

# Höhe und Verteilung der gesellschaftlichen Kosten heizbedingter Emissionen

Eine Typologie deutscher Wohngebäude

Prof. Dr. Matthias Kalkuhl

Prof. Dr. Alex Stomper

Noah Kögel

Fabian Gerstmeier

FEIRE – Financing Ecological Investments in Real Estate

April 2024

### **Danksagungen:**

Wir danken Karolina Rütten sowie Maximilian Kellner für ihre Unterstützung bei der Analyse der EVS-Daten und der Darstellung der Ergebnisse. Matthias zu Eicken und Jakob Grimm danken wir für hilfreiche Informationen über die Verfügbarkeit von Daten über den Gebäudesektor. Zusätzlich danken wir den Teilnehmenden der ersten FEIRE-Roundtable-Diskussion am 07.06.2023 für wertvolle Kommentare und Hinweise, bei der eine erste Version dieser Typologie vorgestellt wurde.

Finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des KlimFi-Projekts FEIRE wird dankend anerkannt. Alle Meinungen und Fehler sind die der Autoren und reflektieren nicht die Position des BMBFs.

Prof. Dr. Matthias Kalkuhl (MCC Berlin, Universität Potsdam, [Kalkuhl@mcc-berlin.net](mailto:Kalkuhl@mcc-berlin.net))

Prof. Dr. Alex Stomper (Humboldt Universität zu Berlin, [stompera@hu-berlin.de](mailto:stompera@hu-berlin.de))

Noah Kögel\* (MCC Berlin, Universität Potsdam, [Koegel@mcc-berlin.net](mailto:Koegel@mcc-berlin.net))

Fabian Gerstmeier\* (Humboldt Universität zu Berlin, Berlin School of Economics, [fabian.gerstmeier@hu-berlin.de](mailto:fabian.gerstmeier@hu-berlin.de))

\*FEIRE-Projekt: Das wissenschaftliche Forschungsprojekt „Financing Ecological Investments in Real Estate“ (FEIRE) ist eine Kooperation zwischen der Humboldt Universität zu Berlin, dem Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change sowie dem Hauseigentümerverband Haus & Grund (siehe <https://feire.isqd.de/>). Es gehört zur ISQD-Gruppe wissenschaftlicher Forschungsprojekte (siehe <https://www.isqd.de/>).

## Inhaltsverzeichnis

Das Wichtigste in Kürze .....	4
1. Die gesellschaftlichen Kosten der Heizemissionen .....	6
2. Methodik.....	7
2.1. Die Datengrundlage.....	7
2.2. Messung gesellschaftlicher Kosten nicht-vermiedener Emissionen.....	10
3. Ergebnisse .....	12
3.1. Heterogenität heizbedingter Emissionen .....	12
3.2. Eine Haushalts- und Gebäudetypologie.....	14
3.3. Regionale Verteilung heizbedingter Emissionen .....	16
3.4. Kapitalisierte Kosten des Nicht-Sanierens.....	17
3.5. Regionale Betroffenheit und Förderpriorisierung .....	21
4. Zusammenfassung und Ausblick.....	23
5. Literaturverzeichnis.....	24
Anhang.....	25

## Das Wichtigste in Kürze

Der vorliegende Bericht quantifiziert die **gesellschaftlichen Kosten des gegenwärtigen Heizsystems** anhand der damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen im deutschen Wohngebäudesektor, der zu einem großen Teil (ca. 75%, DESTATIS (2019)) dezentral mit fossilen Energieträgern beheizt wird. Die gesellschaftlichen Kosten lassen sich transparent anhand der jährlich anfallenden CO<sub>2</sub>-Kosten<sup>1</sup> aller Haushalte in einem Szenario bewerten, in dem die heizbedingten Emissionen über die Jahre gleich bleiben und ein volkswirtschaftlich optimaler CO<sub>2</sub>-Preisfad<sup>2</sup> angenommen wird, der die Erreichung der europäischen Klimaziele sicherstellt (Pietzcker, et al., 2021). Dieser Preisfad gibt an, zu welchen Kosten weitere CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden werden müssten, wenn die Emissionsvermeidung im Wohngebäudesektors ausbliebe und sie daher in einem anderen Sektor stattfinden müsste. Das Ergebnis der Bewertung beläuft sich – unter Annahme eines gegenüber 2018 unveränderten Heizverhaltens der Haushalte – zwischen 2023 und 2045 auf ca. 580 Mrd. EUR. **Bezogen auf die Wohnraumfläche betragen die kapitalisierten Kosten in diesem Zeitraum 148 EUR pro Haushalt und m<sup>2</sup> bei einer Standardabweichung von 124 EUR pro Quadratmeter Wohnfläche<sup>3</sup>. Diese hohe Standardabweichung reflektiert das Ausmaß der Heterogenität im Energiebedarf deutscher Wohngebäude.** Das Ergebnis kann als Richtwert dienen, um kosteneffiziente Maßnahmen zur Vermeidung von CO<sub>2</sub>-Emissionen im Wohngebäudesektor zu identifizieren. Unsere Ergebnisse schätzen jedoch auch ab, ab welchem Investitionsbedarf eine energetische Modernisierung tendenziell nicht sinnvoll ist, weil es günstiger wäre, die Emissionseinsparungen außerhalb des Gebäudesektors oder zu einem späteren Zeitpunkt im Gebäudesektor zu realisieren.

