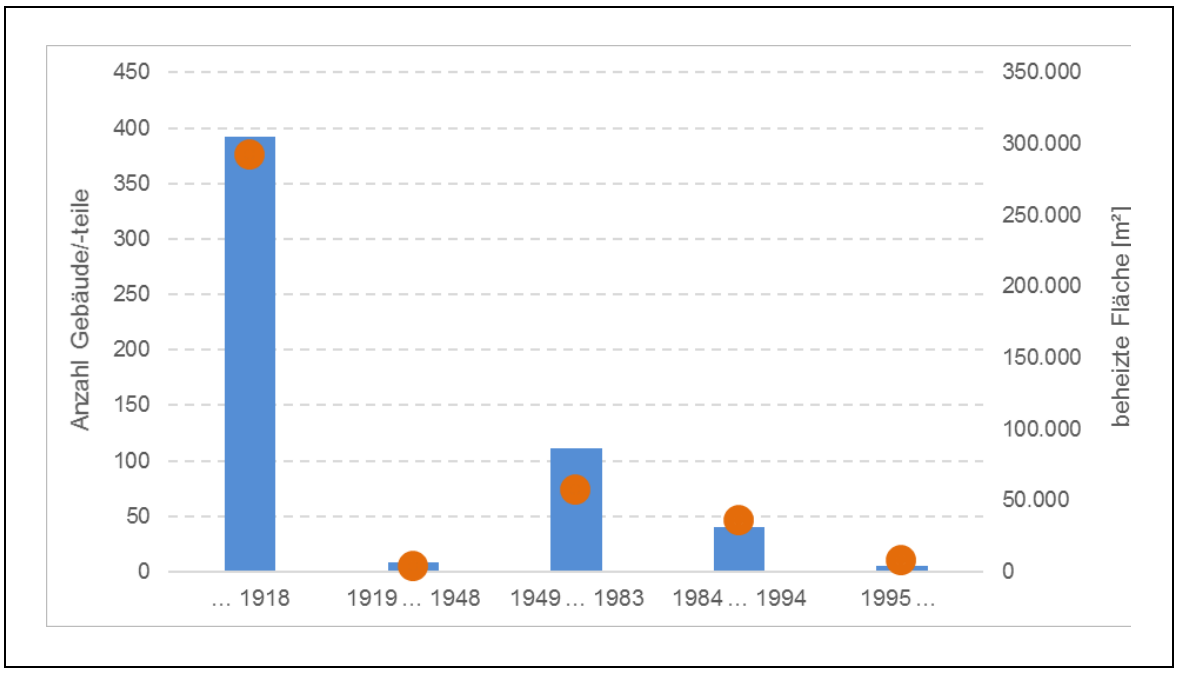


Abb. 3.1: Denkmalgeschützte Gebäude im Klausenerplatz-Kiez
Quelle: IÖW, eigene Darstellung auf Basis der Denkmalliste Berlin 2017 und der OpenStreetMap ©OpenStreetMap-Mitwirkende; www.openstreetmap.org/copyright

Ein Großteil der Wohn- und Nichtwohngebäude wurden vor 1918 in der Gründerzeit um die Jahrhundertwende errichtet (vgl. Abb. 3.1). In den Nachkriegszeiten, den 60er, 70er und 80er Jahren erfolgte ein recht kontinuierlicher Zubau, der nach 2000 nahezu zum Erliegen kam.

Größere Nichtwohngebäude im Klausenerplatz-Kiez sind zwei Gewerbehöfe, der GSG-Hof Sophie-Charlottenstraße und die Engelhardt Höfe, die Nehring-Grundschule mit Bibliothek und Sporthalle, kirchliche Einrichtungen und das Museum Berggruen. Es handelt sich bei den Wohngebäuden ausschließlich um Mehrfamilienhäuser. Insgesamt 11 Prozent aller Gebäude/-teile sind denkmalgeschützt gemäß der Berliner Denkmalliste (Baudenkmal, Stand 10.8.2017). Zählt man Gebäude innerhalb von Denkmalbereichen (Ensemble-Denkmalschutz) mit, beträgt der Anteil 55 Prozent (vgl. Abb. 3.2).

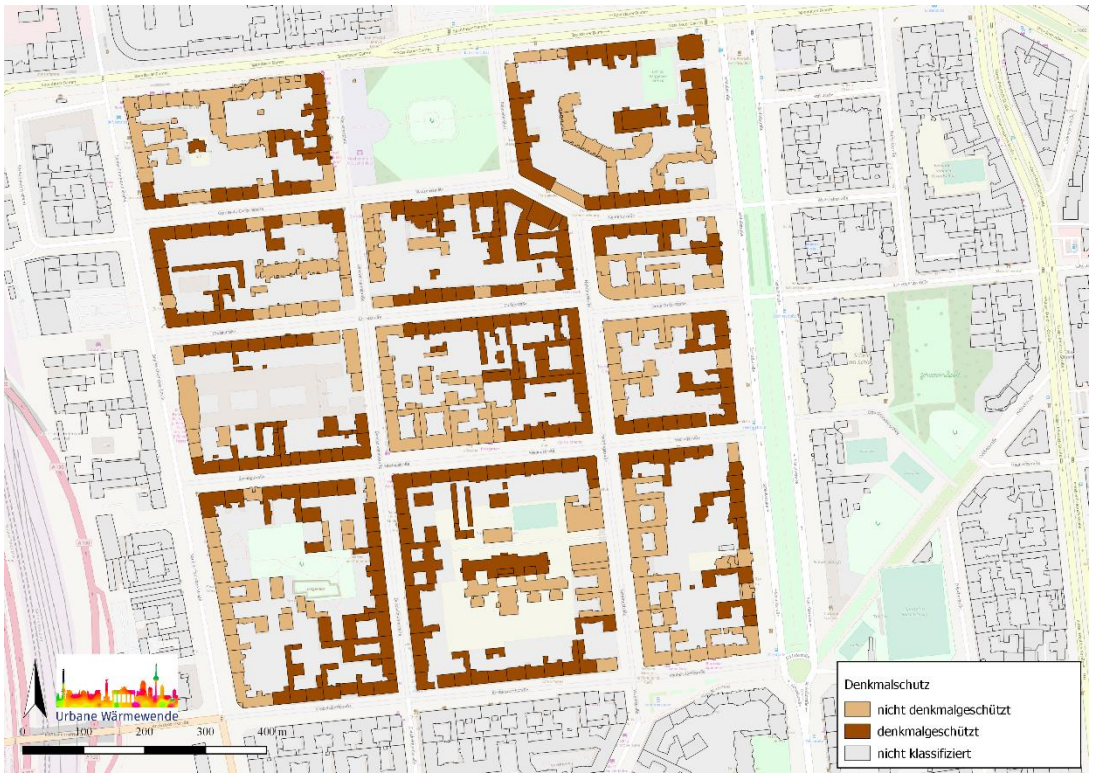


Abb. 3.2: Denkmalgeschützte Gebäude im Klausenerplatz-Kiez
Quelle: IÖW, eigene Darstellung auf Basis der Denkmalliste Berlin 2017 und der OpenStreet-Map ©OpenStreetMap-Mitwirkende; www.openstreetmap.org/copyright

3.2.1 Energetischer Zustand der Gebäude

Der Sanierungszustand wurde seitens des Projektteams auf Grundlage von Energieausweisen, durch Begehungen sowie im Austausch mit einzelnen Klein-Eigentümer/innen eingeschätzt. Zu den Gebäuden der städtischen Wohnungsbaugesellschaft liegen Energieausweise vor, aus denen der Sanierungszustand erkennbar ist. Da im Rahmen einer Begehung in der Regel nur der Zustand der Fassade und der Fenster beurteilt werden kann, sind für die Maßnahmen Dämmung der Kellerdecke/des Fußbodens und der obersten Geschossdecke/des Daches Schätzungen eingegangen. Eine mögliche Modernisierung des Heizungs- und Verteilsystems ging nicht in die Bewertung ein. Nach dem aktuellen Erfahrungsstand ist der Großteil der Gebäude unsaniert (> 85 %). Die Heizungsanlagen stammen teilweise aus den 90er Jahren, sodass hier Austauschbedarf besteht.

Aufgrund des hohen Anteils an denkmalgeschützten Gebäuden erscheint es unwahrscheinlich, dass eine umfassende und ambitionierte Dämmung der Fassaden erfolgen wird. Es ist wahrscheinlich, dass das Gebiet als soziales Erhaltungsgebiet (Milieuschutzgebiet) festgelegt wird (LPG 2020). Dies würde mit Restriktionen für ambitionierte Sanierungen einhergehen (siehe Kapitel 3.3).

3.2.2 Wärmebedarf im Gebiet

Der mit dem Gebäudemodell berechnete Wärmebedarf, bestehend aus dem Heizwärme- und dem Trinkwarmwasserbedarf, im Klausenerplatz-Kiez beträgt 68 GWh (exkl. der Erzeugungs- und Netzverluste). Der Wert bezieht sich auf den energetischen Zustand der Gebäude im Jahr 2018. Eine Validierung ist über einen Abgleich mit den durch die GASAG AG und die Vattenfall Wärme Berlin AG bereit gestellten Gas- und Fernwärmeabsätze und den Daten zu den Heizzentralen und Arealnetzen möglich.

Der Gasverbrauch lag im Jahr 2016 bei 62,5 GWh, wobei im Quartier ein Blockheizkraftwerk (BHKW) betrieben wird und ein Teil des Gasverbrauchs somit auf die Strombereitstellung entfällt. Der Fernwärmeabsatz lag bei etwa 7,3 GWh (beide Werte sind witterungsbereinigt). Der mit dem Gebäudemodell berechnete Wert weicht mit 3 Prozent nur geringfügig von dem Gesamtwert ab, sodass die Werte den tatsächlichen Wärmeverbrauch gut abbilden. Der Abgleich mit den Heizzentralen ergibt nach Witterungsbereinigung und Berücksichtigung von Verlusten von 10 Prozent eine Abweichung von 4 Prozent. Insgesamt stellen die Heizzentralen mehr als 60 % der im Quartier verbrauchten Wärme bereit. Auf das Einzelgebäude bezogen sind dennoch (auch größere) Abweichungen möglich, da es sich um eine modellbasierte Berechnung handelt, in die diverse Annahmen eingehen. Auf Ebene der einzelnen Heizzentralen liegen die Abweichungen mehrheitlich bei wenigen Prozentpunkten und bei mehr als 90 % der Heizzentralen bei unter 30 Prozent. Bei drei von 19 Heizzentralen treten größeren Abweichungen auf, die auf Differenzen in den berechneten und tatsächlich mit Wärme versorgten Flächen zurückgehen. Die Untersuchungen konzentrierten sich im weiteren Projektverlauf auf einen Block im nördlichen Teil des Quartiers, für den die Abweichungen sehr gering waren (für das Jahr 2015: 0 Prozent; für das Jahr 2016: 8 Prozent nach Witterungsbereinigung). Daher wurde die Prüfung der Abweichungen in den Flächen nicht vertieft. Es ist wahrscheinlich, dass sie aus einer fehlerhaften Zuordnung einzelner Gebäude zu den Heizzentralen resultieren, die teils eine blockübergreifende Versorgung bereitstellen.

3.3 Sozialstruktur und Milieuschutz

Aus dem Zensus 2011 liegen Daten zur Einwohnerzahl vor. Im Klausenerplatz-Kiez wohnen demzufolge 8.451 Personen im Untersuchungsgebiet. Der Klausenerplatz-Kiez – wie hier definiert – ist Teil des Planungsraumes Klausenerplatz, der etwas größer ist als der im Projekt Urbane Wärmewende gewählte Bezugsraum. Für die Ebene der Planungsräume liegen Ergebnisse aus dem regelmäßigen „Monitoring Soziale Stadtentwicklung“ der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen vor. Die Einwohnerzahl liegt dem aktuellsten Bericht zu folge im Planungsraum bei 10.655 Personen, der Klausenerplatz-Kiez stellt entsprechend 80 Prozent der Einwohner/innen im Planungsraum. Daten zur Sozialstruktur zu den einzelnen Lebensweltlich orientierten Räumen (LOR) lassen sich aus dem Sozialstrukturatlas Berlin sowie aus dem Monitoring Soziale Stadtentwicklung ziehen (GsKA 2017). Im Vergleich zu Gesamtberlin liegen der Anteil an Arbeitslosen und Personen, die Transferleistungen nach Sozialgesetzbuch (SGB) II und XII beziehen, etwas höher als im Durchschnitt über alle LOR des Stadtgebiets (s. Tab. 2). Auffällig hoch ist der Indikator Alternsarmut, der deutlich über dem Berliner Durchschnitt liegt. Das Quartier ist ein von Migration geprägter Raum. Der Anteil an Anwohner/innen mit Migrationshintergrund liegt mit 47,9 Prozent deutlich über dem Durchschnittswert aller LOR (30,8 Prozent).

Tab. 2: Sozialstrukturdaten zum Gebiet Klausenerplatz
Quelle: Eigene Darstellung der Werte zum LOR Klausenerplatz und zum Mittelwert über alle LOR Berlins auf Basis des Sozialstrukturatlas (GsKA 2017)

Kategorie	LOR Klausenerplatz	Berlin Ø
Anteil Arbeitslose (SGB II und III)	7,2	6,2
Jugendarbeitslosigkeit [%]	3,1	3,2
Städtische Wohnungen [%]	44,4	14,9
Wohnräume pro Einwohner	1,6	1,8
Altersarmut [%]	17,1	5,9
Einwohner mit Migrationshintergrund [%]	47,9	30,8

Die Zahlen des Sozialstrukturatlas lassen vermuten, dass die durchschnittlichen Haushaltseinkommen in dem Gebiet vergleichsweise gering sind. Demgegenüber steht ein überdurchschnittlich hoher Anteil an städtischen Wohnungen. Bei den anderen im Rahmen des Monitorings erfassten Indizes und Indikatoren entsprechen die Werte im Klausenerplatz in etwa dem Berliner Durchschnitt.

Im Jahr 2019 fand eine vertiefende Untersuchung für den Erlass einer sozialen Erhaltungsverordnung gemäß § 172 Abs. 1 S. 1 Nr. 2 Baugesetzbuch (BauGB) statt (Milieuschutz) (LPG 2020). Dieses Instrument dient dem Erhalt der Bevölkerungszusammensetzung. Es ist im BauGB festgeschrieben und ermöglicht es Gemeinden in einzelnen Gebieten zur Erhaltung der städtebaulichen Eigenart des Gebiets, der Zusammensetzung der Wohnbevölkerung oder bei Umstrukturierungen Maßnahmen an Gebäuden oder auch Nutzungsänderungen genehmigungspflichtig zu machen (§172 BauGB – Erhaltung baulicher Anlagen und der Eigenart von Gebieten (Erhaltungssatzung)).

Im Ergebnis der vertiefenden Untersuchung wird die Empfehlung formuliert, den Klausenerplatz im Sinne des Untersuchungsgebiets des Projekts Urbane Wärmewende als soziales Erhaltungsgebiet (Milieuschutzgebiet) zu behandeln (LPG 2020). In den Milieuschutzgebieten gelten besondere Sanierungshemmnisse. Eine Fassadensanierung wird Milieuschutzgebieten beispielsweise nur bei einem Schaden von mindestens 10 Prozent bezogen auf die Gesamtfläche der Fassade genehmigt. Energetische Mängel allein reichen zur Modernisierung einer Fassade nicht aus. Die neue Fassade soll zudem einem U-Wert von maximal 0,24 nach Energieeinsparverordnung (EnEV) entsprechen. Ambitionierte Maßnahmen sind in Milieuschutzgebieten daher kaum zu erwarten.

3.4 Aktuelle Wärmeversorgung

Die Wärmeerzeugung im Klausenerplatz-Kiez basiert aktuell vornehmlich auf Erdgas. Zum Einsatz kommen Gas-Niedertemperaturkessel, Gasetagenheizungen, größere Heizzentralen und ein BHKW (LPG 2020). Die Heizungsanlagen stammen teilweise aus den 90er Jahren, sodass hier dringender Austauschbedarf besteht. Den Werten der GASAG AG zufolge betrug der Gasverbrauch im Jahr 2016 im gesamten Quartier 57,5 GWh. Nach Witterungsbereinigung basierend auf den Gradtagzahlen für die Wetterstation Berlin-Tempelhof und das Jahr 2016 beläuft sich der Gasverbrauch auf 62,5 GWh (vgl. IWU 2017). Das Gebiet ist umrahmt von den Netzen des Fernwärmeverbundnetzes. Im nordwestlichen Teil des Gebietes sind einige Gebäude an das Fernwärme-Verbundnetz angebunden, zudem bezieht die Schule im Süden des Gebietes Fernwärme. Der Fernwärmeabsatz lag 2016 insgesamt bei etwa 7,3 GWh (witterungsbereinigt). In geringen Mengen wird im Quartier Heizöl eingesetzt.

4 Wärmeerzeugungspotenziale

Die in diesem Kapitel vorgestellten Wärmeerzeugungspotenziale beziehen sich im Wesentlichen auf erneuerbare Wärme- und Abwärmequellen, die im Quartier zur Verfügung stehen. Die meisten Technologien zur Nutzung dieser Wärmequellen stellen Niedertemperaturwärme bereit. Wärmequellen, die im städtischen Raum grundsätzlich zur Verfügung stehen, sind gewerbliche Abwärme, Solarthermie, Abwasserwärme, Flusswasserwärme, oberflächennahe und tiefe Geothermie sowie in sehr geringem Umfang Biomasse. Als Technologien, die externe Energiequellen nutzen, sind BHKW, betrieben mit Gas, Biomethan oder Biomasse, sowie Power-to-Heat-Anlagen zu nennen. Außerdem besteht die Möglichkeit die vorhandenen Dach- und Freiflächen für Photovoltaik (PV) zu nutzen.

4.1 Abwasserwärmepotenziale

Abwasserwärme weist ganzjährig Temperaturen zwischen 10 und 24 °C auf und stellt somit eine potenziell geeignete Wärmequelle für Wärmepumpen dar. Im Kanalisationsnetz der BWB ist der Einbau von Wärmetauschern zur Anbindung von Wärmepumpen in Klärwerken, Pumpwerken, Abwasserdruckleitungen und Mischwasserkanälen grundsätzlich möglich. Die BWB hat in Berlin bereits mehrere Projekte

umgesetzt, u.a. die Wärmeversorgung eines IKEA Einrichtungshauses in Lichtenberg sowie eines Baumarktes in Kreuzberg. Eine organisatorische Herausforderung bei der Umsetzung von Wärmekonzepten, die Abwasserwärme integrieren, ist das zeitliche Zusammenspiel von ohnehin durchzuführenden baulichen Maßnahmen an einer Abwasserleitung und der Errichtung der Heizzentrale. Ist der Einbau eines Wärmetauschers in Kombination mit sowieso erforderlichen Baumaßnahmen möglich, so fallen die Investitionskosten deutlich niedriger aus.

Den BWB zufolge müssen die Kanäle und die Abnehmer/innen einige Voraussetzungen erfüllen, damit eine Nutzung der Abwasserwärme zur Wärmebereitstellung machbar ist (BWB 2017a). Eine Voraussetzung besteht darin, dass über das Jahr und auch langfristig konstante Abwassermengen durch die Leitungen transportiert werden. Druckrohre sind wegen ihrer konstanten vollständigen Füllung die bevorzugte Variante. Bei einigen Kanälen variieren die Förderwege, sodass die Kanäle nicht kontinuierlich durchströmt werden. Die Nennweite der Leitungen sollte zudem größer sein als DN 700. Damit sich die Investitionen in den Wärmetauscher und die Wärmepumpe amortisieren, bedarf es außerdem einer Mindestabnahmemenge. Ein- und Zweifamilienhäuser sind keine geeigneten Abnehmer. In Frage kommen größere Gebäudekomplexe, Quartiere oder eine Integration in bestehende Wärmenetze. Laut den BWB sind technische Kriterien für die Wirtschaftlichkeit eines Projektes zur Nutzung von Abwasserwärme eine Entzugsleistung von mindestens 150 kW, eine räumliche Nähe von Abwasserleitung und zu versorgendem Objekt sowie nach Möglichkeit eine niedrigexergetische Sekundärseite (BWB 2018). Restriktionen in Hinblick auf die Integration in Bestands-Quartiere ergeben sich vor allem aus dem letztgenannten Punkt. Mit dem Fortschreiten der energetischen Gebäudesanierung kann Abwasserwärme in Zukunft an Bedeutung gewinnen.

Im Klausenerplatz-Kiez befinden sich zwei Arten von Abwasserleitungen, die aus technischer Sicht grundsätzlich als Wärmequelle geeignet sind. Zum einen liegt ein Mischwasserkanal im Maulprofil mit dem Durchmesser DN 2300 mit einem maximalen Trockenwetterabfluss von 395 L/s vor. Zum anderen besteht eine Abwasserdruckleitung der Größe DN 1100 mit einem Trockenwetterabfluss von 437 L/s. Die BWB schätzen die maximale Entzugsleistung für den Mischwasserkanal auf 4,9 MW und für die Abwasserdruckleitung auf 5,5 MW (BWB 2017b). Bei Ausschöpfung beider Potenziale kann nach Aussage der BWB eine maximale theoretische Entzugsleistung von ca. 6 MW erzielt werden.

Die Abwasserwärmepotenziale befinden sich in der Sophie-Charlottenstraße und im Spandauer Damm. Somit sind vor allem die beiden Blöcke im nordwestlichen Teil des Quartiers für die Abwasserwärmenutzung geeignet (s. Abb. 4.1). Dort liegen bereits Arealwärmenetze vor, die aktuell über eine Heizzentrale mit einem BHKW beziehungsweise mit Heizkesseln versorgt werden. Eine Möglichkeit wäre es, eine Heizzentrale mit Wärmepumpe(n) zur Nutzung der Abwasserwärme in das vorhandene Wärmenetz zu integrieren, die einen oder mehrere Blöcke mit Wärme versorgt.

Eine Herausforderung bei der Nutzung des Abwasserwärme-Potenzials ergibt sich dadurch, dass die Gebäude so saniert werden müssen, dass sie Niedertemperaturwärme nutzen können. Dies beinhaltet vermutlich mindestens eine Sanierung der Keller(decken), der obersten Geschossdecken oder Dächer sowie einen Austausch der Fenster. Zudem kann ein Austausch der Radiatoren erforderlich sein.

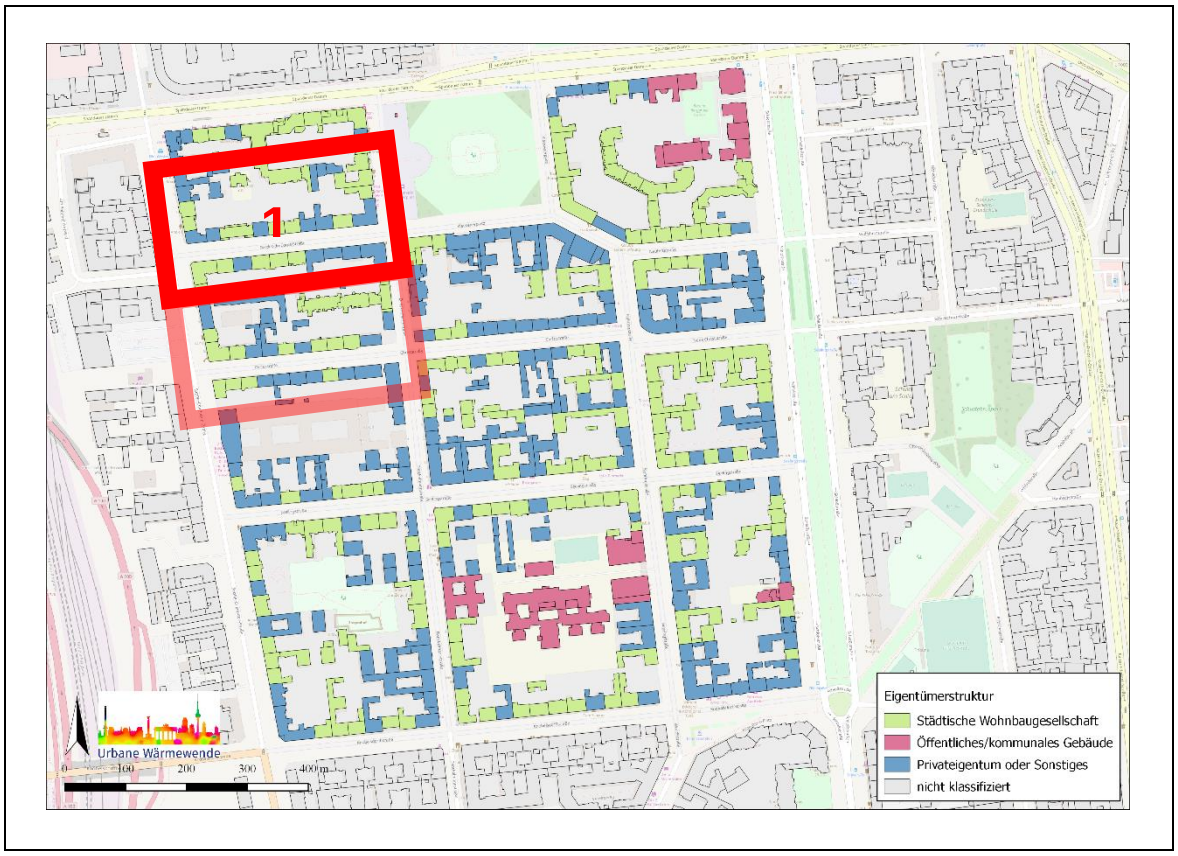


Abb. 4.1: Mögliche Blöcke für ein Wärmeversorgungskonzept mit Abwasserwärme
Quelle: IÖW, eigene Darstellung auf Grundlage von AfS 2013, Informationen von Gewobag ED sowie von OpenStreetMap ©OpenStreetMap-Mitwirkende; www.openstreetmap.org/copyright

4.2 Solarthermie und PV

Grundsätzlich eignen sich Dachflächen bei ausreichender Größe sowohl für eine Solarthermie- als auch eine PV-Nutzung. Allerdings stellt die Solarthermie etwas größere Ansprüche an die Statik der Dächer, da die Anlagen durch das transportierte Medium schwerer sind. Die Ermittlung des Potenzials für Solarthermie und PV im Klausenerplatz-Kiez basiert auf der Grundlage des Wirtschaftsatlas Berlin, der aus einer Kooperation der Berliner Wirtschaftsfördergesellschaft Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH und der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe entstanden ist. Teil des Wirtschaftsatlas ist der Solaratlas, in dem auf Grundlage der Vermessung die Potenziale der Dächer für PV und Solarthermie dargestellt sind (Business Location Center 2011; Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH 2017).

Das PV-Potenzial der Dächer ist in die drei Klassen „sehr gut geeignet“, „gut geeignet“ und „bedingt geeignet“ eingeteilt. Ist ein Dach über 95 Prozent der jährlich möglichen Sonneneinstrahlung in Berlin von 1.133 kWh/(m²·a) ausgesetzt, wird es als „sehr gut geeignet“ eingestuft. Bei 90 – 95 Prozent wird es als „gut geeignet“ - und bei 80 – 90 Prozent als „bedingt geeignet“ betrachtet. Bei einem niedrigeren Prozentsatz wird ein Dach als ungeeignet angesehen. Bei Dachflächen mit Teilflächen, die einen unterschiedlichen Eignungsstand aufweisen, wird als Gesamtergebnis die Eignungsklasse der prozentual größeren Fläche angegeben. Die Mindestfläche für das Installieren einer PV-Anlage ist auf 15 m² für Schrägdächer und 40 m² für Flachdächer festgelegt (Business Location Center 2011).

Tab. 3 führt die Anzahl und die kumulierte Fläche der für PV geeigneten Dächer unterteilt nach Eignungsklassen und Größenklassen auf. Bei einer Begutachtung der Dächer auf Google Maps wird deutlich, dass auf einigen Dächern bereits PV- oder Solarthermieanlagen installiert sind. Diese sind in Tab. 3 und Tab. 4) ausgewiesen, sodass das noch verfügbares Potenzial ersichtlich wird.

Tab. 3: Anzahl und kumulierte Summe der potenziellen Kollektorflächen für PV
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis des Solaratlas (Business Location Center 2017)

Eignung	Kategorie	Gesamt		Bereits genutzt		noch verfügbar	
		Anzahl	Fläche [m²]	Anzahl	Fläche [m²]	Anzahl	Fläche [m²]
Sehr gut geeignet	5-50 m²	44	1.448	1	118	43	1.330
	50-100 m²	95	7.052	2	337	93	6.719
	100 - 300	72	10.319	1	303	71	10.016
	>300 m²	7	3.521	1	1.311	6	2.210
	GESAMT	**218**	**22.340**	**5**	**2.069**	**213**	**20.275**
Gut geeignet	5-50 m²	3	101	-	-	3	101
	50-100 m²	1	88	-	-	1	88
	100 - 300	1	344	-	-	1	344
	>300 m²	2	417	-	-	2	417
	GESAMT	**7**	**950**	**0**	**0**	**7**	**950**
Bedingt geeignet	5-50 m²	10	345	-	-	10	345
	50-100 m²	24	1.902	1	74	23	1.829
	100 - 300	48	8.527	-	-	48	8.526
	>300 m²	5	3.195	-	-	5	3.195
	GESAMT	**87**	**13.969**	**1**	**74**	**86**	**13.895**

Bei den PV-Potenzialen ist in allen Dachgrößenkategorien der Großteil der Dächer sehr gut für PV geeignet. Die meisten Dächer fallen in die Größenkategorien 50–100 m² und 100–300 m². Die Summe der Dachflächen über die drei Leistungsklassen ist in der Größenklasse 100–300 m² am größten (s. Abb. 4.2). Eine Nutzung aller laut Solaratlas potenziell geeigneter Dachflächen würde etwa eine Produktion von PV-Strom im Umfang von 4,8 GWh_{el}/a ermöglichen.

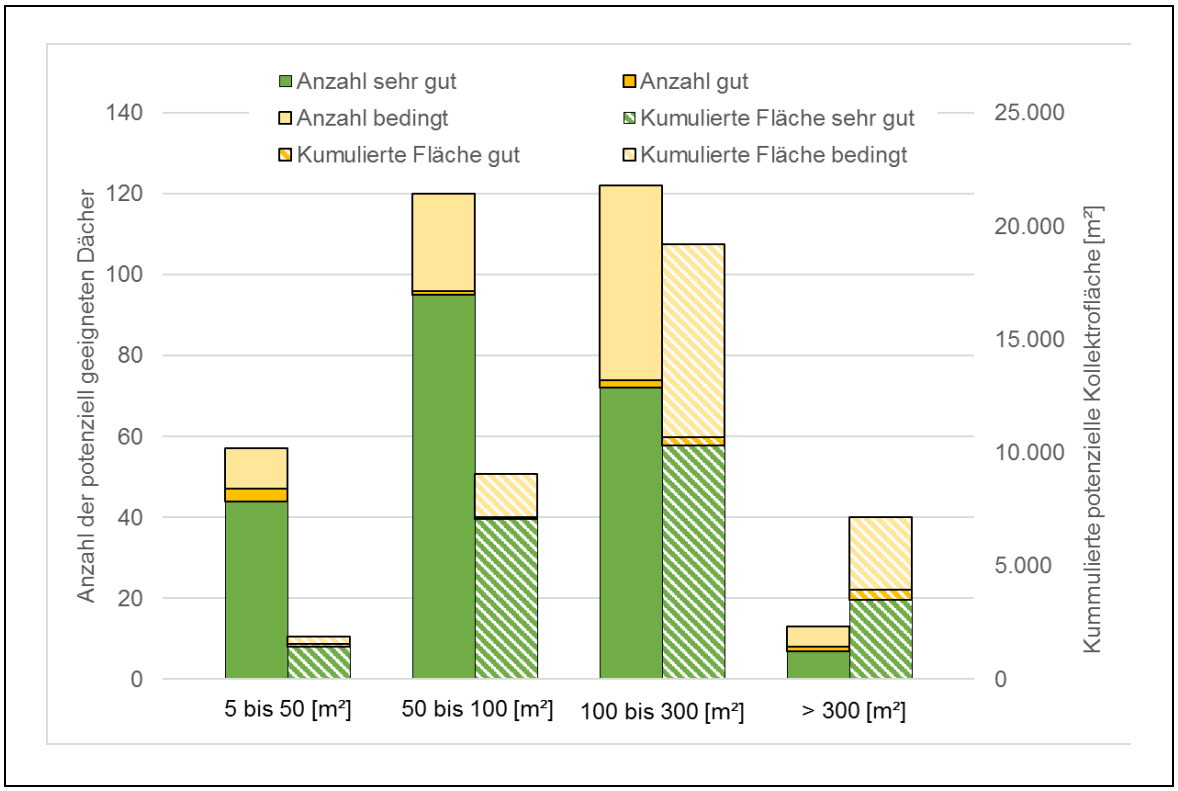


Abb. 4.2: Anzahl der potenziell für PV geeigneten, noch ungenutzten Dächer und kumulierte Summe der potenziellen Kollektorfläche
Quelle: IÖW, eigene Darstellung auf Basis des Solaratlas (Business Location Center 2017)

Für eine potenzielle Nutzung für Solarthermie wird insgesamt eine höhere Anzahl an prinzipiell geeigneten Dachflächen ausgewiesen. Grund hierfür ist die im Vergleich zu PV geringere Mindestdachfläche für Solarthermieanlagen von 5 m² für Schrägdächer und 15 m² für Flachdächer.

Tab. 4: Anzahl und kumulierte Summe der potenziellen Kollektorflächen für Solarthermie
Quelle: Eigene Darstellung auf Basis des Solaratlas (Business Location Center 2017) Erläuterung: Für bereits genutzte Dächer wurden anhand des Solarkatasters und mit einer Internetrecherche (google maps) die Flächenbelegung identifiziert.

Kategorie	Gesamt		Bereits genutzt		noch verfügbar	
Fläche [m²]	Anzahl	Fläche [m²]	Anzahl	Fläche [m²]	Anzahl	Fläche [m²]
< 50	49	1.550	1	118	48	1.399
50 bis 100	126	9.233	3	337	124	8.754
100 - 300	160	25.982	3	303	159	25.618
> 300	19	10.200	1	1.311	18	8.677
GESAMT	354	46.965	8	2.069	349	44.448

Eine Nutzung aller laut Solaratlas potenziell geeigneter Dachflächen würde theoretisch eine Produktion von Solarwärme im Umfang von etwa 17,3 GWh_{th}/a ermöglichen. Es gibt eine Begrenzung der Potenziale auf Flächen von größer 300 m² für eine Solarwärmeproduktion von 3,8 GWh_{th}/a. Dies ist ein theoretischer Wert insofern, als dass aufgrund der saisonalen Verfügbarkeit der Wärme nicht das gesamte

Potenzial real genutzt werden kann. Dieser Effekt wird in der Simulation von Wärmeverbrauch und -erzeugung über das Jahr berücksichtigt.

Grundsätzlich eignen sich Dachflächen gleichermaßen für eine Solarthermie- oder PV-Nutzung. Welche der beiden Technologien für eine jeweilige Fläche sinnvoller ist, hängt von mehreren Faktoren ab und lässt sich nicht pauschal sagen. Solarthermie hat einen höheren Wirkungsgrad und verbraucht für die gleiche Leistung weniger Platz als PV. In Bezug auf die Kosten lassen sich die beiden Systeme nur schwer vergleichen, da eine Solarthermieanlage Wärme zur Heizungsunterstützung und Warmwasserbereitstellung produziert, wofür weitere Investitionen in Leitungen und Pufferspeicher neben der Solarthermieanlage selbst erforderlich sind. Strom als Energieform lässt sich im Gegensatz zu Wärme flexibel einsetzen und ist mit der vorhandenen Netzinfrastruktur leicht zu transportieren.

Bei der Nutzung von Dachflächen für Solarenergie stellt sich außerdem die Frage, welche Restriktionen es für die Errichtung von PV- und Solarthermie-Anlagen gibt. Einschränkungen, die sich aus der Verschattung der Dachflächen durch andere Gebäude oder Bäume ergeben, sind im Solaratlas bereits berücksichtigt. Dennoch ist dieser über die Zeit veränderliche Aspekt im Fall einer konkreten Planung als mögliches Hemmnis zu berücksichtigen.

Die Statik eines Daches entscheidet maßgeblich darüber, ob die Installation einer PV- oder Solarthermie-Anlage möglich ist. Um ein Verrutschen der Module zu verhindern, bedarf es einer Lagesicherung. Eine Variante der Lagesicherung besteht darin, die Module im Dachtragwerk zu befestigen. Die alternative Sicherung mithilfe einer Auflast kann zu hohen Punktlasten führen und lässt sich nicht immer mit der Statik eines Daches vereinbaren. Solarthermie-Anlagen sind wegen des Mediums etwas schwerer, sodass es bei dieser Technologie mehr Einschränkungen gibt.

Dachausbau und Aufstockung sind in verdichteten Stadtgebieten wichtige Möglichkeiten, um zusätzliche Wohnfläche zu schaffen. Gebäudeeigentümer/innen zögern im Moment bei der Investition in eine PV- oder Solarthermie-Anlage, um sich die Option des Dachausbaus und der Aufstockung offen zu halten. Dies stellt – vermutlich ein zeitlich begrenztes – Hemmnis für Solarthermie und PV dar.