Zur effizienten Ausgestaltung der Klimapolitik ist es hilfreich, eine Typologie von Gebäuden und Haushalten zu erstellen, die sich deutlich hinsichtlich ihrer heizbedingten Emissionen unterscheiden. Wir legen eine solche Typologie vor und bewerten die gesellschaftlichen Kosten der heizbedingten Emissionen der darin definierten Gruppen von Haushalten. Diese Analysen (mit Regressionsmodellen und Methoden des maschinellen Lernens) identifizieren jene Wohneinheiten, in denen eine CO<sub>2</sub>-reduzierte Gebäudetechnik einen besonders hohen gesellschaftlichen und klimapolitischen Nutzen schafft. **Bei Gebäuden, die mit Gas und Öl beheizt werden, ist der Nutzen pro Quadratmeter besonders hoch (~112-293 EUR pro m<sup>2</sup> kapitalisiert bis zum Jahr 2045), während er bei jenen Wohneinheiten, die mit Strom oder Fernwärme beheizt werden, deutlich niedriger ausfällt**, da die gesellschaftlichen Kosten der CO<sub>2</sub>-Emissionen hier durch den bestehenden Europäischen Emissionshandel für Industrie und Energiewirtschaft bereits abgedeckt und schrittweise reduziert werden. Die Datenanalyse zeigt zudem, dass die jährlichen CO<sub>2</sub>-Kosten vor allem für Gebäude älterer Baujahre sowie in vermieteten Gebäuden hoch sind. Im Segment der Haushalte, die in ölbeheizten Gebäuden zur Miete wohnen, betragen die gesellschaftlichen Kosten der heizbedingten Emissionen im Durchschnitt 260 EUR pro m<sup>2</sup> bei einer Standardabweichung von 76 EUR.

Neben der Analyse von Potenzialen für CO<sub>2</sub>-Emissionseinsparungen auf der Gebäude-Ebene beschreibt dieser Bericht erstmals die räumliche Verteilung der heizbedingten Emissionen bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionskosten innerhalb Deutschlands auf der Ebene von Landkreisen. **Dabei zeigen sich grundlegende regionale Unterschiede zwischen den Emissionen und CO<sub>2</sub>-Kosten pro Kopf bzw. pro Quadratmeter.** So fallen die Pro-Kopf-Emissionen in Rheinland-Pfalz, dem Saarland sowie Teilen Bayerns, Hessens und Niedersach-

<sup>1</sup> CO<sub>2</sub>-Kosten beschreiben in diesem Bericht das Produkt aus Emissionen und dem volkswirtschaftlich kosteneffizientem CO<sub>2</sub>-Preis.

<sup>2</sup> Ein CO<sub>2</sub>-Preis entspricht der Preiskomponente, die auf den CO<sub>2</sub>-Gehalt fossiler Energien anfällt und deren Höhe über eine Steuer oder einen Emissionshandel bestimmt wird.

<sup>3</sup> Diese Zahl stellt den Barwert der aufsummierten Kosten bis 2045 dar. In diesem Bericht wird dafür eine Diskontrate von 3% zugrunde gelegt.

sens im Vergleich zu anderen Bundesländern höher aus. Zudem liegt die Höhe der CO<sub>2</sub>-Kosten in Ostdeutschland aufgrund des höheren ostdeutschen Fernwärmeanteils durchschnittlich unter jenen in Westdeutschland. **Daraus ergibt sich ein tendenziell niedrigerer Investitions- und Sanierungsbedarf in den ostdeutschen Bundesländern.**

Schließlich setzen wir die gesellschaftlichen Kosten der Emissionen in Relation zum Mietwert bis 2045. Dies gibt Aufschluss über das Verhältnis zwischen dem Ertragspotenzial von Immobilien und den gesellschaftlichen Kosten ihrer heizbedingten Emissionen. Auch hier zeigen sich große Unterschiede zwischen verschiedenen Arten von Haushalten. **Im Durchschnitt betragen die CO<sub>2</sub>-Kosten 15% der Netto-Kaltmiete.** Abermals stechen vermietete Wohneinheiten in mit Öl beheizten Gebäuden hervor, in denen das Verhältnis durchschnittlich 23% beträgt. Diese Werte messen die Möglichkeit des Einsatzes von Mieterträgen zur Finanzierung von Investitionen, die die heizbedingten Emissionen auf null absenken würden.

Die in unserer Analyse betrachteten kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten stellen eine Obergrenze für den ökonomisch sinnvollen **Maximalwert für energetische Investitionen** dar. Diese Obergrenze lässt sich auch als Break-even-Punkt umrechnen, ab dem die laufenden Monatsmieten (ohne Mietanpassung) die Investitionskosten erreichen. Für eine mittlere Wohneinheit ist dies bei etwa 27 Monatsmieten erreicht. **Aus diesen Überlegungen ergibt sich, dass nicht alle Maßnahmen zur Einsparung von Emissionen oder Heizenergie ökonomisch sinnvoll sind:** Entweder sollte sich auf möglichst kostengünstige Investitionen mit großem CO<sub>2</sub>-Einspareffekt beschränkt werden (wie etwa der Einbau einer Wärmepumpe oder der Anschluss an ein Fernwärmenetz) oder aber sollte der CO<sub>2</sub>-Einspareffekt zunächst in einem anderen Bereich der Wirtschaft erbracht werden, wo dies gegenwärtig noch günstiger geschehen kann.