Ein Aspekt in der Diskussion um Klimaanpassung ist das Thema Dachbegrünung. Eine Dachbegrünung hat viele positive Effekte, vor allem für Flachdächer. Sie schützt das Dach vor Wettereinflüssen und kann es auf diese Weise langlebiger machen. Außerdem trägt eine Dachbegrünung zur Wärmedämmung und zum Schallschutz bei und kann die Kanalisation bei Starkregenereignissen entlasten (Fachbereich Umwelt und Stadtgrün 2015). Dabei steht die Begrünung nicht notwendigerweise in Konkurrenz mit einer Nutzung der Dächer für die Gewinnung von Solarenergie. In Kombination mit PV-Anlagen lassen sich sogar Synergieeffekte erkennen. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Leistung von PV-Modulen um ca. 0,5 Prozent pro Grad Celsius. Eine Dachbegrünung kann durch Kühlung die Leistung von PV-Modulen erhöhen (Fachbereich Umwelt und Stadtgrün 2015). Des Weiteren kann eine Dachbegrünung bei der Lagesicherung von PV-Modulen hilfreich sein.

Neben diesen technischen Aspekten begrenzt der inzwischen geringe wirtschaftliche Nutzen für die Investor/innen den Ausbau der PV und Solarthermie. In Städten braucht es attraktive Lösungen für den vermieteten Bestand. Eine breite Umsetzung von Mieterstromprojekten wird derzeit durch die enge räumliche Begrenzung für Erzeugung und Verbrauch und die EEG-Umlage von Mieterstrom blockiert (Stryi-Hipp et al. 2019). Diesbezüglich braucht es einer Anpassung des rechtlich-regulativen Rahmens, der beispielsweise auch eine Erhöhung der Mieterstromumlage umfassen sollte.

4.3 Gewerbliche Abwärme

Um die Gewerbestruktur zu erfassen, dienten die folgenden Portale als Datengrundlage:

- Wirtschaftsatlas der SenUVK
- Branchenbuch des Kiezbündnisses „Klausenerplatz“

- Branchenbuch des Internetportals „berlin.de“
- Freie Recherche auf Google Maps

Anhand dieser Daten wurden im betrachteten Gebiet verschiedene Gewerbeeinheiten identifiziert. Die Abwärmepotenziale im ansässigen Gewerbe sind als gering einzuschätzen. Mögliche Quellen von Abwärme finden sich Gastronomiebereich und im Lebensmitteleinzelhandel. So gibt es einige Bäckereien und Restaurants, bei denen theoretisch eine Nutzung der Abwärme aus Ofenanlagen, sowie aus dem Geschirrspülprozess denkbar ist. Im Einzelhandel kommen vor allem Lebensmittelkühltheken zur Bereitstellung von Abwärme infrage. In dem Gebiet gibt es vier Supermärkte, in den kleineren Lebensmittelläden sind keine nennenswerten Potenziale zu erwarten. Als energieintensive Betriebe können eine Druckerei, eine Rösterei sowie ein Rechenzentrum als Wärmelieferanten in Betracht kommen. In der Summe ist jedoch nur ein geringes Potenzial zu erwarten. In vielen kleinere Betrieben ist es zudem denkbar, dass vorhandene Abwärmepotenziale intern über eine Wärmerückgewinnung genutzt werden. Eine Herausforderung bei der Nutzung gewerblicher Abwärme stellt die saisonale Verfügbarkeit dar. Findet eine betriebsinterne Rückgewinnung statt, so besteht nur im Sommer überschüssige Wärme, die in ein Wärmenetz eingespeist werden könnte. Aufgrund dieser Restriktionen und vor allem wegen des hohen Abwasserwärmepotenzials, das im Quartier eine vielversprechende Wärmequelle darstellt, wurde das Thema gewerbliche Abwärme nicht vertieft.

4.4 Biomasse

Biomasse kann in unterschiedlicher Form Eingang in die Wärmeerzeugung finden. Zur Biomasse zählen Holzhackschnitzel, Holzpellets und Scheitholz sowie das aus Abfällen und Grünschnitt gewonnene regionale Biogas. Voraussetzung einer nachhaltigen Biomassenutzung ist die regionale Bereitstellung der Biomasse. Vorteile von Biomasse sind erstens, dass ein Einsatz ohne nennenswerte technische Hemmnisse in Heizwerken und BHKW möglich ist und zweitens, dass ein hohes Temperaturniveau erreicht wird, das den Anforderungen von Bestandgebäuden und -wärmenetzen entspricht (Paar et al. 2013). Biomasse ist zudem lager- und transportierfähig. Aufbereitetes Biogas kann über die vorhandene Gasnetzinfrastruktur transportiert werden und ist daher flexibel einsetzbar.

Von Nachteil sind beim Einsatz von Biomasse vor allem die begrenzten Mengenpotenziale, die bei Holz und Anbaubiomasse eine hohe Nutzungskonkurrenz und verschiedene Nachhaltigkeitsprobleme mit sich bringen (Paar et al. 2013). Bei Holz besteht eine Konkurrenz zur stofflichen und baulichen Nutzung, die Vorrang vor der energetischen Nutzung hat. Möglichkeiten das Potenzial an holzartiger Biomasse für die energetische Nutzung auszubauen sind Kurzumtriebsplantagen, Agroforstsysteme sowie die Nutzung von Stroh und anderen Reststoffen (Klebsch et al. 2014). Die nationale Politikstrategie Bioökonomie soll den Weg bereiten für ein zukunftsfähiges Wirtschaften, das zunehmend auf nachhaltig erzeugten und nachwachsenden Ressourcen sowie biogenen Rest- und Abfallstoffen beruht (BMEL 2014). Für die Zukunft ist aufgrund der zunehmenden Bedeutung biogener Ressourcen auch für die Industrie von einer Verschärfung vorhandener Nutzungskonkurrenzen auszugehen.

Das endogene Biomassepotenzial für Berlin lässt sich aus der Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz für das Land Berlin für das Jahr 2016 ableiten (s. Vogt und Fehrenbach 2017). Die Bilanz umfasst alle überlassungspflichtigen und nicht überlassungspflichtigen Abfälle. Abfallfraktionen, die teilweise Organik enthalten, sind u.a. der Haus- und Geschäftsmüll, Bioabfall, Laubsack und sonstiges anfallendes Laub, Grünabfälle und Straßenbegleitgrün, Altholz und Altfette. Über den Anteil der Organik in der jeweiligen Fraktion und den Heizwert lässt sich ein theoretisch energetisch nutzbares Biomassepotenzial in PJ ausweisen. In der Summe beläuft sich die Biomasse auf ca. 1,2 Mio. Tonnen (Frischmasse) mit einem potenziellen Energiegehalt von ca. 8,3 PJ. Etwa 0,2 bis 0,3 Mio. Tonnen davon werden aktuell kompostiert und ca. 0,6 bis 0,7 Mio. Tonnen (Frischmasse) werden energetisch verwertet. Demnach wird der größte Teil der in der Stadt anfallenden Biomasse bereits stofflich oder energetisch verwertet.

Grundsätzlich bieten die Berliner Stadtgüter das Potenzial zum Anbau von nachwachsenden Rohstoffen, wobei die Biomassemengen sehr begrenzt sind.

Des Weiteren könnte Biomasse aus dem Umland in Berlin energetisch genutzt werden. Für das Land Brandenburg wird das energetisch nutzbare Biomassepotenzial mit Werten von 42,5 PJ bis 48 PJ angegeben (MUGV 2010; Bost et al. 2012). Eine weitere Steigerung des Potenzials ist nicht anzunehmen, auch wenn das Land Brandenburg über eine Waldfläche von 1,05 Mio. ha verfügt (ca. 35 % der Landesfläche). Denn die nachhaltig nutzbare Menge an Waldholz ist nach der Leitmaxime der gemeinsamen Landesplanung Berlin-Brandenburg prioritär für die stoffliche Verwertung vorgesehen. Einzig im Bereich der Agrarhölzer ist nach dem Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (MUGV) (2010) ein Potenzial zu sehen, welches in den nächsten Jahrzehnten auf ca. 1,4 PJ/a ausgebaut werden kann.

Den ausgewiesenen Potenzialen steht der aktuelle Biomasseeinsatz für die Energieerzeugung in Berlin und Brandenburg gegenüber, der bei 6,6 PJ in Berlin und 42,7 PJ in Brandenburg liegt. Die Energiebilanz lässt darauf schließen, dass das regionale Potenzial bereits ausgeschöpft ist. Ein nennenswertes Potenzial zum Ausbau der energetischen Biomassenutzung ist für Berlin ausgehend von der Prämisse einer regionalen Nutzung von Biomasse nicht gegeben.

5 Entwicklungsoptionen für die Wärmeversorgung

Im Zentrum der Untersuchung liegt wegen des hohen lokalen Potenzials an Abwasserwärme die Frage, wie diese Wärmequelle in einem gebäudeübergreifenden Wärmekonzept genutzt werden kann. Da sich das Abwasserwärmpotenzial auf die Blöcke im nord-westlichen Teil des Gebietes konzentriert, beschränken sich die Analysen in dieser Arbeit auf einen Block (Block 1 auf Abb. 4.1, S. 14). Um zu prüfen, inwiefern das Wärmekonzept übertragbar ist auf andere Rahmenbedingungen, erfolgten Analysen mit einer Luft- anstelle einer Abwasserwärmepumpe. Technisch kann eine Wärmepumpe zur Nutzung der Abwasserwärme mit einem BHKW, einem Gaskessel oder anderen erneuerbaren Wärmeerzeugern kombiniert werden. Die Effizienz von Wärmepumpen hängt in hohem Maße vom Temperaturniveau der Wärmequelle (hier Abwasser) und der Wärmeabnehmer ab. In dem Altbau-Quartier liegen die Temperaturanforderungen auf der Verbraucherseite überwiegend auf einem hohen Niveau. Daher ist die energetische Gebäudesanierung wichtiger Bestandteil eines Quartierskonzeptes, welches Abwasserwärme nutzt. Im folgenden Abschnitt wird daher zunächst auf die Entwicklung des Energieverbrauchs bei unterschiedlichen Sanierungskonzepten eingegangen, bevor die untersuchten Wärmeversorgungskonzepte vorgestellt werden.

5.1 Entwicklung des Wärmeverbrauchs

Es werden unterschiedliche Sanierungsmöglichkeiten in den Blick genommen, um die Bandbreite an Entwicklungsoptionen und die Wechselwirkung mit der Erzeugungsseite aufzuzeigen.

Da in dem Quartier vergleichsweise viele Gebäude dem Denkmalschutz unterliegen und die Festlegung eines Milieuschutzgebietes in Betracht gezogen wird, bestehen Restriktionen für die energetische Sanierung. Diese sind insofern berücksichtigt, als dass für die denkmalgeschützten Gebäude keine Vollsanierung inklusive einer Dämmung der Außenwand angenommen wird. Stattdessen ist bei denkmalgeschützten Gebäuden die Außenwand grundsätzlich ausgeklammert, die Sanierung beschränkt sich somit auf die Dämmung der obersten Geschossdecke bzw. des Daches, der Kellerdecke und einen Fensteraustausch. Es handelt sich bei diesem Vorgehen um einen eher konservativen Ansatz, da auch bei Denkmalschutz teilweise durchaus eine Dämmung der Außenwand möglich ist bzw. nur die Fassade zur Straße von einer Dämmung ausgenommen ist. In der Summe sind neben dem Status quo drei

unterschiedliche Sanierungszustände der Gebäude im Quartier abgebildet (s. Tab. 5), für die anschließend die Erzeugerszenarien simuliert wurden. Im Zuge des Vorhabens wurden zahlreiche Sanierungsszenarien in die Untersuchung einbezogen, die Ergebnisdarstellung beschränkt sich auf drei Varianten zuzüglich des Status quo. Diese Varianten bilden die Bandbreite an Möglichkeiten gut ab.

Tab. 5: Annahmen zu den Sanierungsszenarien
Quelle: Eigene Annahmen und Berechnungen

Szenario	Kein Denkmalschutz	Denkmalschutz	Wärmeverbrauch (MWh_{th})	Auslegungsleistung (kW_{th})
Status Quo			3.832	3.382
Teilsanierung	Dach/OG,KD, Fe	Dach/OG,KD, Fe	3.112	2.782
Vollsanierung	Vollsanierung	Dach/OG,KD, Fe	2.620	2.332
Ambitionierte Sanierung	Vollsanierung ambitioniert	Dach/OG,KD, Fe	1.932	1.732

Die Sanierungsmaßnahmen orientieren sich dabei an den durch das IWU (2015) bereitgestellten Angaben zu zwei Sanierungszuständen mit unterschiedlicher Sanierungstiefe. Die Standardsanierung (Variante 2) beinhaltet bei den meisten Gebäuden eine 12 cm dicke Außenwanddämmung (Wärmeleitstufe (WLS) 035), eine 12 cm dicke Dämmung der obersten Geschossdecke bzw. des Daches (WLS 035), eine 8 cm dicke Dämmung der Kellerdecke (WLS 035) und den Einbau von Fenstern mit 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung. Bei der ambitionierten Sanierung sieht das IWU höhere Dämmdicken bei gleicher WLS größere Dämmdicken vor – bei der Außenwand z. B. meist 24 cm. Mit dem Ziel die Dämmdicke zu reduzieren, wurde in der Kostenberechnung der Einsatz eines Dämmmaterials mit einer besserer WLS wie Polyurethan (PUR) oder Polyisocyanurat (PIR) vorgesehen. Die Berechnung der Dämmdicke sieht vor, dass der U-Wert des jeweiligen Bauteils den Annahmen in IWU (2015) entspricht. Mit diesem Vorgehen ergeben sich für die ambitionierte Sanierung eine 16 cm dicke Außenwanddämmung (WLS 024), eine 20 cm dicke Dämmung der obersten Geschossdecke bzw. des Daches (WLS 025) und eine 9 cm dicke Dämmung der Kellerdecke (WLS 025). Hinzu kommt der Einbau von Fenstern mit 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung und gedämmtem Rahmen.

Die Variante mit ambitionierter Vollsanierung (3) entspricht nicht den zulässigen Sanierungsmaßnahmen in einem Milieuschutzgebiet. Da in Betracht gezogen wird, das Gebiet als soziales Erhaltungsgebiet festzulegen (LPG 2020)), ist eine Umsetzung dieser Variante sehr unwahrscheinlich.

5.2 Entwicklung der Wärmeerzeugung

Für die Bereitstellung der Wärme in der Heizzentrale des untersuchten Blocks sind ein BHWK und mehrere Kesselanlagen im Einsatz, die mit Erdgas befeuert werden. Die Untersuchung legt den Schwerpunkt auf die mögliche Nutzung des im Quartier vorhandenen Abwasserwärmepotenzials. Die Nutzung von Abwasserwärme mit einer Groß-Wärmepumpe wurde kombiniert mit unterschiedlichen anderen Wärmeerzeugern. Außerdem erfolgte eine Variation, indem anstelle der Abwasserwärmepumpe eine Luft-Wärmepumpe simuliert wurde. Damit soll geprüft werden, inwiefern die Ergebnisse übertragbar auf Quartiere ohne Abwasserwärmepotenziale sind. Solarthermie wurde ebenfalls als Wärmeerzeugungsoption berücksichtigt, wobei die lokalen Potenziale gering sind. Eine Eigenversorgung der Wärmepumpe mit lokal erzeugtem PV-Strom wurde ebenfalls simuliert. Die Referenz bildet die Versorgung mit einem BHKW und einem Gas-Kessel, was dem Status quo entspricht. Im Quartier ist bereits ein Wärmenetz vorhanden, das für die Verteilung genutzt werden kann. Für die Wärmeerzeugung wurden demnach die folgenden Optionen betrachtet:

- Gas-Kessel + BHKW (Status quo)
- Gas-Kessel + Abwasserwärmpumpe + BHKW
- Gas-Kessel + Abwasserwärmpumpe + BHKW + PV (mit Eigenverbrauch)
- Gas-Kessel + Abwasserwärmpumpe + BHKW + Solarthermie

Alle Varianten mit Wärmepumpen wurden zusätzlich mit dem Einsatz einer Luft- anstelle der Abwasserwärmepumpe modelliert.

5.2.1 Vorgehen bei der Simulation

An dieser Stelle erfolgt zum besseren Verständnis der Funktionsweise und der Grenzen des Simulationsmodells eine kurze Beschreibung des Modells. Das in MatLab programmierte Modell dient der Simulation der Wärmebereitstellung in urbanen Räumen durch Fern- oder Nahwärmenetze. Es können Wärmeverbunde mit gemeinsamen Erzeugungsanlagen (Heizzentrale) und einem Zwei-Leiter-Wärmenetz simuliert werden. Zweck der Simulation ist es, energetische Kennzahlen des jeweiligen Versorgungssystems, beispielsweise die Verbräuche von Brennstoffen und Strom sowie Informationen zu der tatsächlichen Ausschöpfung vorhandener Potenziale und Anlagen zu gewinnen. Denn gerade in den Sommermonaten treten Konkurrenzen zwischen den Wärmeerzeugungsanlagen auf, sodass die potenziell verfügbare Wärme nicht komplett genutzt werden kann. Damit stellt das Modell Ergebnisse über die Effizienz des Systems, die Intensität der Sektorenkopplung sowie wichtige Inputs für die Generierung ökonomischer und ökologischer Kennzahlen bereit. Die zeitliche Auflösung des Modells beträgt eine Stunde, kann jedoch bei entsprechender Datengrundlage verfeinert werden.

Die Inputdaten bezüglich des Wärmebedarfs auf der Verbraucherseite resultieren aus dem Gebäudemodell (siehe Kapitel 3.2). Die Gebäudedatenbank stellt die Datengrundlage dar, um aus einer Kombination aus Baualter und Sanierungszustand anhand einer definierten Matrix jeweils vordefinierte Jahresprofile, Systemtemperaturen der Heizkreise und Heizkörpertypen (und deren zugehörige Heizkörperexponenten) zuzuordnen (s. Kapitel 3.2). Die Jahresprofile, die durch die BLS Energieplan GmbH erstellt wurden, sind die Grundlage zur Verteilung des Jahresheizwärmebedarfs eines Objekts auf die einzelnen Stunden des Jahres. Grundlage für die Erstellung der Verbrauchsprofile für Heizwärme stellt der Außentemperaturverlauf eines Jahres mit mittlerem Witterungsverhältnis der Region Potsdam basierend auf den TRY-Daten des Deutschen Wetterdienstes dar.

Im Zuge der Datenerhebung und Szenarien-Erstellung findet eine Zuordnung der einzelnen Objekte zu einem Wärmeverbund statt. Die Simulation des Wärmeverbundes erfolgt in stündlicher Auflösung für ein Jahr. Ziel ist die Erstellung einer Heizkurve für den Verbund, der die Vorlauftemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur abbildet. In jeder Zeiteinheit wird die erforderliche Temperatur jedes gebäudebezogenen Heizkreises und Trinkwarmwasserspeichers ermittelt. Auf dieser Grundlage ergibt sich die notwendige Vorlauftemperatur im Netz pro Zeiteinheit. In Verbindung mit dem Wärmebedarf ergibt sich der erforderliche Massenstrom pro Zeiteinheit. Es existiert außerdem ein maximaler Massenstrom im Netz, der sich durch die Dimensionierung des Netzes ergibt und nicht überschritten werden darf. Aus diesem Schritt der Simulation resultiert eine Heizkurve für das gesamte Netz.

Anschließend werden die Erzeuger simuliert. Der zuvor definierte Erzeugerpark erhält die Information vom Verbraucherkreis, welche Solltemperatur im Netz vorhanden sein muss, um die Heizkreise und Warmwasserspeicher bedienen zu können. Daraus, sowie aus dem für den Erzeugerkreis maßgeblichen Massenstrom des Verbraucherkreises, wird errechnet, auf welche Temperatur der Massenstrom vom Erzeugerkreis gebracht werden muss, um am Ende der Zeiteinheit jene geforderte Solltemperatur zu erreichen. Die Einsatzreihenfolge der Erzeugungsanlagen ist innerhalb des Skriptes festgelegt. Die Einsatzreihenfolge orientiert sich an den Wärmegestehungskosten und CO_2-Vermeidungskosten der einzelnen Technologien und Anlagen. Die Reihenfolge der in dieser Arbeit betrachteten Erzeuger ist wie folgt: Solarthermie, Abwasser- und Luftwärmepumpen, BHKW und Kessel. Bei den Kraft-Wärme-

Kopplung-Anlagen (KWK) und den Kesseln entscheidet außerdem der Brennstoff über die Einsatzpriorität (Biomasse vor Gas). Ist ein Erzeuger in der Simulation „an der Reihe“, so versucht er den Massenstrom soweit wie möglich auf die geforderte Temperatur zu bringen. Anlagen, die dazu technisch in der Lage sind, passen ihre Vorlauftemperatur an das gewünschte Niveau an. Solarthermie dagegen hat keine Regelung der erbrachten Temperatur und heizt den Massenstrom soweit wie möglich auf. Output aus der Simulation ist neben Ergebnisgrößen wiederum ein thermodynamischer Vektor.

Zuletzt wird das Wärmenetz simuliert. Die wesentlichen Eingangsgrößen sind die thermodynamischen Vektoren aus dem Verbraucher- und Erzeugerkreis, die den Leitern im Netz zugeordnet werden. Es wird ein Wärmestrom berechnet, der sich aus der Temperaturdifferenz aus der bestehenden Temperatur des Netzleiters und den zu- bzw. abgeführten Strömen ergibt. Die resultierenden Temperaturen im Leiter sind die Summe der Wärmemenge zu Beginn des Zeitschritts und der zu- und abgeführten Wärmeströme inklusive der Netzverluste während der Zeiteinheit bezogen auf die Masse innerhalb des Leiters. Als Ergebnis der gesamten Simulation eines Zeitschritts stehen u.a. die Brennstoff- und Strombedarfe der Anlagen, die jeweils in das Netz abgegebene Wärme sowie einige technische Kenngrößen für den jeweiligen Zeitschritt zur Verfügung, woraus in der Summe Zeitreihen resultieren.

5.2.2 Vergleich der Wärmeerzeugungsoptionen

Die Ergebnisdarstellung konzentriert sich auf ausgewählte Wärmeversorgungskonzepte. Tab. 6 führt die thermische Leistung der Wärmeerzeugungstechnologien auf. Die Auslegung der Wärmepumpe orientiert sich daran, dass 4.000 Volllaststunden angestrebt werden. Die Auslegung des BHKW richtet sich zum einen nach der Leistung des aktuell in der Heizzentrale vorhanden BHKW (BHKWkl). Zum anderen wurde ein größeres BHKW dimensioniert, das in etwa 3.500 Volllaststunden erreicht (BHKWgr). Damit orientiert sich die Dimensionierung im zweiten Fall auf der Förderung im Zuge des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzt (KWKG). Seit der Novellierung des KWKG ist ab 2020 die Förderung auf eine maximale Volllaststundenzahl für BHKW von 3.500 Stunden beschränkt (Bundesregierung 2018).

Tab. 6: Thermische Leistung der Wärmeerzeugungstechnologien bei aktuellem Sanierungszustand der Gebäude
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

Technologie	BHKW_Kessel	BHKWgr_Abw	BHKWkl_Abw	BHKWkl_Abw_ST
Gas-Kessel	1.100	1.100	1.100	1.100
Gas-Kessel	1.100	1.100	1.100	1.100
Gas-Kessel	1.100	900	1.100	1.100
Gas-BHKW	82	250	82	82
Abwasser-WP		650	650	600
Solarthermie (m^2)				255

Für die drei Sanierungsszenarien erfolgte analog zum aktuellen Sanierungszustand eine Auslegung der Wärmeerzeugungsanlagen. Tab. 7 führt beispielhaft die thermische Leistung der Wärmeerzeugungstechnologien für das Sanierungsszenario Vollsanierung auf. Bei weitergehender Sanierung kann die Dimensionierung der Kessel noch etwas geringer ausfallen.

Die Wärmebereitstellung und -einspeisung der Anlagen in das Wärmenetz hängt nicht nur von der Rangordnung bei der Einsatzplanung der Erzeugungsanlagen ab, sondern auch von externen Faktoren wie der saisonalen Verfügbarkeit der Wärmequelle. Die Abwasserwärme steht ganzjährig zur Verfü-

gung. Solarthermie ist vor allem in den Sommer- und den Übergangsmonaten verfügbar. Die Wärmemenge pro Anlagentyp, die sich in den unterschiedlichen Verbrauchsszenarien aus der energetischen Bilanzierung ergibt, zeigt Abb. 5.1.

Tab. 7: Thermische Leistung der Wärmeerzeugungstechnologien im Sanierungsszenario Vollsanierung
Quelle: Eigene Darstellung

Technologie	BHKW_Kessel	BHKWgr_Abw	BHKWkl_Abw	BHKWkl_Abw_ST
Gas-Kessel	1.100	1.100	1.100	1.100
Gas-Kessel	1.100	1.100	1.100	1.100
Gas-Kessel	50		50	50
Gas-BHKW	82	165	82	82
Abwasser-WP		500	500	500
Solarthermie (m^2)				255

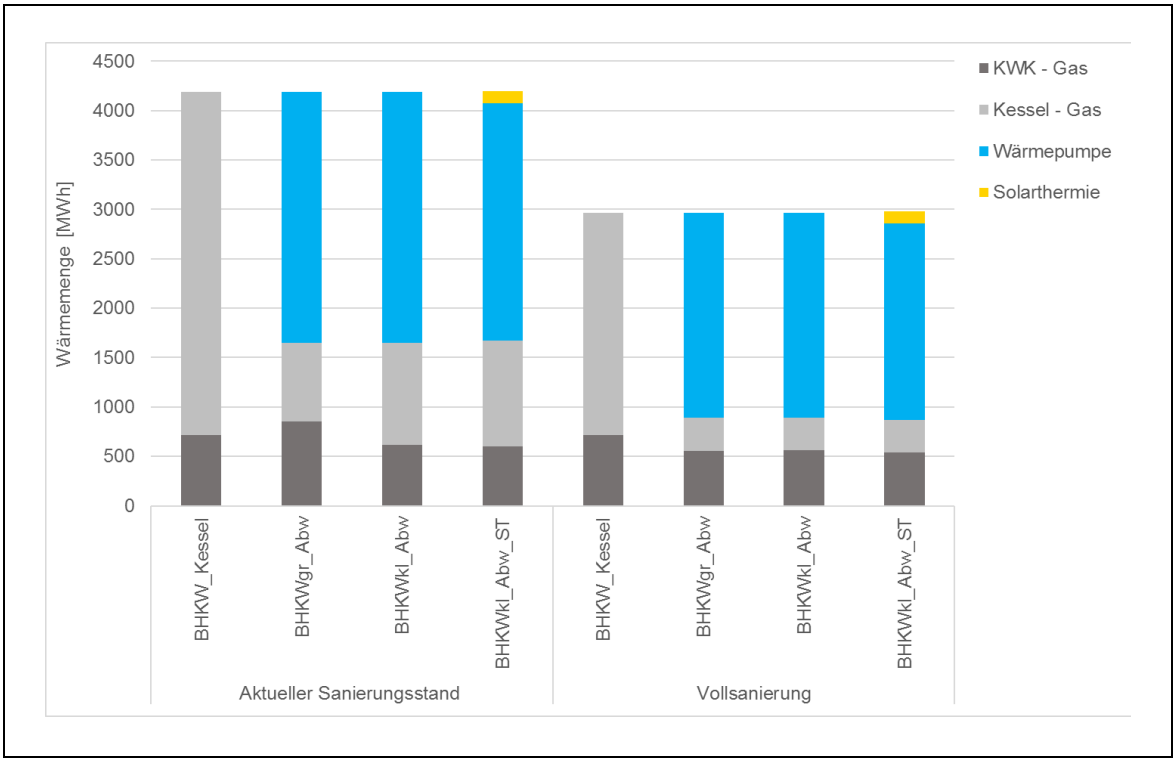


Abb. 5.1: Wärmemengen pro Technologie und Energieträger bei unterschiedlichen Sanierungsszenarien
Quelle: IÖW, eigene Berechnung und Darstellung

Die aktuelle Wärmeversorgung stammt aus der Verbrennung von Erdgas, ein kleinerer Anteil wird durch das BHWK bereitgestellt, der Großteil durch die Gaskessel. In den Szenarien mit Abwasserwärmepumpe können der Simulation zufolge etwa 50 bis 60 Prozent der Wärme aus der Abwasserwärme gewonnen werden. Die Wärme muss durch die Gaskessel und das BHKW aber auf das erforderliche

Temperaturniveau angehoben werden, was die Wärmemenge aus Wärmepumpen begrenzt. Durch eine gezielte Sanierung der Gebäude ist ein effizienterer Einsatz der Wärmepumpe möglich und die Jahresarbeitszahl nimmt um etwa 0,2 zu. Indem der Wärmebedarf und die Temperaturanforderung der Gebäude durch die Sanierung sinken, kann ein größerer Anteil der insgesamt erforderlichen Wärmemenge über die Abwasserwärmepumpe gedeckt werden. Der Beitrag der Wärmepumpe liegt im Verbraucherszenario Vollsanierung bei ca. 70 Prozent. Wird anstelle der Abwasserwärmepumpe eine Luftwärmepumpe eingesetzt, so fällt die Jahresarbeitszahl um etwa 0,3 geringer aus und es kann nur ein geringerer Anteil der Wärme durch die Wärmepumpe gedeckt werden.

5.3 Ökonomische Bewertung

5.3.1 Vorgehen bei der ökonomischen Bewertung

Um die Wirtschaftlichkeit der unterschiedlichen Optionen über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren möglichst ganzheitlich zu bewerten und untereinander vergleichbar zu machen, wird die Annuitätenmethode nach Richtlinie 2067 des Vereins Deutscher Ingenieure e. V. (VDI) genutzt (VDI 2000). Dabei werden für jede Versorgungsvariante sämtliche Ein- und Auszahlungen, die für verschiedene Technologien der Wärmeerzeugung innerhalb der Nutzungsdauer anfallen, gleichmäßig über den Betrachtungszeitraum verteilt und in einer jährlichen Zahlung, der Annuität, zusammengefasst. Die Anwendung eines Kalkulationszinses berücksichtigt Opportunitätskosten der Investitionen. Mithilfe einer angenommenen Inflationsrate werden die Kosten und Erlöse auf ein heutiges Preisniveau abgezinst und so untereinander vergleichbar gemacht. Mittels spezifischer Preisänderungsraten für einzelne Kostenpositionen werden erwartete zukünftige Marktentwicklungen berücksichtigt. Folgende Kosten- und Erlöskomponenten werden gesondert in der Annuitätenmethode ausgewiesen:

- Kapitalgebundene Kosten: Anlageninvestition, Nebenkosten und Ersatzinvestitionen,
- betriebsgebundene Kosten: Wartung und Instandhaltung,
- verbrauchsgebundene Kosten: Brennstoff- und Hilfsenergiekosten,
- Erlöse von Koppelprodukten, wie beispielsweise elektrischer Strom in wärmegeführten KWK-Anlagen.

Die Annuitäten der Erlöse von Koppelprodukten werden als Gutschrift von den Kostenannuitäten abgezogen. So ergibt sich für jedes Szenario eine Kostenannuität zur Wärmeproduktion. Um für die Erzeugerszenarien Wärmegestehungskosten (Euro/kWh_{th}) zu berechnen, werden diese Kostenannuitäten durch die durchschnittlichen jährlichen Wärmemengen des jeweiligen Erzeugerszenarios geteilt (Kost et al. 2013). Die so errechneten Wärmegestehungskosten stellen naturgemäß eine Abstraktion der Realität dar und sind nicht unmittelbar mit den Wärmegestehungskosten, die im Betrieb eines Wärmeerzeugers erlebt werden, vergleichbar. Vielmehr dienen sie dazu, unterschiedliche Erzeugerszenarien und ihre spezifischen Abhängigkeiten von Einflussfaktoren zu bewerten und in einer leicht zu interpretierenden Zahl abzubilden. Die mit der Annuitätenmethode eingenommene Perspektive einer ex ante Investitionsrechnung entspricht der Zielsetzung des Projektes potenzielle zukünftige Ausgestaltungsvarianten der urbanen Wärmeversorgung zu bewerten.

Die berücksichtigten Kosten- und Erlöskomponenten werden im Folgenden kurz skizziert. Die Datengrundlagen für die Investitions- und Betriebskosten, die Brennstoffkosten, sowie die Preisänderungsraten und kalkulatorischen Zinssätze finden sich im Anhang ab Seite 42.

Ein entscheidender Faktor bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Wärmeerzeugungstechnologien sind die anfänglich anfallenden Investitions-, Planungs- und Installationskosten. Diese Kosten werden in den **kapitalgebundenen Kosten** zusammengefasst und als jährliche Abschreibung über den Betrachtungszeitraum abgebildet. In die kapitalgebundenen Kosten fließen auch die Zinsen auf Fremdkapital sowie kalkulatorische Zinsen auf das aufgebrachte Eigenkapital ein. Sollte die erwartete Nutzungs-

dauer einer Technologie kleiner sein als der Betrachtungszeitraum, wird der Barwert zukünftig notwendiger als Ersatzinvestition zu den kapitalgebundenen Kosten addiert. Übersteigt die Nutzungsdauer einer Technologie den Betrachtungszeitraum, wird der Barwert des Restwerts von den kapitalgebundenen Kosten abgezogen. Dabei wird nicht genauer festgelegt, ob Anlagen mit einer Restlaufzeit tatsächlich noch verkauft oder anderweitig genutzt werden können. Vielmehr wird auch dieser Aspekt nur kalkulatorisch einbezogen.

Über den Betrachtungszeitraum fallen für jede Erzeugertechnologie darüber hinaus **Kosten für den Betrieb** der Anlage an. Diese beinhalten Personal-, Wartungs- und Instandhaltungskosten. Für manche Technologien, wie BHKW, stehen Betriebskosten in direkter Abhängigkeit zu den erzeugten Energiemengen, was sich auch in entsprechenden laufzeitgebundenen Wartungsverträgen widerspiegelt. Bei anderen Technologien entstehen Kosten unabhängig von den erzeugten Energiemengen, beispielsweise bei den Reinigungskosten von PV-Anlagen.

Eine zusätzliche wichtige Kostenkomponente sind die **verbrauchsgebundenen Kosten**, die sowohl die Kosten für den Primärenergieverbrauch als auch die Kosten für die benötigte Hilfsenergie der Erzeugertechnologien abbilden. Die erwarteten Preisentwicklungen der jeweiligen Brennstoffe und von Strom als Hilfsenergie werden in der Annuität der verbrauchsgebundenen Kosten gebündelt. Bei hohen Anteilen der verbrauchsgebundenen Kosten an den gesamten Kosten können die Preisänderungsraten über die Lebensdauer einen großen Einfluss auf die Wärmegestehungskosten haben. So ist beispielsweise für die noch in Entwicklung befindliche Herstellung von synthetischem Gas eine größere negative Preisentwicklung angesetzt. Sofern in einem der betrachteten Szenarien Strom durch ein BHKW oder eine PV-Anlage bereitgestellt wird, ist es möglich die potenzielle Eigenstromnutzung in den verbrauchsgebundenen Kosten zu berücksichtigen. Dazu werden die Stromgestehungskosten für die stromerzeugenden Anlagen errechnet, um damit zum Eigenverbrauch bereitgestellte Strommengen zu bewerten.

Bei BHKW und PV-Anlagen werden durch die Vermarktung bzw. die Stromeinspeisung Erlöse erzielt, die die Wirtschaftlichkeit dieser Technologien positiv beeinflussen. Aus den Erlösen wird mit einem preisdynamischen Annuitätenfaktor eine jährliche Einzahlung berechnet, die von den summierten Kostenannuitäten abgezogen wird.

Als Input für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung dienen die Ergebnisse der modellbasierten technisch-energetischen Simulation. Die Simulation liefert die Eingangsparameter, die für die Wirtschaftlichkeitsbewertung genutzt werden. Dazu gehören:

- Erzeugertechnologie und thermische und elektrische Anlagenleistung,
- verbrauchte Brennstoffmengen pro Jahr,
- verbrauchte Strommengen pro Jahr (Netzbezug und aus der Eigenerzeugung von anderen Anlagen im System),
- erzeugte Wärmemengen, sowie
- Strommengen (zur Netzeinspeisung und zur Eigennutzung durch andere Anlagen im System).

Dieses Vorgehen ermöglicht die potenzielle Nutzung von Eigenstrom aus BHKW oder PV abzubilden und die resultierenden Effekte auf die Wirtschaftlichkeit des Szenarios zu untersuchen.

Für die Ermittlung der Kosten der energetischen Gebäudesanierung als eine Säule der Wärmeversorgung im Sinne einer verbesserten Gebäudeeffizienz werden die aktuellen Kosten für verschiedene Sanierungsmaßnahmen an mehreren Gebäudeteilen zusammengetragen und mit den in Kapitel 5.1 beschriebenen Szenarien zur Entwicklung der Energieeffizienz im Gebäudebestand verrechnet. Zu den betrachteten Sanierungsmaßnahmen gehören:

- Dämmung der Außenwand (Wärmedämmverbundsystem),
- Dämmung der obersten Geschossdecke,

- Dämmung des Dachs,
- Dämmung der Kellerdecke (unterseitig),
- Austausch von Fenstern,
- Austausch von Heizkörpern inklusive hydraulischen Abgleich.