Da sich unsere Analyse auf heizbedingte Emissionen konzentriert, werden Emissionen, die im Zusammenhang mit baulichen Maßnahmen stehen, nicht berücksichtigt. Sind zur Instandhaltung der Gebäude Investitionen notwendig, die mit Investitionen zur Vermeidung von heizbedingten Emissionen kombiniert werden können/müssen, so stellen unsere Schätzungen folglich eine Obergrenze für jenes zusätzliche Investitionsvolumen dar, das maximal sinnvoll ist, um zukünftige heizbedingte Emissionen vollständig zu vermeiden. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss zudem berücksichtigt werden, dass Investitionen zur Emissionsvermeidung im Rahmen von seriellen Modernisierungen oftmals kostengünstiger ausgeführt werden können als in Einzelprojekten. Um das Potenzial für solche Kosteneinsparungen zu beurteilen, müsste die Gleichartigkeit der Wohneinheiten in einem Gebiet analysiert werden, um abzuschätzen, welche Art und welcher Umfang einer energetischen Investition kosteneffizient ist, sodass eingesparte CO<sub>2</sub>-Kosten über den Investitionskosten liegen. Die dazu notwendigen hochaufgelösten Daten liegen der Analyse dieses Berichts nicht vor. Die hier vorgestellte Typologie kann jedoch als Basis für weiterführende Analysen dienen.

# 1. Die gesellschaftlichen Kosten der Heizemissionen

Das Europäische Parlament hat im April 2023 der Ausweitung des Zertifikatehandels auf Treibhausgasemissionen aus dem Verkehrs- und Gebäudesektor im sogenannten **ETS2 (Emissions Trading System 2)** zugestimmt<sup>4</sup>. Hintergrund dieser Maßnahme ist das europaweite Ziel, im Jahr 2050 treibhausgasneutral zu wirtschaften. Die Emissionen der Verbrennung von fossilen Energieträgern sollen dazu bis 2030 auf 55% im Vergleich zu 1990 reduziert werden („Fit-for-55“)<sup>5</sup>. Auf europäischer Ebene wird der Ausstoß einer Tonne CO<sub>2</sub> zum Heizen daher ab 2027 in zwei weiteren Sektoren kostenpflichtig. Der Preis für eine Tonne CO<sub>2</sub> soll innerhalb der ersten drei Jahre bis Ende 2029 zunächst möglichst auf 45 EUR begrenzt werden.

Marktbasierte Instrumente wie der ETS2 sollen den **Transformationsprozess** einer Ökonomie zur Treibhausgasneutralität – für Deutschland bereits im Jahr 2045 – zu den volkswirtschaftlich geringsten Kosten ermöglichen. Marktteilnehmer sehen sich beim Erwerb von Verschmutzungszertifikaten unter der Maßgabe einer jährlich sinkenden Anzahl von Zertifikaten steigenden Kosten gegenüber, die ein Umstellen auf treibhausgasneutrale Produktionsprozesse zunehmend profitabler machen. Aufgrund der begrenzten Menge an Zertifikaten und ihrem intertemporalen Handel ergibt sich tendenziell ein über die Zeit steigender CO<sub>2</sub>-Preis. Marktteilnehmer, die sehr günstig Emissionen reduzieren können, werden früher aktiv werden, weil sie ansonsten ab einem gewissen Punkt mehr für das Emittieren zahlen, als sie für die Vermeidung einer Tonne CO<sub>2</sub> zahlen müssten. Marktteilnehmer, denen das Vermeiden von Emissionen hingegen schwerer fällt, reagieren erst später bei höheren CO<sub>2</sub>-Preisen. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass die Gesamtkosten der Transformation zur Klimaneutralität minimiert werden (Kosteneffizienz).

Gegenwärtig werden Emissionen des Verkehrs- und Gebäudesektors in Deutschland national bepreist: Pro Tonne CO<sub>2</sub> fallen derzeit (Stand 2024) 45 EUR an. Dieser Preis soll bis 2026 weiter steigen. Eine Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Preises in 2023 wurde von der Bundesregierung ausgesetzt, um den Anstieg der Energiepreise zu dämpfen, jedoch Anfang 2024 nachgeholt und auf den ursprünglichen CO<sub>2</sub>-Preis der Großen Koalition von 2019/20 gehoben. In 2026 sollen die Emissionen dann in Vorbereitung auf die Aktivierung des ETS2 in 2027 national und marktbasiert innerhalb der Preisspanne 55-65 EUR gehandelt werden<sup>6</sup>.

Am Beispiel des Wärmesektors stellt der CO<sub>2</sub>-Preis einen Anreiz für Haushalte und Wohnraumeigentümer dar, in CO<sub>2</sub>-arme Heiztechnologien und Wärmedämmung zu investieren. Der im Emissionshandel resultierende CO<sub>2</sub>-Preis misst dabei, wie teuer die Vermeidung einer zusätzlichen Tonne CO<sub>2</sub> in der Gesamtwirtschaft ist. Für einen einzelnen Emittenten bzw. Nutzer fossiler Energie heißt das im Umkehrschluss: Jede nicht vermiedene Tonne CO<sub>2</sub> muss an anderer Stelle einer Volkswirtschaft zu ebenjenen CO<sub>2</sub>-Kosten vermieden werden.

<sup>4</sup> siehe beispielsweise <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/04/25/fit-for-55-council-adopts-key-pieces-of-legislation-delivering-on-2030-climate-targets/>

<sup>5</sup> Zwischen 1990 und 2021 sanken die Treibhausgasemissionen der EU-27 um ca. 29%, siehe <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#trends>.

<sup>6</sup> siehe beispielsweise [https://www.dehst.de/DE/Nationaler-Emissionshandel/nEHS-verstehen/nehst-verstehen\\_node.html](https://www.dehst.de/DE/Nationaler-Emissionshandel/nEHS-verstehen/nehst-verstehen_node.html)

Eine CO<sub>2</sub>-Bepreisung im Gebäudesektor mit seinen langen Investitionszyklen von Modernisierungsmaßnahmen wie Dämmung der Gebäudehülle oder Austausch des Heizungssystems stellt Haushalte und die Gesellschaft als Ganze in besonderer Weise vor Herausforderungen. Aus **Sicht der Haushalte** steigen die Betriebskosten von fossilen Heizsystemen unter einem steigenden CO<sub>2</sub>-Preis kontinuierlich an, wodurch der Wechsel zu einem erneuerbaren Heizsystem früher vorgenommen werden sollte. Jedoch fallen Sanierungsmaßnahmen andererseits mitunter sehr teuer und über die Haushalte hinweg unterschiedlich hoch aus. Die Unsicherheit über die tatsächliche Höhe des CO<sub>2</sub>-Preises sowie verschiedene Tatbestände des Marktversagens lassen die individuelle Entscheidung über das Heizsystem möglicherweise weiterhin auf „altbewährte“ Systeme mit fossilen Energieträgern fallen. Diese Entscheidungen führen jedoch zu Pfadabhängigkeiten und bestimmen die Heizemissionen von Haushalten und der Volkswirtschaft für möglicherweise bis zu 30 Jahre.

Aus **gesellschaftlicher Sicht** resultieren die Emissionen jedoch in erheblichen Kosten, da nicht vermiedene heizbedingte Treibhausgasemissionen an anderer Stelle der Volkswirtschaft eingespart werden müssen, um die Klimaziele dennoch zu erreichen. Hier setzt dieser Bericht an. Wir quantifizieren mithilfe einer Kombination verschiedener Datensätze, welche Haushalts- bzw. Gebäudemerkmale die heizbedingten Emissionen beeinflussen, welche gesellschaftlichen Kosten dies zur Folge hat, und wie beide Indikatoren regional in Deutschland verteilt sind. Die Fokussierung auf die gesellschaftlichen Kosten von Emissionen hat dabei das Ziel, zur öffentlichen Debatte über die Notwendigkeit energetischer Modernisierungen im Gebäudebestand beizutragen, indem der dabei entstehende gesellschaftliche Nutzen quantifiziert wird. Dieser Nutzen wird in Form eines Verlusts infolge von Kosten heizbedingter CO<sub>2</sub>-Emissionen ausgedrückt, die entstehen würden, wenn die Emissionen gänzlich außerhalb des Gebäudesektors eingespart werden müssten.

## 2. Methodik

### 2.1. Die Datengrundlage

Die ausgeprägte Heterogenität des Wohngebäudesektors erfordert eine vielschichtige Datengrundlage zur Entwicklung und Bewertung von Politikmaßnahmen, die für den deutschen Gebäudebestand jedoch bisher nicht vorliegt. Bestehende Datensätze konzentrieren sich oft auf die Gebäudeeigenschaften, verfügen gleichzeitig aber nicht über soziodemografische Angaben der Bewohner, ihren konkreten Heizkonsum sowie die Möglichkeit lokale Unterschiede in Deutschland zu identifizieren (Cischinsky & Diefenbach, 2018). Andere Datensätze konzentrieren sich hingegen auf die Ermittlung eines deutschlandweit hochaufgelösten Heizkonsums ausgewählter Gebäudearten (Zwei- und Mehrfamilienhäuser), decken jedoch soziodemografische Angaben nur unzureichend ab (Köveker, et al., 2022). Zudem beruhen viele Datensätze auf Stichproben und nicht auf Vollerhebungen, was eine Generalisierbarkeit der durch die Daten gestützten Ergebnisse potenziell einschränkt. Um dieses Problem zu adressieren, bedarf es einer Erhebung, die die zuvor genannten Merkmale kombiniert abfragt. Ein solcher Versuch wird durch das Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) innerhalb einer Panel-Erhebung in mehreren Wellen seit 2021 durchgeführt: Innerhalb des „Wärme- und Wohnpanels“ werden neben soziodemografischen Daten und Heizkonsumdaten auch Angaben zur Wohn-/Gebäude- und Sanierungssituation abgefragt (Fronde, et al.,

2022). Der Aufbau eines Panels wird zudem auch im FEIRE-Projekt verfolgt (aus dem auch diese Studie hervorgeht), wobei jedoch ein Fokus auf vermietete Immobilien gelegt wird, einem Immobilienbestand, der aus Sicht des Klimaschutzes besonders wichtig erscheint (Singhal, et al., 2022).