Die relevanten Kostendaten wurden dem Baupreislexikon entnommen (F:DATA GMBH 2019). Diese Datenbank ermöglicht eine Anpassung der Dämmstoffe und Dämmstärken auf die in Kapitel 5.1 vorgestellten Annahmen zu den Sanierungsszenarien. Zugleich erlaubt die Datenbank den Abruf regionalspezifischer Kostendaten für das Land Berlin. Für Beispielgebäude erfolgte ein Abgleich der sich in der Summe ergebenden Investitionskosten mit Werten aus Kostenrechnern. Die auf Basis der Angaben im Baupreislexikon errechneten Werte fallen etwas geringer aus. Gründe können darin liegen, dass Besonderheiten wie Erker, Balkone etc., die eine Sanierung verteuern können, nicht berücksichtig sind. Aus diesem Grund erfolgte ein pauschaler Aufschlag von 15 Prozent auf die Sanierungskosten.

5.3.2 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

Ende des letzten Jahres haben sich Bund und Länder auf einen CO_2-Preis geeinigt, der ab 2021 auch im Wärmesektor gezahlt werden muss, wenn fossile Energieträger wie Erdgas und Heizöl als Brennstoffe eingesetzt werden. Der CO_2-Preis soll im Jahr 2021 zunächst auf 25 Euro pro Tonne festgelegt werden, danach gilt eine schrittweise Anhebung auf bis zu 55 Euro pro Tonne im Jahr 2025 an. Lang-

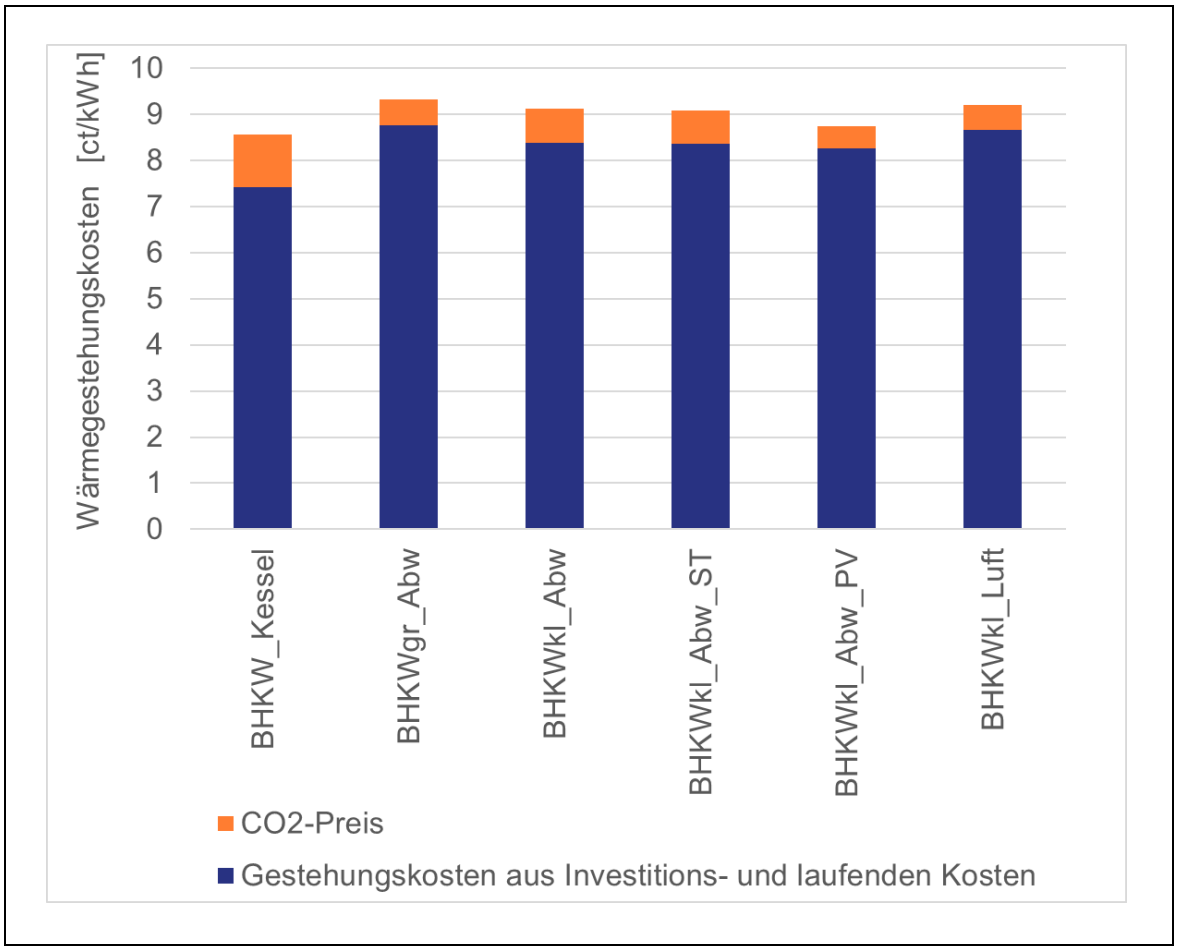


Abb. 5.2: Wärmegestehungskosten verschiedener Wärmeversorgungsysteme
Quelle: IÖW, eigene Berechnung und Darstellung

fristig wird ein Preiskorridor von mindestens 55 und höchstens 65 Euro angestrebt. Diese vorgeschriebene Entwicklung eines CO_2-Preises wurde in den Berechnungen berücksichtigt, es werden jedoch auch die Ergebnisse der Gesamtkosten und Wärmegestehungskosten ohne CO_2-Preis ausgewiesen.

Seit Januar 2020 vergibt die BAFA eine Förderung auch für Wärmepumpen mit einer Leistung von mehr als 100 kW_{th}. Die Förderung weist einen Umfang von 35 Prozent der förderfähigen Kosten auf. Diese ist ebenfalls in der Berechnung der Wärmegestehungskosten berücksichtigt.

Ohne CO_2-Preis liegen die Wärmegestehungskosten der Wärmeversorgungskonzepte mit Abwasserwärme deutlich über dem aktuellen Versorgungskonzept bestehend aus Gas-Kessel und BHKW (s. Abb. 5.2). Der Ersatz des kleinen BHWK durch ein größeres BHWK würde zu einer weiteren Zunahme der Wärmegestehungskosten führen.

Durch den CO_2-Preis verbessert sich die Wettbewerbsfähigkeit der Wärmeversorgungssysteme mit Abwasserwärme zwar, im Vergleich zu einer rein fossilen Wärmeversorgung mit Gas-Kesseln und BHKW sind die Wärmegestehungskosten der Abwasserwärme immer noch höher – auch unter Berücksichtigung der seit 2020 geltenden Förderung der BAFA für große Wärmepumpen.

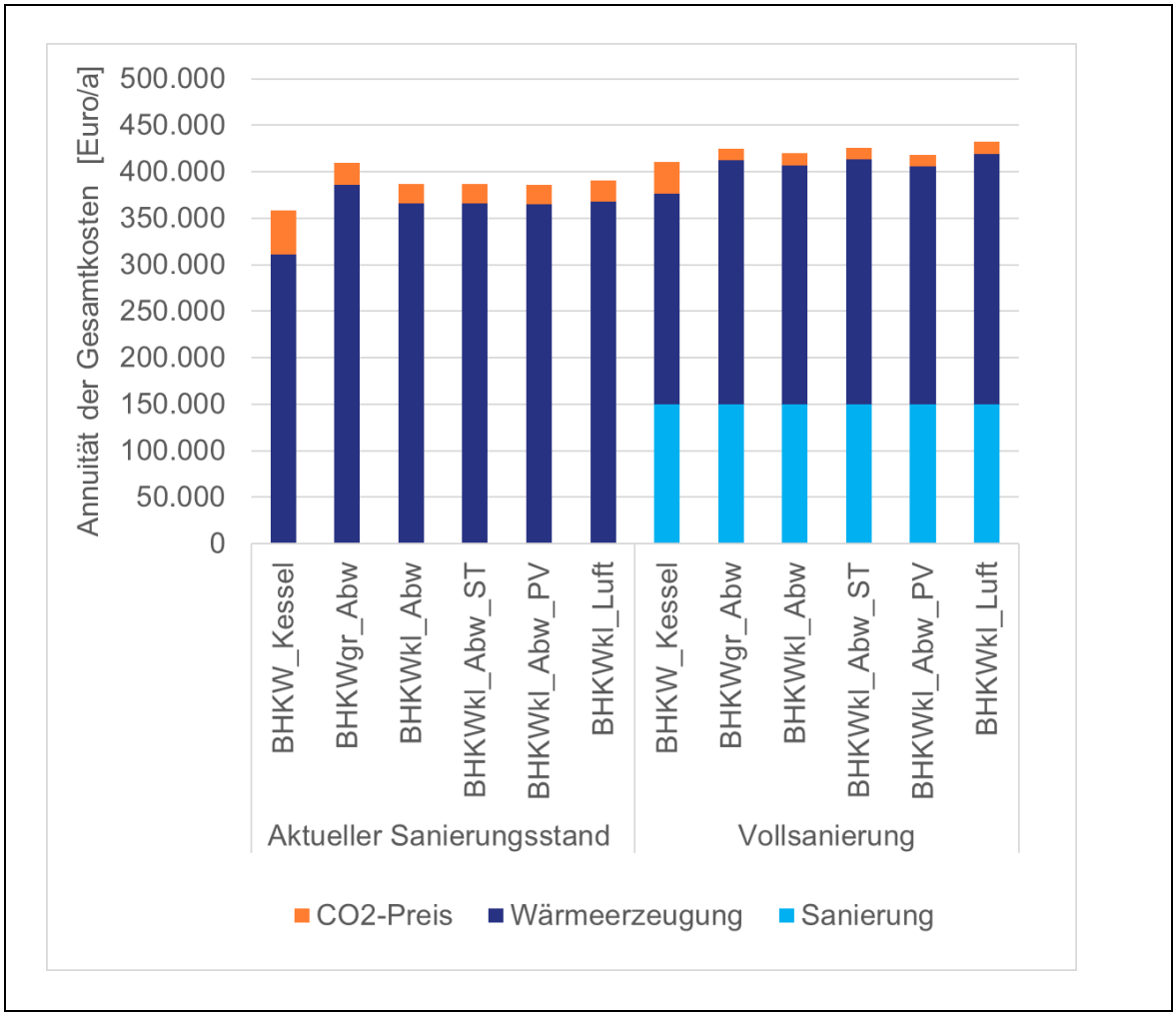


Abb. 5.3: Gesamtkosten (Annuitäten) verschiedener Wärmeversorgungsysteme
Quelle: IÖW, eigene Berechnung und Darstellung

Wird das Sanierungsszenario Vollsanierung umgesetzt, so liegen die Wärmegestehungskosten inklusive CO_2-Preis bei den Versorgungssystemen mit Abwasserwärme gleichauf beziehungsweise geringfügig unter denen des Versorgungssystems mit Gas-Kesseln und BHKW. Das Wärmeversorgungssystem mit Luftwärmepumpe weist wegen der geringeren Effizienz jedoch höhere Wärmegestehungskosten auf als das Versorgungssystem mit Abwasserwärmepumpe und als das fossile Versorgungssystem. Ohne CO_2-Preis liegen die Wärmegestehungskosten aller Wärmeversorgungsoptionen mit Wärmepumpen über denen des fossil-basierten Konzepts mit Gas-Kesseln und BHKW.

Hinzu kommen in den Szenarien mit Sanierung die Kosten aus der energetischen Sanierung. Ein Vergleich der Szenarien ist anhand der Gesamtkosten bestehend aus den Kosten für die Wärmeerzeugung, dem CO_2-Preis und den Kosten aus der energetischen Sanierung möglich (s. Abb. 5.3). Die Gesamtkosten im Szenario Vollsanierung liegen über denen im Szenario ohne Sanierung.

In der Abb. 5.3 sind die Gesamtkosten ohne Förderung dargestellt. Die Gesamtkosten der Wärmeversorgungssysteme mit Abwasserwärme sind hier merklich höher als die der Konzepte mit Gas-Kesseln und BHKW. Ohne die Förderung der BAFA führt eine Abwasserwärmenutzung somit zu höheren Gesamtkosten eines gebäudeübergreifenden Wärmeversorgungskonzeptes. Dies ist insofern wichtig, als dass Wasser/Wasser-Wärmepumpen eine Jahresarbeitszahl von mindestens 3,8 erreichen müssen, um die Förderung zu erhalten. Die Simulation der Wärmekonzepte weist jedoch auf geringere Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen hin, vermutlich wegen der hohen Temperaturanforderungen der Bestandsgebäude. Eine andere Möglichkeit für eine Umsetzungsförderung ist der „Förderaufruf für investive Kommunale Klimaschutz-Modellprojekte im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (NKI) des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU)“. Das Programm gewährt im Falle des Zuschlags einen Zuschuss von 70 Prozent der förderfähigen Kosten. Ein Zuschuss in dieser Höhe senkt die Wärmegestehungskosten um etwa 0,5 ct, was gemeinsam mit dem CO_2-Preis dazu führt, dass die Wärmegestehungskosten der Wärmeversorgungsysteme mit Abwasserwärme geringer sind als die des Wärmeversorgungskonzepts mit Gas-Kesseln und BHKW.

5.4 Ökologische Bewertung

5.4.1 Vorgehen bei der ökologischen Bewertung

Als Methode für die Umweltbewertung kommt die Ökobilanzierung (oder Life Cycle Assessment (LCA)) zum Einsatz. Das Vorgehen orientiert sich an der Ökobilanz-Norm (DIN EN ISO 14040). Ziel ist es, Erkenntnisse zur Umweltperformance verschiedener Wärmeversorgungskonzepten zu gewinnen. Im Zuge der Studie wird vornehmlich auf generische Daten aus Datenbanken zurückgegriffen.

Funktionelle Einheit ist eine Kilowattstunde Wärme. Da BHKW sowohl Wärme als auch Strom bereitstellen, bedarf es eines Allokationsverfahrens zur Aufteilung der Input- und Outputflüsse auf diese beiden Produkte (DIN EN ISO 14040; Klöpffer und Grahl 2009). Als Allokationsverfahren wird die Carnot-Methode gewählt, die neben dem thermischen und elektrischen Wirkungsgrad die exergetische Wertigkeit von Strom (festgesetzt auf 1) und Wärme berücksichtigt.

Räumlich beziehen sich die Ökobilanzen auf den deutschen Raum. Zeitlicher Bezug ist zunächst der Status quo (bzw. das Jahr 2018), das heißt es werden die aktuell gültigen rechtlichen, technischen und energiewirtschaftlichen Rahmenbedingungen unterstellt und Datensätze mit möglichst aktuellem Referenzjahr verwendet. Die Wirkungsabschätzung erfolgt nach der CML-Methode, einer wissenschaftlich anerkannten Methode, die durch das CML Institute of Environmental Science, University of Leiden entwickelt wurde und regelmäßig aktualisiert wird. Die Methode zählt zu den Midpoint-Ansätzen, die über die jeweiligen Wirkungsindikatoren die potenziellen Veränderungen des Umweltzustandes quantitativ beschreiben. Für die Ökobilanzierung wird die Software Simapro 9.0 eingesetzt, in der die CML-Methode (CML-IA baseline, Version 4.7) standardmäßig genutzt werden kann. Die in Simapro 9.0 integrierte Methodologie bezieht sich auf das in 2016 durch das CML veröffentlichte Daten-Set (siehe CML

2016), wobei in späteren Jahren umgesetzte Anpassungen und Aktualisierungen (z.B. eine Aktualisierung der Charakterisierungsfaktoren) ebenfalls integriert sind. Insgesamt gibt die Methode Ergebnisse zu den Wirkungskategorien Klimaerwärmung, Versauerung, Eutrophierung, Ozonabbau, Photochemische Ozonbildung, Humantoxizität, Ökotoxizität, Verknappung von abiotischen Ressourcen (Stoffe) und Verknappung von abiotischen Ressourcen (fossile Energieträger) aus.

Die folgende Auswertung beschränkt sich auf die Wirkungskategorie Klimaerwärmung. Der anthropogene Treibhauseffekt resultiert aus einer steigenden Konzentration von Treibhausgasen, vor allem Kohlenstoffdioxid, Methan und Lachgas, in der Atmosphäre. Für die Charakterisierung wird das Global Warming Potential (GWP) erfasst, das in CO_2-Äquivalenten (CO_{2eq}) angegeben wird. Da die Verweildauern der Gase unterschiedlich sind, hängen die Äquivalenzfaktoren vom Zeitbezug ab. Es wird ein Zeitbezug von 100 Jahren gewählt (GWP 100).

Für die Ökobilanzierung werden Daten aus verschiedenen Quellen genutzt. Für die objektbezogenen Wärmeerzeugungsanlagen (Herstellung, Transport, Entsorgung inklusive Recycling und Nutzung) wird die Online-Datenbank ÖKOBAUDAT verwendet. Daten für die Herstellung und Entsorgung von Wärmepumpen werden ebenfalls der ÖKOBAUDAT entnommen und auf größere Anlagen extrapoliert. Für die Nutzung der Wärmepumpen werden die Stromverbräuche, die sich aus der energetischen Simulation ergeben mit dem Stromemissionsfaktor des jeweiligen Jahres kombiniert. Bei den Daten der ÖKOBAUDAT ist standardmäßig eine Geltungsdauer der eingereichten Daten angegeben und es ist eine regelmäßige Aktualisierung der Daten vorgesehen (BBSR 2019). Für alle Datensätze, die für die vorliegende Arbeit aus der ÖKOBAUDAT entnommenen wurden, ist als Referenzjahr das Jahr 2017 angegeben mit einer Gültigkeit bis 2021. Die zeitliche Repräsentativität der Datensätze ist der jährliche Durchschnitt. Für die BHKW werden generische Datensätze aus der Datenbank Ecoinvent 3.5 für Herstellung und Entsorgung genutzt und mit Aufwendungen für den Transport kombiniert.

Der deutsche Strommix, das heißt die Zusammensetzung einer Kilowattstunde Strom, für das Jahr 2018 ist vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE) (2019) übernommen und wurde mit den in Ecoinvent 3.5 enthaltenen Datensätze zur Stromproduktion aus Einzeltechnologien in Simapro modelliert. Da die Datensätze für Deutschland teilweise älteren Datums (z. B. 2011 für Steinkohle-Kraftwerke) sind, wurde der jeweilige Wirkungsgrad für fossile Kraftwerke (Erdgas, Steinkohle, Braunkohle) an den durch das UBA veröffentlichten durchschnittlichen Brutto-Wirkungsgrad aus dem Jahr 2018 angepasst (UBA 2018), um die technologischen Verbesserungen im Erzeugerpark abzubilden. Bezogen auf den Endverbraucher (Niederspannungsnetz) ergeben sich auf dieser Datengrundlage CO_2-Emissionen in einer Höhe von 489 kg CO_{2eq}/kWh_{el} und somit eine sehr geringe Abweichung zu den durch das UBA veröffentlichten Wert von 474 kg CO_{2eq}/kWh_{el} für das Jahr 2018.