Die vorliegende Studie beruht jedoch nicht auf Panel-Daten, sondern auf einem eigens zusammengestellten Datensatz, der dem Anspruch der Repräsentativität der damit erzielten Ergebnisse gerecht werden kann. Dieser Datensatz kombiniert Informationen repräsentativer Stichproben über das Heizverhalten von Haushalten mit Daten aus einer Vollerhebung des deutschen Gebäudebestands. Er erlaubt es uns daher, Aussagen zu Emissionen und gesellschaftlichen Kosten des Gebäudesektors machen zu können.

Im Detail: Die nachfolgende Analyse basiert hauptsächlich auf der Einkommens- und Verbrauchsstichprobe (EVS) aus dem Jahr 2018. Innerhalb der EVS werden ca. 80.000 deutsche Haushalte alle fünf Jahren über jeweils drei Monate nach ihren Haushaltseinnahmen und -ausgaben befragt. Zusätzlich werden den Teilnehmern auch einige Fragen über ihre Wohnsituation gestellt. Daraus resultiert ein Datensatz, der verschiedene soziodemografische und grundlegende gebäudespezifische Merkmale sowie Heizausgaben miteinander verknüpft<sup>7</sup>.

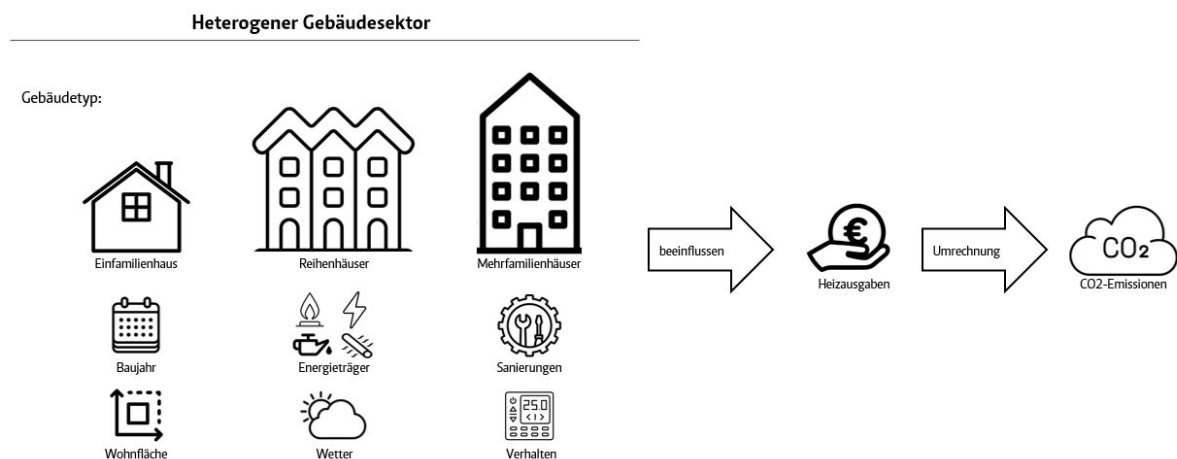


Abbildung 1 Einflussfaktoren auf den Heizkonsum sowie die resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen (Quellennachweise siehe Seite 39)

Wie in Abbildung 1 dargestellt, verfügt die EVS über Angaben zum Gebäudetyp (freistehendes Einfamilienhaus, Reihenhäuser, Mehrfamilienhaus, ...), das Gebäudebaujahr, den Energieträger<sup>8</sup>, das Heizsystem (Zentralheizung, Raumöfen, etc.) und die Wohnfläche. Daneben beeinflussen zwar noch weitere Faktoren das Heizverhalten, wie vorgenommene energetische Sanierungen am Haus, die vorherrschenden Wetterbedingungen und das individuelle Verhalten, die in der EVS aber nicht vorliegen. Der Einfluss dieser letztgenannten Variablen lässt sich innerhalb der EVS nur näherungsweise mithilfe der soziodemografischen

<sup>7</sup> siehe <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Einkommen-Einnahmen-Ausgaben/Methoden/einkommens-verbrauchsstichprobe.html>

<sup>8</sup> Die Verbrauchsdaten von Haushalten, die mit Öl heizen, sind hierbei auf Grundlage des Konsumverhaltens der mit Gas heizenden Haushalte imputiert, da die Nachfrage nach Heizöl nur sehr unregelmäßig und gegebenenfalls außerhalb des dreimonatigen Befragungszeitraums stattfindet. Zudem werden in dieser Analyse nur die Energieträger Gas, Öl, Fernwärme und Strom berücksichtigt.



Merkmale und grober Wohnortvariablen (Bundesland, Stadt/Land) abschätzen. Gleichwohl empirische Ergebnisse über den Einfluss einzelner soziodemografischer Variablen nicht immer eindeutig ausfallen, kann man davon ausgehen, dass der Datensatz ausreichend verschiedene Haushaltscharakteristika enthält, um das Heizkonsumverhalten zu beschreiben (wie z. B. das Haushaltseinkommen, siehe Frederiks, et al. (2015)). Mithilfe von CO<sub>2</sub>-Intensitätsfaktoren und dem Durchschnittspreis pro Energieträger lässt sich aus den EVS-Daten auch der heizbedingte CO<sub>2</sub>-Ausstoß eines Haushalts berechnen (siehe Tabelle 2).<sup>9</sup>

Zusätzlich nutzen wir die Daten des Zensus 2011. Diese Daten erlauben es uns, zentrale Ergebnisse regional (auf Landkreisebene) aufgelöst darzustellen. Da die Zensusdaten jedoch nun bereits mehr als zehn Jahre alt sind, wird der in der Zwischenzeit entstandene und abgegangene Wohnraum mithilfe geeigneter Annahmen geschätzt, um möglichst realitätsgetreue und aktuelle Ergebnisse zu erhalten. Auf Seite 27 im Anhang ist die dabei angewandte Methodik übersichtlich dargestellt.<sup>10</sup> Eine Übersicht über die in dieser Studie verwendeten Variablen kann der Tabelle 3 entnommen werden.

Die regional aufgelösten Schätzungen beruhen auf einem zweistufigen Verfahren, das die EVS-Daten mit den Zensus-Daten kombiniert. Die EVS-Daten werden genutzt, um die Relevanz der einzelnen Variablen für die Heizemissionen ökonomisch zu schätzen. Anschließend wird die Aufteilung der Wohnungen in einem Landkreis entlang der relevanten Variablen (siehe Tabelle 3) herangezogen, um den heizbedingten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck pro Landkreis zu ermitteln. Selbiges wird anschließend für die CO<sub>2</sub>-Kosten durchgeführt.

Eine Bereinigung dieser regionalen Emissionen hinsichtlich Unterschieden der klimatischen Gegebenheiten ist bei dieser Methode nicht möglich, da dieser Einfluss durch den vorhandenen Datensatz nicht isoliert werden kann. Ein Vergleich der Monatsgradtage<sup>11</sup> der Jahre 2016 und 2017 (EVS-Datensatz) mit dem Referenzzeitraum 2006-2015 zeigt jedoch, dass beide Jahre mit durchschnittlich 2% weniger Monatsgradtagen nicht besonders stark von diesem Zeitraum abweichen (siehe Abbildung 11)<sup>12</sup>.

---

<sup>9</sup> Die Daten der EVS wurden innerhalb des „MCC-CO<sub>2</sub>-Preis-Rechners“ (Roofs, et al., 2021) zuerst aufbereitet und dienen hier als Grundlage.

<sup>10</sup> Weiterhin wurden Daten zu den Anteilen der Energieträger auf Ebene der Regierungsbezirke des Zusatzprogramms des Mikrozensus' 2018 genutzt (DESTATIS, 2019) sowie weitere lokale Daten zur Wohnfläche, Neubauten, Mietpreisen und Bevölkerungszahlen vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung ([www.inkar.de](http://www.inkar.de)) verwendet.

<sup>11</sup> Als Heiztage werden diejenigen Tage bezeichnet, in denen die durchschnittliche Temperatur unter 15°C liegt. Die Gradtage berücksichtigen weitergehend die Temperaturdifferenz zwischen einer angenommenen 20°C-Raumwärme zur Außentemperatur. Monatsgradtage summieren die jeweiligen Gradtage eines Monats.

<sup>12</sup> Zur Einschätzung des Einflusses des Wetters werden die Monatsgradtage der beiden Jahre 2016/17 betrachtet, weil Haushalte ihre Heizkosten (Grundlage für die Berechnung der Emissionen) über monatliche Abschläge zahlen, die ihrerseits meist auf dem Verbrauch der Vorperiode beruhen. Da die Daten innerhalb der EVS im Jahr 2018 erhoben wurden und Anpassungen der Abschlagszahlungen durch die Betriebskostenabrechnung für 2017 unregelmäßig über das Jahr und die Haushalte verteilt sein dürften, werden beide Jahre (2016/17) berücksichtigt.

## 2.2. Messung gesellschaftlicher Kosten nicht-vermiedener Emissionen

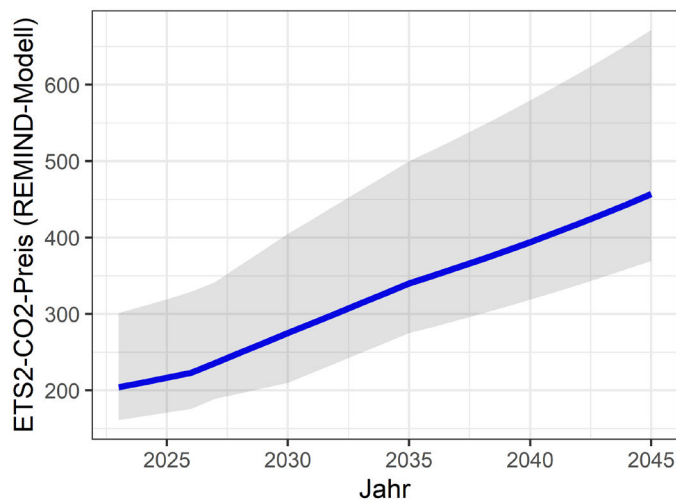


Abbildung 2 CO<sub>2</sub>-Preisfad auf Basis des EU-REMIND-Modells (Pietzcker, et al., 2021)