5.4.2 Ergebnisse der ökologischen Bewertung

Die Wärmeversorgung im Status quo, bestehend aus mehreren Gaskesseln und einem BHWK, hat einen durchschnittlichen CO_{2eq}-Emissionsfaktor von 243 kg CO_{2eq}/kWh. Der Emissionsfaktor wird vor allem durch die Gaskessel bestimmt. Das BHWK, das aufgrund der Strombereitstellung einen geringeren spezifischen CO_{2eq}-Emissionsfaktor aufweist (s. Tab. 8), hat aufgrund seiner geringen Größe kaum einen Einfluss. Die Abwasserwärmepumpen weisen wegen der vergleichsweisen geringen Effizienz (niedrige Jahresarbeitszahl) einen ähnlich hohen Emissionsfaktor wie das BHWK auf. Durch den über die Zeit zunehmenden Anteil erneuerbarer Energien im Strommix sinkt der CO_{2eq}-Emissionsfaktor mit der Zeit, sodass der Emissionsfaktor der Wärmepumpe bald unter dem eines Erdgas-BHKW liegen wird.

Tab. 8: CO_{2eq}-verschiedener Wärmeerzeugungsanlagen im Status quo und in 2030
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung

	CO_{2eq}-Emissionsfaktor [kg CO_{2eq}/kWh$_{th}$]	
Technologie	**Status quo**	**2030**
Erdgas-BHKW	0,13	0,13
Biomethan-BHKW	0,08	0,08
Syngas-BHKW	0,02	0,02
Gaskessel (Erdgas)	0,24	0,24
Gaskessel (Syngas)	0,05	0,05
Abwasserwärmepumpe	0,14	0,11
Solarthermie	0,04	0,04

Die Nutzung von Abwasserwärme führt in dem Beispielquartier zu einer Senkung der CO_{2eq}-Emissionen um 25 bis 30 Prozent – wenn nur der Erzeugerpark geändert wird und keine energetische Sanierung der Gebäude stattfindet. Erfolgt zusätzlich eine Vollsanierung der Gebäude, so liegt die Reduktion bei 50 Prozent. Die Reduktion wird außerdem mit zunehmendem Anteil an erneuerbaren Energien im Stromsektor größer und steigt dadurch bei kontinuierlichem Ausbau von Wind und PV jedes Jahr an.

Für die Frage der Kosteneffizienz, ist die Kennzahl der CO_2-Vermeidungskosten oder der vermiedenen CO_{2eq}-Emissionen pro Euro interessant. Letztere stellt die durch ein Wärmeversorgungskonzept im Vergleich zum Status quo vermiedenen CO_{2eq}-Emissionen ins Verhältnis zur Gesamt-Annuität des Versorgungssystems. Ein Versorgungssystem mit größer dimensioniertem BHKW in Kombination mit einer Abwasserwärmepumpe weist dabei einen günstigeren Wert auf als ein kleiner dimensioniertes BHKW in Kombination mit einer Abwasserwärmepumpe. Zudem wirkt sich eine Kombination der Wärmepumpe mit PV-Anlagen günstig aus, da ein Eigenverbrauch an PV-Strom den durchschnittlichen CO_{2eq}-Emissionsfaktor des Stromes senkt. Allerdings lassen sich in dem Beispielquartier nur mehrere recht kleine PV-Anlagen realisieren. Die Berechnung ist an dieser Stelle daher theoretischer Natur, da ein Eigenverbrauch wie in der Simulation erfasst nach aktueller Regulierung aufgrund der Inanspruchnahme des öffentlichen Stromnetzes nicht möglich wäre.

Zuletzt zeigen die Ergebnisse, dass die energetische Sanierung ein kosteneffizienter Weg ist, um die CO_{2eq}-Emissionen zu reduzieren (s. Abb. 5.5). So steigt die Kennzahl der vermiedenen CO_{2eq}-Emissionen pro Euro mit zunehmenden Sanierungsumfang und zunehmender Sanierungstiefe an.

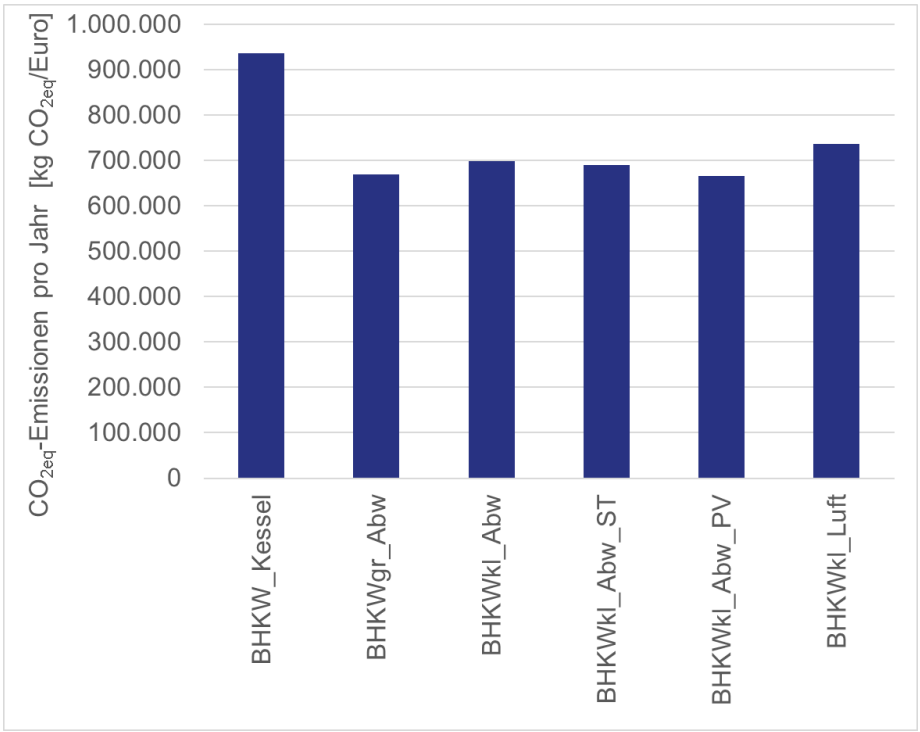


Abb. 5.4: CO_{2eq}-Emissionen verschiedener Wärmeversorgungsysteme
Quelle: IÖW, eigene Berechnung und Darstellung

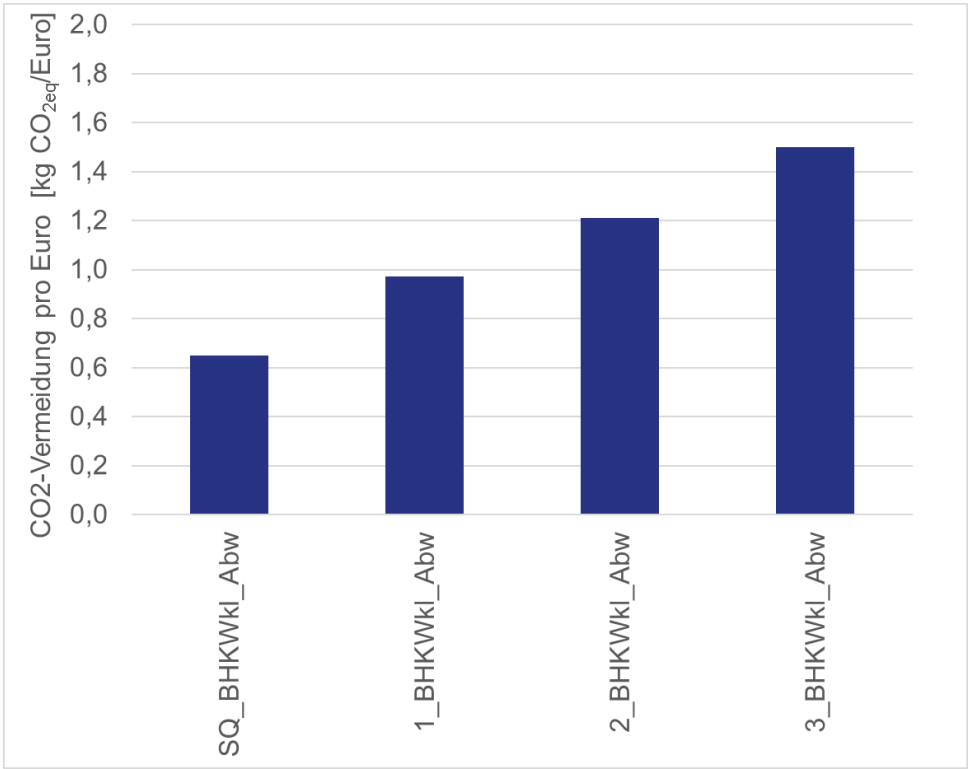


Abb. 5.5: CO_{2eq}-Vermeidung pro Euro verschiedener Wärmeversorgungsysteme
Quelle: IÖW, eigene Berechnung und Darstellung

5.5 Resilienz-Bewertung

Resilienz beschreibt die Fähigkeit eines Systems, seine Leistungsfähigkeit auch unter Stress und unter turbulenten Bedingungen aufrechtzuerhalten (von Gleich et al. 2010). Ein resilientes Energiesystem liefert zuverlässig Energie für die verschiedenen nachgefragten Dienstleistungen wie Licht, Wärme und Fahrzeugantrieb, selbst wenn äußere Störungen oder innere Ausfälle das System belasten. Resiliente Energiesysteme sind vom Design her besonders gut auf Überraschungen und Unvorhergesehenes vorbereitet und reagieren adäquat auf Störungen. Das Bewertungskriterium „Resilienz“ überprüft, wie sich die Resilienz steigernden Strukturen und Funktionalitäten (Designprinzipien) bei der Transformation des Energiesystems verändern. Diese Designprinzipien sind abgeleitet aus Erfahrungswerten aus evolutionär erprobten Ökosystemen, Risikomanagement und bewährten Maßnahmen zum Schutz kritischer Infrastrukturen. Ihre Berücksichtigung fördert und gestaltet auf vielfältige Art und Weise die Widerstands-, Anpassungs-, Innovations- und Improvisationsfähigkeit der betreffenden Systeme (Goessling-Reisemann und Thier 2019). Im Folgenden wird eine indikatorbasierte Bewertungsmethode für die Resilienz steigernden Strukturen und Funktionalitäten, Diversität, Redundanz, lose und optionale Kopplungen sowie Subsidiarität vorgestellt und deren Anwendung auf die Versorgungsszenarien für das Betrachtungsgebiet Klausenerplatz gezeigt.

5.5.1 Vorgehen bei der Resilienz-Bewertung

Das methodische Vorgehen wird an dieser Stelle nur in Kürze beschrieben, eine ausführlichere Darstellung findet sich in Mitzinger et al. (2020).

Die Diversität eines Systems kann nach Stirling (2007) durch drei Kategorien beschrieben werden: Varietät (Anzahl an Optionskategorien im System), Balance (Verteilung der Systemelemente über die Optionskategorien) und Disparität (Verschiedenheit der Optionskategorien zueinander). Diversität trägt aufgrund der zugrundeliegenden Vielfalt zur evolutionären Innovationsfähigkeit von Systemen bei (Peterson et al. 1998; Molyneaux et al. 2016). Des Weiteren ist die Optionenvielfalt eines Systems hilfreich, um Pfadabhängigkeiten zu vermeiden (Farrell et al. 2004). Funktionelle und strukturelle Diversität wird durch eine entsprechende Auswahl und Anordnung von Erzeugungs-, Konversions-, Verteilungs-, Speicher-, Steuerungs-, und Kommunikationstechnologien sowie der dazugehörigen Ressourcen erreicht. Zur Quantifizierung der Diversität sind Bewertungsmethoden wie der Shannon-, Gini- oder Stirling-Index etabliert (Stirling 2010; Binder et al. 2017). In dieser Arbeit wird der Stirling-Index als Quantifizierungsmetrik ausgewählt, da dieser sowohl die Vielfalt der Kategorien in einem System, die Ausgewogenheit der Verteilung der Elemente zwischen den verschiedenen Kategorien und die Disparität, das heißt die Unähnlichkeit zwischen den Kategorien, berücksichtigt (Stirling 2010).

Unter Redundanz versteht man die Dopplung oder das mehrfache Vorhandensein von gleichartigen Systemkomponenten. Bei Ausfall einer Komponente wird der Betrieb nicht beeinträchtigt, wenn eine andere Komponente die Funktion wirksam substituiert (N-1 Prinzip) (Biggs et al. 2012). Physische Redundanz wirkt somit widerstandserhöhend gegenüber einem (Stör-)Ereignis und fördert in erster Linie die Resilienz des Systems, da selbst bei einem Ausfall einer oder mehrerer relevanter Komponenten eine stabile und sichere Systemleistung gewährleistet werden kann. Die gesicherte installierte Leistung des Systems sollte daher den maximalen prognostizierten Leistungsbedarf um einen möglichst großzügigen Faktor übertreffen, damit selbst bei Anlagenausfällen oder bei Spitzenlast ausreichend Back-up-Kapazitäten verfügbar bleiben. Zur Bewertung der Redundanz eines Systems wurde eine probabilistische Risikoanalyse unter Berücksichtigung eines schrittweisen Ausfalls von Einheiten durchgeführt. Zu diesem Zweck wird das Versorgungsrisiko R_i bei fortschreitendem Ausfall von Einheiten berücksichtigt. Das Versorgungsrisiko ergibt sich aus dem Produkt des Versorgungsdefizits in der Kombination aus ausfallenden Einheiten und der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Ausfallkombination.

Beim Gestaltungsprinzip „Lose Kopplung“ wird zwischen Kopplungen unterschieden, bei denen eine Trennung vorgesehen und vorbereitet ist (lose Kopplungen) und bei denen eine Auflösung nicht vorgesehen ist (starre Kopplung) (Perrow 2011). Ein Vorteil loser Kopplungen ist, dass im Störfall kaskadierende Fortsetzungen von Störungen verhindert werden können. Lose Kopplungen erlauben also eine schnelle Isolierung im Schadensfall (Lovins und Lovins 1982; Gershenson et al. 2003). Die Beurteilung, ob Kopplungen lose oder fest sind, wurde durch eine Analyse der Abhängigkeiten von Versorgungstechnologien und zugehörigen Infrastrukturen bestimmt. Kann ein Wärmeerzeuger mit mehr als einer Energiequelle versorgt werden, wobei eine davon unabhängig von zusammenhängenden Infrastrukturen ist, so gelten die Kopplungen als lose. Beispiele hierfür sind Wärmepumpen, die sowohl mit Netzstrom als auch durch PV oder BHKW erzeugten Strom versorgt werden können. Ausschlaggebend für die Kopplung eines Systems ist die Anzahl der möglichen Optionen des Systems. Als Indikator für die Bewertung dient das Verhältnis der bereitgestellten Wärmeenergie E_l aus lose gekoppelten Anlagen zur gesamten bereitgestellten Wärmeenergie E_{ges} eines Jahres. Im oberen Sinne als lose gekoppelte Anlagen gelten Heizkessel, die durch Kohle, Biomasse oder Öl befeuert werden können oder Solarthermische und Wärmepumpen-Anlagen, die sowohl über eine lokale Stromversorgung (PV-Anlagen oder KWK) auch über Strom aus dem vorgelagerten Netz betrieben werden können.

5.5.2 Ergebnisse der Resilienz-Bewertung

In Abb. 5.6 sind die Ergebnisse der Diversitätsbewertung der Wärmeversorgungskonzepte anhand des Stirling-Index dargestellt. Die Untersuchung der Fallbeispiele zeigt, dass die Verwendung von Strombasierter Wärmeerzeugung mittels Wärmepumpen die Diversität in allen Versorgungvarianten im Vergleich zur konventionellen BHKW/Gaskessel Versorgung deutlich erhöht. Die zusätzliche Nutzung von

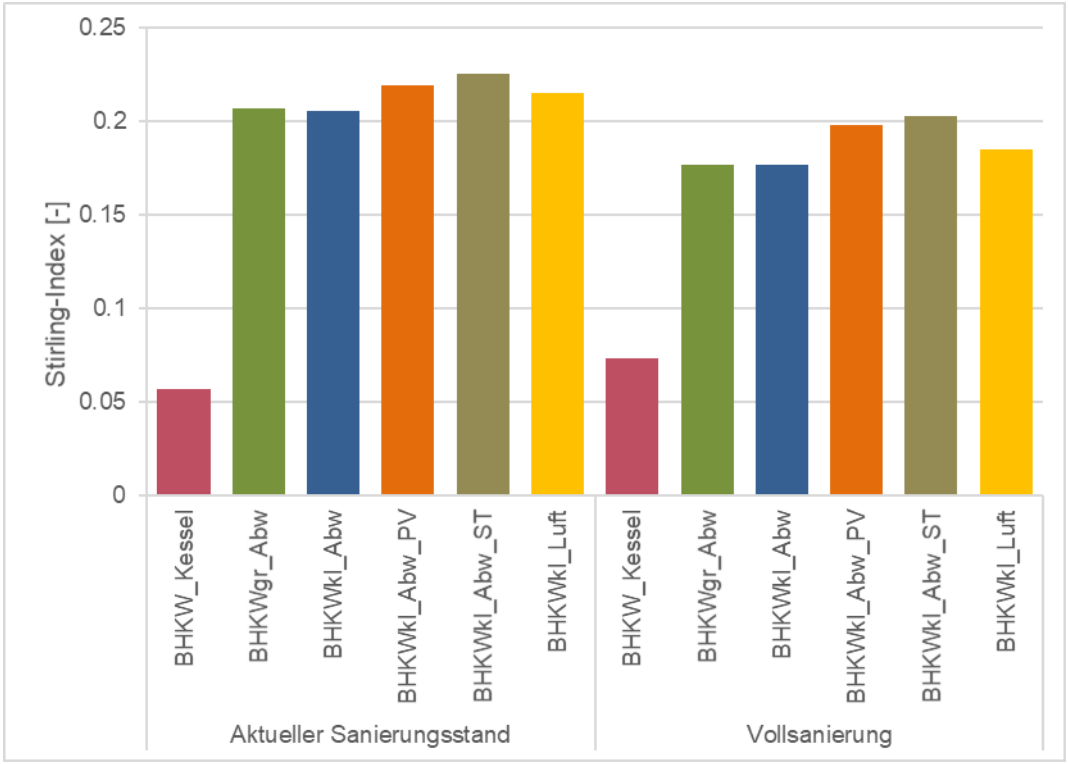


Abb. 5.6: Vergleich des Stirling-Index zur Bewertung der Diversität verschiedener Erzeugerszenarien unter Berücksichtigung der Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungsstand“ und „Vollsanierung“

Quelle: Universität Bremen, eigene Berechnung und Darstellung auf Grundlage der Simulationsergebnisse des IÖW

Sonnenenergie durch PV- bzw. Solarthermie-Anlagen führt in beiden Verbrauchsszenarien zu einer weiteren Steigerung der Diversität. Beim Vergleich der Verbrauchsszenarien untereinander reduziert sich die Diversität in allen Szenarien bei Vollsanierung mit Ausnahme der konventionellen Referenzvariante „BHKW_Kessel“. Ursache ist hierbei der gesteigerte Energieanteil, der durch die Wärmepumpe und den solaren Energiequellen gedeckt werden kann. Der Anteil der fossilen Wärmebereitstellung kann dabei stark reduziert werden, was aus ökologischer Sicht zu bevorzugen ist. Um die Resilienz des Systems zu erhalten, sollten die Anteile verschiedener erneuerbaren Energiequellen soweit gesteigert werden, dass die Diversität weiterhin hoch bleibt. Ansatzpunkte wären biogene Brennstoffe einzusetzen, auf verschiedene Wärmepumpen-Technologien bzw. Wärmequellen zu setzen oder – sofern die Rahmenbedingungen in einem Quartier dies erlauben – den solaren Anteil weiter zu erhöhen (im Beispielquartier sind die Möglichkeiten hier begrenzt).

In Abb. 5.7 sind die Ergebnisse des Redundanz-Index der Wärmeversorgungskonzepte der beiden Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungszustand“ und „Vollsanierung“ dargestellt. Da es sich um das Versorgungsrisiko in kWh handelt, bedeuten größere Werte ein größeres Versorgungsrisiko. Ausgehend vom derzeitigen Anlagenbestand (Erzeugungsszenario „BHKW_Kessel“) führt die zusätzliche Installation von Wärmepumpenkapazitäten (Abwasser-Wärmepumpe) zu einer Steigerung der Redundanz in beiden Verbrauchsszenarien. Das Risiko der Unterversorgung verringert sich in diesem Fall. Die zusätzlichen Wärmepumpen-Kapazitäten führen im aktuellen Sanierungszustand sogar zum Erreichen des n-2 Kriteriums, das heißt es können zu jedem Zeitpunkt im Jahr zwei Anlagen ausfallen, ohne dass es zu einer Unterversorgung kommen könnte. Im Verbrauchsszenario „Vollsanierung“ liegen die

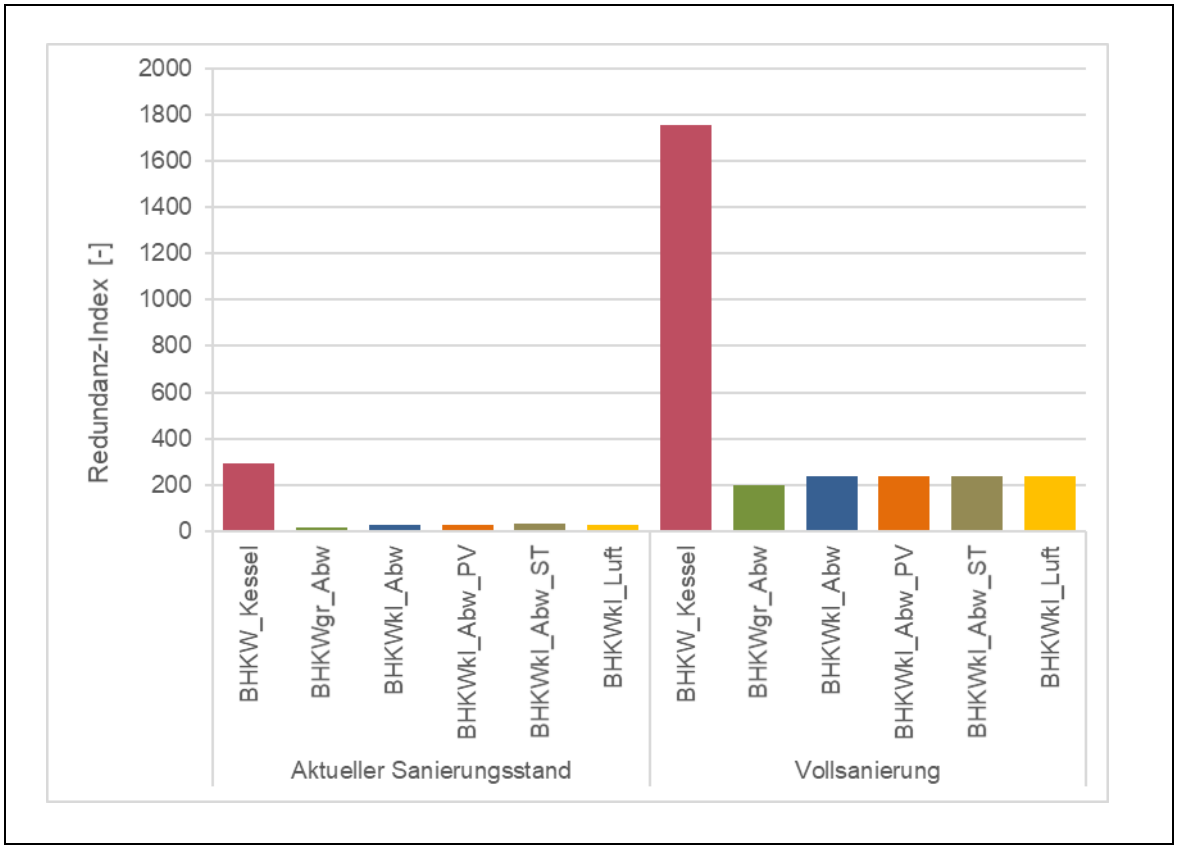


Abb. 5.7: Darstellung des Redundanz-Index der Erzeugerszenarien für den aktuellen Sanierungszustand und bei Vollsanierung

Quelle: Universität Bremen, eigene Berechnung und Darstellung auf Grundlage der Simulationsergebnisse des IÖW

Werte des Redundanz-Index in allen Varianten über dem des aktuellen Sanierungszustandes, da hier bei der Konzeptionierung aufgrund des gesunkenen Wärmebedarfs weniger Gasspitzenlastkessel vorgesehen sind. Daher steigt der Redundanz-Index zwar leicht an, führt allerdings nicht zu einer Verletzung des n-1 Kriteriums. Grundsätzlich wurde die Installation von Redundanzen in ausreichender Form in allen Varianten berücksichtigt. Das Risiko der Unterversorgung liegt auf einem sehr niedrigen Niveau. In diesem Bereich ergibt sich aus Sicht der Resilienz keine Handlungsempfehlung.

Ein klarer Trend zeichnet sich bei der Betrachtung der Wärmemengenanteile aus lose gekoppelten Anlagen ab (s. Abb. 5.8). Lediglich in den Varianten „BHKWkl_Abw_PV“ und „BHKWkl_Abw_ST“ tragen lose gekoppelte Anlagen zur Wärmebereitgestellung bei. Dabei liegen die Anteile in dem Verbrauchsszenario „Vollsanierung“ um einige Prozentpunkte höher, da bei gleichbleibenden Anlagenkapazitäten ein höherer Beitrag zur Wärmebereitstellung realisiert werden kann. Die Erzeugertechnologien Erdgaskessel und BHKW sind fest an das Gasnetz gekoppelt, während die Abwasser- und die Luftwärmepumpe ohne eine PV-Anlage an das Stromnetz gekoppelt sind. Nur falls zusätzlich zur Abwasserwärmepumpe eine PV- oder Solarthermie- Anlageinstalliert ist, kann ein Teil der Wärme infrastrukturunabhängig bereitgestellt werden. Daher empfiehlt es sich den Anteil an Wärmeerzeugern mit lose gekoppelten Erzeugungsanlagen zu erhöhen. Eine weitere Möglichkeit wäre einen Spitzenlast- bzw. Reservekessel mit einem Öl- statt einem Gaskessel zu ersetzen. Damit wäre über einen Öltank eine lose Kopplung hergestellt und die CO_2-Bilanz wegen der geringen Energiemenge zur Deckung der Spitzenlast nur minimal verschlechtert. Dennoch widerspricht dieser Ansatz dem Leitbild einer klimaneutralen Wärmeversorgung. Eine nachhaltige Alternative zum Öltank bilden erneuerbare Festbrennstoffe wie Hackschnitzel oder Pellets, deren kurz- bis mittelfristige Verfügbarkeit nicht von leitungsgebundenen Infrastrukturen (Strom und Gas) abhängen, falls die Anlagen im Inselbetrieb gefahren werden können.

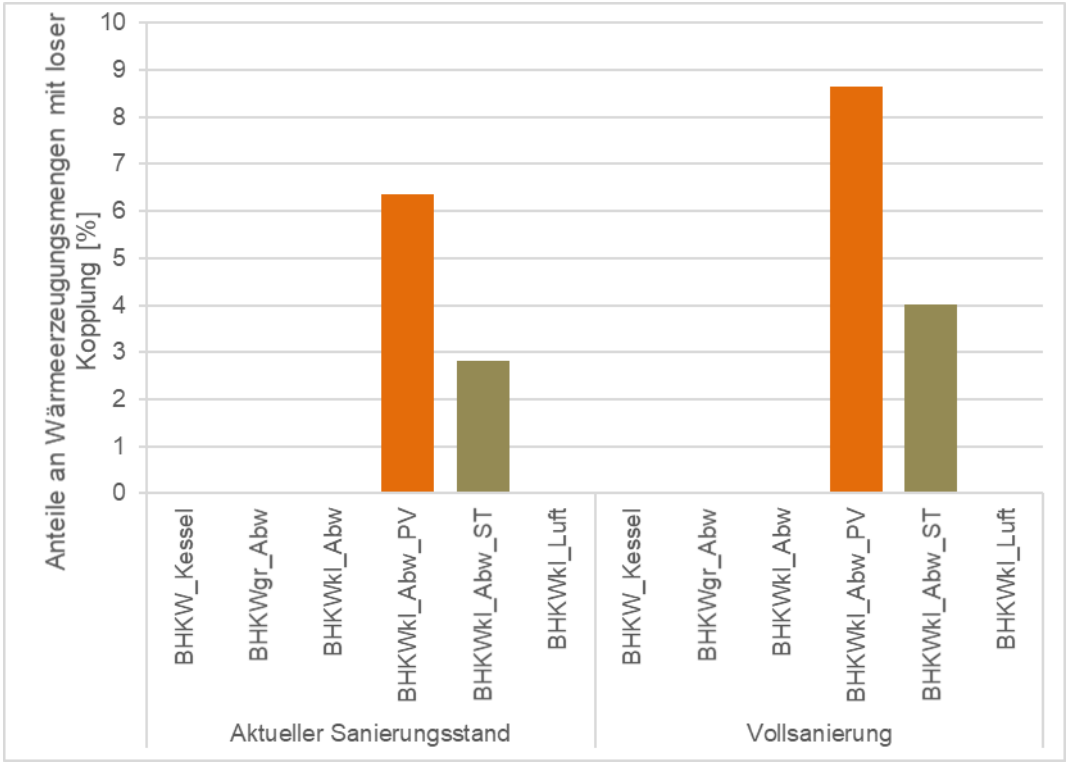


Abb. 5.8: Anteile der Wärmeerzeugungsmengen aus lose gekoppelten Anlagen in den Verbrauchsszenarien „Aktueller Sanierungszustand“ und „Vollsanierung“
Quelle: Universität Bremen, eigene Berechnung und Darstellung auf Grundlage der Simulationsergebnisse des IÖW

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Abwasser(wärme) stellt eine der wenigen nachhaltigen Wärmequellen dar, die in allen Städten und Kommunen über das ganze Jahr hinweg bereitstehen. Gleichwohl steht Abwasserwärme nicht in allen Quartieren als nutzbare Wärmequelle zur Verfügung, da die Abwasserkanäle eine hinreichende Leitungsgröße aufweisen müssen und eine Mindestdurchflussrate gewährleistet sein muss (BWB 2017a). Die Abwasserwärmepotenziale können insgesamt nur einen kleinen Anteil der Wärmeversorgung in der Stadt bedienen. In einzelnen Quartieren liegen jedoch in einem so großen Umfang Abwasserwärmepotenziale vor, dass theoretisch der gesamte Quartierswärmebedarf hierüber gedeckt werden kann. Die Simulationen für das Beispielquartier zeigen, dass in Kombination mit Spitzenlastkesseln und BHKW hohe Versorgungsanteile durch Abwasserwärme möglich sind.

Bislang werden Wärmeversorgungskonzepte mit Abwasserwärmenutzung überwiegend in Neubauten bzw. Neubaugebieten umgesetzt. Um die Abwasserwärme als eine der wenigen Wärmequellen in Städten zu nutzen, sollte jedoch auch eine Umsetzung in Bestandsgebieten erfolgen.

Die vorliegende Arbeit untersucht eine mögliche Nutzung von Abwasserwärme in einem Bestandsquartier in Berlin-Charlottenburg. Günstig mit Blick auf die Umsetzung ist der im Quartier Klausenerplatz-Kiez hohe Anteil an Gebäuden, die durch eine städtische Wohnungsbaugesellschaft verwaltet werden, sodass eine aus technischer und ökonomischer Perspektive mindestens erforderliche Anzahl an Wärmeabnehmern für eine netzgebundene Versorgung erreicht werden kann. Von Vorteil ist außerdem, dass in den in Frage kommenden Blöcken bereits ein Arealnetz und eine Heizzentrale bestehen, über das auch eine Mitversorgung umliegender Gebäude möglich ist. Die Gebäude der Wohnungsbaugesellschaft und die Heizzentrale könnten somit als Keimzelle wirken, um im Laufe der Zeit weitere Gebäude über den Block hinaus mitzuversorgen, wenn dort ein Heizungsaustausch ansteht.

Seitens der Wohnungsbaugesellschaft besteht ein Interesse an einer Nutzung der Abwasserwärmepotenziale. Um die Nutzbarkeit der theoretischen Potenziale genauer ableiten zu können bedarf es nun einer Machbarkeitsstudie durch die BWB. Ebenso muss durch den Anlagenbetreiber der Heizzentrale geprüft werden, welche Auswirkungen Veränderungen in der Heizzentrale und insbesondere die Niedertemperatureinbringung auf die Effizienz des bestehenden Erzeugerparks hat.

Mit Blick auf die Wärmeerzeugung wurden unterschiedliche Anlagenkombinationen untersucht. Die Abwasserwärmepumpe wurde auf ca. 4.000 Volllaststunden ausgelegt und mit unterschiedlich groß dimensionierten BHKW sowie mit PV- und Solarthermie-Anlagen kombiniert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Kombination der Abwasserwärmepumpe mit einem größeren BHKW (ausgelegt auf 3.500 Volllaststunden) sowie mit PV-Anlagen mit Blick auf die CO_{2eq}-Emissionen am günstigsten ist. Die CO_{2eq}-Vermeidung pro Euro und somit die Kosteneffizienz der CO_2-Vermeidung sind in diesem Fall ebenfalls besonders günstig. Allerdings sind die Wärmegestehungskosten dieses Systems merklich höher als die des aktuellen Wärmeversorgungssystems bestehend aus einem kleinem BHKW und mehreren Gaskesseln. Der nationale CO_2-Preis auf fossile Rohstoffe, der ab 2021 gelten soll, wie auch die Förderungen von Energieeffizienzmaßnahmen auf Bundesebene durch das BAFA, verbessern die Wettbewerbsfähigkeit von Wärmeversorgungskonzepten mit Abwasserwärme zwar. Allerdings liegen die Wärmegestehungskosten in der Beispielrechnung in einem System mit rein fossiler Wärmeversorgung auf Basis von Erdgas und ohne energetische Sanierung immer noch unter denen eines Systems mit energetischer Sanierung und Abwasserwärmenutzung. Die Kombination einer Wärmepumpe und einer PV-Anlage kann sich sowohl mit Blick auf die CO_{2eq}-Emissionen als auch die Wärmegestehungskosten positiv auswirken. Jedoch ist die Betrachtung eher theoretischer bzw. beispielhafter Natur, da die aktuellen Regelungen die Nutzung von mehreren PV-Anlagen in einem Quartier für den Betrieb einer Wärmepumpe nicht erlauben (sofern das öffentliche Stromnetz genutzt wird).

Die Resilienz-Bewertung zeigt, dass eine Nutzung von Abwasserwärme zu einer Diversifizierung der Wärmeversorgung beiträgt und sich somit positiv auf die Resilienz auswirken kann. Vorteilhaft mit Blick auf die Resilienz sind vor allem die Szenarien, die eine Kombination mit PV- und Solarthermie-Anlagen vorsehen, da dann die höchsten Anteile an Diversität und loser Kopplung erreicht werden. Einschränkend in Bezug auf die Resilienz-Bewertung ist zu sagen, dass die vorliegende Bewertung auf lediglich drei Indikatoren basiert und somit nur erste Hinweise liefert.

Eine Herausforderung und ein Hemmnis bei der Nutzung des Abwasserwärme-Potenzials ergibt sich dadurch, dass in Bestandsgebäuden eine energetische Sanierung der Gebäude erforderlich ist, damit die Wärmepumpen effizient eingesetzt werden können. Sinnvoll ist eine Sanierung der Keller (-decken), der obersten Geschossdecken oder Dächer sowie ein Austausch der Fenster. Zudem kann ein Austausch der Radiatoren erforderlich sein, um die Übertragungsfläche zu erhöhen. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die energetische Sanierung – auch bei ambitioniertem Sanierungsniveau – ein kosteneffizienter Weg ist, um CO_{2eq}-Emissionen zu vermeiden.

Für eine Kommune, die sich das Ziel gesetzt hat die städtischen CO_{2eq}-Emissionen zu reduzieren, ist es daher sinnvoll, sowohl die energetische Sanierung als auch die Nutzung von Abwasserwärme voranzubringen und zu unterstützten.

In der Summe wird deutlich, dass der CO_2-Preis und die bestehenden Förderungen wichtige Instrumente für die Umsetzung von Wärmeversorgungskonzepten mit Abwasserwärme – auch in Bestandsquartieren – sind. Sie reichen aber nicht aus, um eine breite Umsetzung solcher Wärmekonzepte zu erreichen. Eine weiterführende Förderung durch das Land Berlin oder den Bund ist daher notwendig, um eine sozialverträgliche Umsetzung zu bezahlbaren Wärmepreisen zu ermöglichen.

Ein Pilotprojekt für die Integration von Abwasserwärme in ein Wärmeversorgungskonzept eines Bestandsgebietes wie den Klausenerplatz-Kiez kann die urbane Wärmewende voranbringen und zur Erreichung der Ziele des Berliner Energie- und Klimaschutzprogrammes beitragen. Ein solches Projekt könnte eine Blaupause für viele andere Gebiete in Berlin sein.

7 Literaturverzeichnis

ASUE [Arbeitsgemeinschaft fürsparsamen und umweltfreundlichenEnergieverbrauch e.V. (ASUE)] (2014): BHKW-Kenndaten 2014/2015.

BBSR [Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung] (2019): Grundsätze zur Aufnahme von Ökobilanzdaten in die Online-Datenbank ÖKOBAUDAT - Stand: 2019-02-20.