Wir kommen nun zur Methodik unserer Messung der gesellschaftlichen Kosten von heizbedingten Emissionen. Diese beruht auf dem CO<sub>2</sub>-Preisfad einer EU-REMIND-Modellierung (Pietzcker, et al., 2021). Die Autoren berechnen dabei mithilfe einer EU-Kalibrierung des REMIND-Modells („**R**egional **M**odel of **I**nvestment and **D**evelopment“) den volkswirtschaftlich optimalen CO<sub>2</sub>-Preisfad, um die Ziele des „Fit-for-55“-Politikvorhabens der EU<sup>13</sup> zu erreichen. Das REMIND-Modell optimiert den CO<sub>2</sub>-Preisfad unter Maßgabe der EU-Ziele, sodass für jeden Zeitabschnitt (hier ein Jahr) der CO<sub>2</sub>-Preis den Grenzvermeidungskosten einer weiteren emittierten Tonne CO<sub>2</sub> entspricht.

Ausgehend von diesem Zusammenhang verursacht jede nicht-vermiedene Tonne CO<sub>2</sub> gesellschaftliche Kosten in Höhe des CO<sub>2</sub>-Preises. Folglich messen unsere Analysen den maximalen effizienten Betrag, der innerhalb des Gebäudesektors spezifisch zur Emissionsvermeidung investiert werden sollte. Dabei ist es wichtig von einem volkswirtschaftlich optimalen Preisfad auszugehen, denn ansonsten könnte man die Ergebnisse nicht mehr normativ interpretieren. Wenn man zum Beispiel ineffizient niedrige CO<sub>2</sub> Preise ansetzen würde, so würden sich schon daraus nach unten verzerrte maximale Investitionsvolumina ergeben. Durch die Verwendung eines optimalen CO<sub>2</sub>-Preisfad soll eine solche Verzerrung ausgeschlossen und somit sichergestellt werden, dass die Ergebnisse unserer Analysen zur effizienten Steuerung von Subventionen dienen können.

Innerhalb der vorliegenden Analyse nutzen wir den berechneten Pfad zwischen 2026 und 2035 und extrapolieren ihn mit einer Rate von 3% für die Vor- und Folgejahre<sup>14</sup>, sodass sich der Zeithorizont auf 2023 bis 2045 erweitert. Die jeweiligen Preise sind in Abbildung 2 mit einem Unsicherheitsintervall (in grau) dargestellt, welches unterschiedliche Annahmen über die Preisentwicklung für CO<sub>2</sub>-Zertifikate innerhalb des EU-REMIND-Modells berücksichtigt (Pietzcker, et al., 2021). Der in Abbildung 2 als blaue Linie ausgewiesene Preisfad entspricht dabei einem mittleren Preisszenario, in dem der CO<sub>2</sub>-Preis von ca. 200 EUR im Jahr 2025 bis auf ca. 450 EUR pro Tonne CO<sub>2</sub> im Jahr 2045 steigt.

Der vorliegende Bericht verwendet den CO<sub>2</sub>-Preisfad, um die gesellschaftlichen Kosten von CO<sub>2</sub>-Emissionen in einem Szenario zu betrachten, in welchem die derzeitigen heizbedingten Emissionen des Gebäudesektors ohne Anpassungen bis zum Jahr 2045 (Jahr, in dem Deutschland treibhausgasneutral wirtschaften möchte) fortgeschrieben werden. Das bedeutet, dass für jedes Jahr bis 2045 eine gleichbleibende

<sup>13</sup> Diese bestehen aus einer Reduktion der Treibhausgasemissionen um 55% im Jahr 2030 im Vergleich zu 1990 sowie dem Erreichen der Treibhausgasneutralität im Jahr 2050.

<sup>14</sup> Dieser Annahme liegt die Hotelling-Regel zugrunde (erstmalig in Hotelling (1931)). Unter dieser Annahme entwickelt sich der Preis einer erschöpfbaren Ressource im Zeitverlauf mit der Zinsrate am Kapitalmarkt.

Menge von Emissionen im Wohngebäudesektor angenommen und zu den in Abbildung 2 dargestellten CO<sub>2</sub>-Grenzvermeidungskosten bewertet wird. Mithilfe einer 3%-Diskontrate<sup>15</sup> werden die so berechneten jährlichen Gesamtkosten auf einen Gegenwartswert diskontiert (siehe Seite 33). Das Ergebnis beschreibt jenes Kapital, das notwendig wäre, um bei einer Rendite von 3% Zahlungen zu generieren, die den Emissionskosten entsprechen. Das ist ein Schätzwert für das maximale gesellschaftliche Kapital, das anderweitig in der Volkswirtschaft ausgegeben werden müsste und entsprechend nicht zur Verfügung stehen würde, wenn die Emissionskosten im Gebäudesektor gleichblieben. Dieser Wert kann als Orientierungshilfe für den effizienten Umfang von Modernisierungsinvestitionen in deutsche Wohngebäude dienen.