Berlin Partner für Wirtschaft und Technologie GmbH (2017): Wirtschaftsatlas Berlin. https://www.businesslocationcenter.de/wab/maps/main/#/ (Zugriff: 21. November 2017).

Biggs, Reinette, Maja Schlüter, Duan Biggs, Erin L. Bohensky, Shauna BurnSilver, Georgina Cundill, Vasilis Dakos, Tim M. Daw, Louisa S. Evans, Karen Kotschy, et al. (2012): Toward Principles for Enhancing the Resilience of Ecosystem Services. *Annual Review of Environment and Resources* 37, Nr. 1: 421–448.

Binder, Claudia, Susan Mühlemeier und Romano Wyss (2017): An Indicator-Based Approach for Analyzing the Resilience of Transitions for Energy Regions. Part I: Theoretical and Conceptual Considerations. *Energies* 10, Nr. 1: 36.

BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (2014): Nationale Politikstrategie Bioökonomie - Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie. Berlin. http://www.bmbf.de/pubRD/Politikstrategie_Biooekonomie_barrierefrei.pdf.

BMWi [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie] (2019): Erneuerbare Energien in Zahlen. Berlin.

Bost, Mark, Timo Böther, Bernd Hirschl, Sebastian Kreuz, Anna Neumann und Julika Weiß (2012): Erneuerbare Energien Potenziale in Brandenburg 2030. Berlin.

BUE (2016): Wärmekataster Handbuch. Hamburg.

Bundesnetzagentur (2019): Monitoringbericht 2018. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Allgemeines/Bundesnetzagentur/Publikationen/Berichte/2018/Monitoringbericht_Energie2018.pdf?__blob=publicationFile&v=5 (Zugriff: 4. März 2019).

Bundesregierung (2018): Gesetzentwurf der Bundesregierung. Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes, des Kraft-Wärme-Kopplungsgesetzes, des Energiewirtschaftsgesetzes und weiterer energierechtlicher Vorschriften.

Bürger, Veit, Tilman Hesse, Dietlinde Quack, Andreas Palzer, Benjamin Köhler, Sebastian Herkel und Peter Engelmann (2016): Klimaneutraler Gebäudebestand 2016. Climate Change 06/2016.

Business Location Center (2011): Solarpotentialanalyse Berlin – Datendokumentation.

Business Location Center (2017): Solaratlas Berlin. Website: http://www.businesslocationcenter.de/wab/maps/solaratlas/ (Zugriff: 16. November 2015).

BWB [Berliner Wasserbetriebe] (2017a): Abwasser als Wärmequelle – Projekte und Erfahrungen aus Berlin.

BWB [Berliner Wasserbetriebe] (2017b): Abwasserwärmenutzung Quartier Klausenerplatz.

BWB [Berliner Wasserbetriebe] (2018): Heizen und Kühlen mit Abwasser. http://www.bwb.de (Zugriff: 14. Januar 2019).

CML [Institute of Environmental Sciences of Leiden University] (2016): CML-IA Characterisation Factors. 5. September. Website: https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors (Zugriff: 14. November 2019).

DEPV [Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V.] (2019): Pelletpreis. *DEPV*. Website: https://depv.de/de/pelletpreis (Zugriff: 11. Dezember 2019).

Destatis (2018): Daten zur Energiepreisentwicklung: Lange Reihen von Januar 2000 bis April 2018. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Preise/Energiepreise/EnergiepreisentwicklungPDF_5619001.pdf?__blob=publicationFile.

Destatis (2019): Index der Erzeugerpreise gewerblicher Produkte. *Destatis - Statistisches Bundesamt*. Website: https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Konjunkturindikatoren/Preise/kpre550.html (Zugriff: 11. Dezember 2019).

DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Deutsches Institut für Normung e.V. 2009.

Dunkelberg, Elisa, Alexander Deisböck, Benjamin Herrmann, Steven Salecki, Tino Mitzinger, Johannes Röder, Pablo Thier, Timo Wassermann und Bernd Hirschl (2020): Transformation der Fernwärme in Nord-Neukölln. Berlin.

Fachbereich Umwelt und Stadtgrün (2015): Dachbegrünung und Photovoltaik - Eine Handreichung der Landeshauptstadt Hannover. Hannover: Landeshauptstadt Hannover - Fachbereich Umwelt und Stadtgrün.

Farrell, Alexander E., Hisham Zerriffi und Hadi Dowlatabadi (2004): ENERGY INFRASTRUCTURE AND SECURITY. *Annual Review of Environment and Resources* 29, Nr. 1: 421–469.

F:DATA GMBH (2019): Baupreislexikon - aktuelle Baupreise und Baukosten für Ihre Region. Website: http://www.baupreislexikon.de/.

Fraunhofer ISE (2019): Der Strommix in Deutschland in 2018. https://strom-report.de/strom/ (Zugriff: 15. Oktober 2019).

Gershenson, J. K., G. J. Prasad und Y. Zhang (2003): Product modularity: Definitions and benefits. *Journal of Engineering Design* 14, Nr. 3: 295–313.

von Gleich, Arnim, Christian Pade, Ulrich Petschow und Eugen Pissarskoi (2010): *Potentials and Trends in Biomimetics*.

Goessling-Reisemann, Stefan und Pablo Thier (2019): On the difference between risk management and resilience management for critical infrastructures. In: *Handbook on Resilience of Socio-Technical Systems*, hg. v. Matthias Ruth und Stefan Goessling-Reisemann, S. 117–135. Edward Elgar Publishing.

GsKA [Gemeinnützige Gesellschaft für sozial-kulturelle Arbeit] (2017): Datenbank lebensweltlich orientierter Räume (LOR).

Hirschl, Bernd, Fritz Reusswig, Julika Weiß, Lars Bölling, Mark Bost, Ursula Flecken, Leilah Haag, Philipp Heiduk, Patrick Klemm, Christoph Lange, et al. (2015): Entwurf für ein Berliner Energie- und Klimaschutzprogramm (BEK). Endbericht im Auftrag des Landes Berlin, Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt. Berlin: Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW).

IE Leipzig (2013): Auswirkungen einer Übertragung des EEWärmeG auf den Bestand. Leipzig: Leipziger Institut für Energie.

IWU [Institut für Wohnen und Umwelt] (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden - zweite erweiterte Auflage. Darmstadt.

IWU [Institut für Wohnen und Umwelt] (2017): Gadtagzahlen Deutschland. Klimadaten deutscher Stationen. www.iwu.de (Zugriff: 12. März 2018).

Kelm, Tobias, Jochen Metzger, Henning Jachmann, Dieter Günnewig, Michael Püschel, Sven Schicketanz, Pascal Kinast, Miron Thylmann und Venus Nazerian (2018): Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß §97 Erneuerbare-Energien-Gesetz - Teilvorhaben II c): Solare Strahlungsenergie- Zwischenbericht. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/bericht-eeg-4-solar.pdf?__blob=publicationFile&v=4 (Zugriff: 8. Juli 2018).

KfW (2018): Merkblatt Erneuerbare Energien. KfW -Programm Erneuerbare Energien „Premium“. Stand 02/2018.

Klebsch, R., F. Hollandt, U. Schwarz, E. Dunkelberg und B. Hirschl (2014): Technische und wirtschaftliche Bewertung einer getrennten Betriebsführung von Netz und Erzeugung des Fernwärmenetzes von Vattenfall für den Fall eines Eigentumsübergangs auf Berlin.

Klöpffer, Walter und Birgit Grahl (2009): *Ökobilanz (LCA) – Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag.

Kost, Christoph, Johannes N. Mayer, Jessica Thomsen und Niklas Hartmann (2013): Stromgestehungskosten Erneuerbarer Energien. Studie. Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme Fraunhofer ISE.

Land Berlin (2011): Integriertes Kommunales Klimaschutzkonzept für den Klausenerplatz-Kiez in Berlin Charlottenburg-Wilmersdorf. Berlin.

Lovins, A. B und L. H Lovins (1982): *Brittle power: Energy strategy for national security*. Andover: Brickhouse Publishing Company.

LPG [Landesweite Planungsgesellschaft mbH] (2020): Vertiefende Untersuchung zur Prüfung der Anwendungsvoraussetzungen für den Erlass einer Verordnung zum Erhalt der Zusammensetzung der Wohnbevölkerung gemäß § 172 Abastz 1 Satz 1 Nummer 2 BauGB für das Gebiet Klausenerplatz/Sophie-Charlotte-Platz. Berlin.

Mitzinger, Tino, Johannes Röder und Pablo Thier (2020): Operationalization and Application of Resilience Enhancing Design Principles for District Heating Systems. Manuskript in Vorbereitung.

Molyneaux, Lynette, Colin Brown, Liam Wagner und John Foster (2016): Measuring resilience in energy systems: Insights from a range of disciplines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59: 1068–1079.

MUGV [Ministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg] (2010): Biomassestrategie des Landes Brandenburg.

Netzgesellschaft Berlin Brandenburg (2019): Netzentgelte für das Netzgebiet der NBB NetzgesellschaftBerlin-Brandenburg inklusive Kostenwälzung. https://www.nbb-netzgesellschaft.de/fileadmin/NBB/2_NBB_DownloadCenter/1_Kunden/Transportkunden/Netznutzungsentgelte_NNE/NNE_NBB_01012019.pdf (Zugriff: 11. Dezember 2019).

O A KSI: Beratende Begleitung bei der Umsetzung des Klimaschutzkonzeptes für den Klausenerplatz Kiez des Bezirks Charlottenburg-Wilmersdorf - Berlin.de. Website: https://www.berlin.de/ba-charlottenburg-wilmersdorf/verwaltung/aemter/umwelt-und-naturschutzamt/klimaschutz/artikel.365784.php (Zugriff: 23. November 2017).

Paar, A., F. Herbert, M. Pehnt, S. Ochse, S. Richter, S. Maier, M. Kley, H. Huther, J. Kühne und I. Weidlich (2013): Transformationsstrategien Fernwärme. Forschung und Entwicklung. Frankfurt am Main.

Perner, Jens, Michaela Unteutsch und Andrea Lövenich (2018): Die zukünftigen Kosten strombasierter synthetischer Brennstoffe. https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2017/SynKost_2050/Agora_SynCost-Studie_WEB.pdf (Zugriff: 11. September 2019).

Peterson, Garry, Craig R. Allen und Crawford Stanley Holling (1998): Ecological resilience, biodiversity, and scale. *Ecosystems* 1, Nr. 1: 6–18.

PIK, IÖW, BLS Energieplan, InnoZ, UmbauStadt, LUP, bgmr und HFK Rechtsanwälte LLP (2014): Machbarkeitsstudie Klimaneutrales Berlin 2050. Potsdam und Berlin.

Recknagel, Hermann, Eberhard Sprenger und Ernst-Rudolf Schramek (2010): *Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 11/12*. Oldenbourg Industrieverlag 201.

Reusswig, Fritz, Bernd Hirschl, Wiebke Lass, Carlo Becker, Lars Bölling, Wulf Clausen, Leilah Haag, Henrike Hahmann, Philipp Heiduk, Manuel Hendzlik, et al. (2014): Klimaneutrales Berlin 2050. Machbarkeitsstudie. Hauptbericht. Berlin, Potsdam.

Singhal, Puja und Jan Stede (2019): Wärmemonitor 2018: Steigender Heizenergiebedarf, Sanierungsrate sollte höher sein. DIW Wochenbericht Nr. 36.

Solar District Heating (2012): Solar district heating guidelines .- Collection of fact sheets WP3 – D3.1 & D3.2. https://www.euroheat.org/wp-content/uploads/2016/04/SDHtake-off_SDH_Guidelines.pdf (Zugriff: 30. Juli 2019).

SolnetBW (2015): Solare Wärmenetze für Baden-Württemberg. Grundlagen, Potenziale, Strategien. http://solar-district-heating.eu (Zugriff: 30. März 2016).

Stirling, Andy (2007): A general framework for analysing diversity in science, technology and society. *Journal of the Royal Society Interface* 4, Nr. 15: 707–719.

Stirling, Andy (2010): Multicriteria diversity analysis: A Novel Heuristic Framework for Appraising Energy Portfolios. *Energy Policy* 38, Nr. 4: 1622–1634.

Stromnetz Berlin GmbH (2019): Preisblatt der Stromnetz Berlin GmbH. https://www.stromnetz.berlin/globalassets/dokumente/entgelte/zugang/entgelte-01.01.2019/nne-b-2019.pdf (Zugriff: 11. Dezember 2019).

Stryi-Hipp, Gerhard, Sebastian Gölz, Stefan Wieland, Bin Xu-Sigurdsson, Till Freudenmacher und Rania Taani (2019): Expertenempfehlung zum Masterplan Solarcity Berlin, Masterplanstudie und Maßnahmenkatalog, im Auftrag des Landes Berlin, Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe, Berlin.

UBA [Umweltbundesamt] (2018): Kommunaler Klimaschutz durch Verbesserung der Effizienz in der Fernwärmeversorgung mittels Nutzung von Niedertemperaturwärmequellen am Beispiel tiefengeothermischer Ressourcen (Entwurf Endbericht).

VDI (2000): VDI 2067 Blatt 1. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnungen.

Vogt, Regine und Sophia Fehrenbach (2017): Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanz für das Jahr 2016 für das Land Berlin. Heidelberg.

8 Anhang

Tab. 9: Angenommene Kalkulationszinssätze
Quelle: (KfW 2018 und eigene Annahmen)

Akteure	Misch-Zins (real)	EK-Zins	FK-Zins	EK-Anteil
Private Haushalte	0,9 %	1,3 %	1,3 %	60 %
Hauseigentümer/innen	0,9 %	1,3 %	1,3 %	60 %
Contractor	3,0 %	6,0 %	4,0 %	20 %
Netzbetreiber	3,5 %	10,0 %	4,0 %	20 %
Öffentliche Hand	0,9 %	1,3 %	1,3 %	60 %
Gewerbe	3,0 %	6,0 %	4,0 %	20 %

Tab. 10: Brennstoffpreise
Quelle: (Bundesnetzagentur 2019; Stromnetz Berlin GmbH 2019; Netzgesellschaft Berlin Brandenburg 2019; Perner et al. 2018; DEPV 2019)

Brennstoff	Abnahme-Niveau	Arbeitspreis energiebezogen (Euro/kWh)	Grundpreis (Euro/a)	Leistungspreis (Euro/kW*a)
Erdgas	Haushalte	0,061	171,01	0
Erdgas	Gewerbe/In-	0,044	0,00	5,21 bis 10,85*
Biomethan	Haushalte	0,106	120,70	0
Biomethan	Gewerbe/In-	0,081	0,00	5,21 bis 10,85*
SynGas	Haushalte	0,218	171,01	0
SynGas	Gewerbe/In-	0,169	0,00	5,21 bis 10,85*
Strom für Wärme-	Gewerbe/In-	0,153	0	69,5 bis 74,36**

Tab. 11: Angenommene Preisänderungsraten
Quelle: (VDI 2000; Destatis 2018; Destatis 2019; Bundesnetzagentur 2019; Perner et al. 2018 und eigene Annahmen)

Kostenposition	Abnahme-Niveau	Jährliche Preisänderung bis zum Jahr…		
		2025	2035	2045
… Investitionsmittel	-	0,60 %	0,60 %	0,60 %
… Betriebskosten	-	1,60 %	1,60 %	1,60 %
… sonstige Kosten	-	1,60 %	1,60 %	1,60 %
Erdgas	Haushalte	2,30 %	1,90 %	1,60 %
Erdgas	Gewerbe/Industrie	2,30 %	1,90 %	1,60 %
Biomethan	Haushalte	1,45 %	1,20 %	1,00 %
Biomethan	Gewerbe/Industrie	2,30 %	1,90 %	1,60 %
SynGas	Haushalte	-1,67 %	-1,67 %	-1,67 %
SynGas	Gewerbe/Industrie	-1,67 %	-1,67 %	-1,67 %
Strom für Wärmepumpen	Gewerbe/Industrie	0,70 %	1,20 %	1,10 %
Kohle	Gewerbe/Industrie	2,20 %	0,54 %	0,54 %
Biomasse Holzpellets	Gewerbe/Industrie	0,80 %	0,25 %	0,80 %

Tab. 12: Investitions- und Betriebskosten der bewerteten Wärme- und Stromerzeugungsanlagen
Quellenangaben finden sich in der letzten Spalte der Tabelle.

Wärmeerzeuger	Anlagenleistung thermisch (kW_th oder m² BKF)	Anlagenleistung elektrische (kWh_el)	Leistungs-spezifische Investitionskos-ten (Euro/kW_th)	Leistungs-spezifische Investitions Förderung (Euro/kWh_th)	Leistungs-spezifische Betriebskosten (Euro/kW_th)	Datenquellen
BHKW Erdgas	50	34	1.457,60	87,19	76,46	(ASUE 2014)
BHKW Erdgas	100	68	1.142,80	27,78	64,29	(ASUE 2014)
BHKW Erdgas	150	102	982,47	0,00	47,11	(ASUE 2014)
BHKW Erdgas	600	409	700,62	0,00	37,56	(ASUE 2014)
Brennwertkessel Erdgas	100	0	188,10	0,02	3,79	(F:DATA GMBH 2019)
Brennwertkessel Erdgas	150	0	136,42	0,00	3,45	(F:DATA GMBH 2019)
Brennwertkessel Erdgas	1.000	0	67,48	0,00	1,35	(F:DATA GMBH 2019)
Photovoltaik Dach	0	30	900,00	0,00	22,50	(Kelm et al. 2018)
Photovoltaik Dach	0	100	900,00	0,00	22,50	(Kelm et al. 2018)
Solarthermie Flachdach/Röh-renkollektor	50	0	649,00	150,00	6,00	(Solar District Heating 2012; SolnetBW 2015)
Solarthermie Flachdach/Röh-renkollektor	300	0	625,00	141,67	3,13	(Solar District Heating 2012; SolnetBW 2015)
Solarthermie Flachdach/Röh-renkollektor	600	0	550,00	140,83	2,75	(Solar District Heating 2012; SolnetBW 2015)
Wärmepumpe Abwasser	500	0	1.235,58	432,45	17,74	(Pers. Mitteil. Berliner Wasserbetriebe 2019)

Wärmeerzeuger	Anlagenleistung thermisch (kW_th oder m² BKF)	Anlagenleistung elektrische (kWh_el)	Leistungs-spezifische Investitionskos-ten (Euro/kW_th)	Leistungs-spezifische Investitions Förderung (Euro/kWh_th)	Leistungs-spezifische Betriebskosten (Euro/kW_th)	Datenquellen
Wärmepumpe Abwasser	700	0	1.228,98	430,14	17,74	(Pers. Mitteil. Berliner Wasserbetriebe 2019)
Wärmepumpe Abwasser	1.400	0	1.205,91	422,07	17,74	(Pers. Mitteil. Berliner Wasserbetriebe 2019)

www.urbane-waermewende.de