### Zur Sonderrolle der Emissionen von Fernwärme und Strom

Der ETS2 erweitert den Emissionshandel ab 2027 zwar auf den Verkehrs- und Gebäudesektor, jedoch werden bestimmte Emissionen der Raumwärme bereits im ETS1 gehandelt. Dazu gehört die strombasierte Wärmeproduktion (Nachtspeicherheizungen, Wärmepumpen) sowie überwiegende Teile der Fern- und Nahwärmeproduktionsstandorte (ca. 88-90% (Kellner, et al., 2023)). Dementsprechend berücksichtigen wir diejenigen Haushalte mit einem solchen Heizsystem bei unserer Berechnung der CO<sub>2</sub>-Kosten nicht (ca. 18,5% der Haushalte in Deutschland im Jahr 2018). Zusätzlich nehmen wir vereinfachend an, dass sich die 11% (als Durchschnitt von 10-12%) der ETS2-relevanten Fernwärmeemissionen über die deutschen Haushalte und Regionen gleichverteilen, gleichwohl es nur einzelne Fernwärmeanlagen lokal betrifft. Eine genaue Identifizierung auf Grundlage des Wohnorts ist innerhalb des vorliegenden EVS-Datensatzes nicht möglich. Zudem reduzieren sich die Emissionen für diesen Energieträger durch den ETS1 innerhalb unserer Modellierung bis 2045 auf null, während die Emissionen durch Gas und Öl, wie oben beschrieben, als gleichbleibend angenommen werden.

---

<sup>15</sup> Die Wahl der Diskontrate ist a priori nicht eindeutig. In dieser Analyse nutzen wir eine Zinsrate, die in etwa die Kapitalkosten für Sanierungsmaßnahmen widerspiegelt. Zur Eingrenzung wurden Vergleichsportale verwendet, die grundsätzlich bei den gelisteten Angeboten eine gewisse Varianz der Zinssätze vorweisen, bei der 3% jedoch als mittlerer Wert identifiziert werden konnte.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Heterogenität heizbedingter Emissionen

Tabelle 1 präsentiert eine Analyse der jährlichen Haushaltsemissionen (in kg CO<sub>2</sub> pro Jahr) anhand von drei Modellen. Bei allen Modellen handelt es sich um OLS-Regressionen, die den Einfluss der in der linken Spalte der Tabelle 1 angeführten Haushaltsmerkmale auf die Höhe der CO<sub>2</sub>-Haushaltsemissionen bestimmen, wobei die Haushaltsmerkmale im Folgenden als die „erklärenden Variablen“ bezeichnet werden. Dabei werden in den verschiedenen Gruppen von kategorialen Haushaltsmerkmalen jeweils Referenzkategorien definiert (z. B. beim Gebäudetyp das freistehende Einfamilienhaus).

Tabelle 1 Einfluss und Relevanz verschiedener Variablen auf die jährlichen heizbedingten Haushaltsemissionen

Variable [Referenzkategorie]	A Gebäudevariablen	B + sozio-demografische	C Mieter-Subset
Haushaltsemissionen [kg CO <sub>2</sub> /a]			
<b>abhängige Variable</b>			
<b>Gebäudetyp [freistehendes Einfamilienhaus]</b>			
Doppelhaushälfte/Reihenhaus	-380 ***	-410 ***	-310 ***
Zweifamilienhaus	176 ***	174 ***	-159 ***
Mehrfamilienhaus	-339 ***	-379 ***	-427 ***
andere	-211 ***	-174 ***	-361 ***
<b>Baujahr [1949-1990]</b>			
vor 1949	193 ***	211 ***	119 ***
1991-2000	-210 ***	-213 ***	-23
2001-2010	-769 ***	-792 ***	-234 ***
nach 2011	-960 ***	-966 ***	-270 ***
<b>Heizsystem [Fernwärme]</b>			
Block-/Zentralheizung	-9	237	143
Etagenheizung	-341	-61	-163
Einzel-/Mehrraumöfen	-121	161	27
<b>Wohnsituation [Eigentümer-bewohnt]</b>			
Mieter	-32	135 ***	
mietfrei	86 *	201 ***	
<b>Wohnfläche [60-80m<sup>2</sup>]</b>			
weniger 40m <sup>2</sup>	-1101 ***	-590 ***	-589 ***
40-60m <sup>2</sup>	-516 ***	-265 ***	-242 ***
80-100m <sup>2</sup>	624 ***	461 ***	390 ***
100-120m <sup>2</sup>	1092 ***	831 ***	827 ***
120-140m <sup>2</sup>	1357 ***	1027 ***	943 ***
140-160m <sup>2</sup>	1720 ***	1345 ***	1590 ***
160-180m <sup>2</sup>	1900 ***	1493 ***	1957 ***
180-200m <sup>2</sup>	2300 ***	1830 ***	2813 ***
mehr 200m <sup>2</sup>	2775 ***	2294 ***	2466 ***
<b>Energieträger [Fernwärme]</b>			
Strom	-220	-396	-143
Gas	262	55	187
Öl	1185 **	1012	1065
<b>Durchschnitt der Referenzkategorien</b>	2564 ***		

Hinweise: Die Gebäude-/Haushaltseigenschaften in den eckigen Klammern geben die Referenzkategorie für die betrachtete kategoriale Variable an. Die angegebenen Werte sind daher – beispielhaft in Modell A – wie folgt zu interpretieren: Ein Haushalt in einem Mehrfamilienhaus stößt durchschnittlich 339 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr weniger aus als ein ansonsten gleiches/r Gebäude/Haushalt (Baujahr, Wohnsituation, etc.), der in einem freistehenden Einfamilienhaus wohnt. Gegeben des Durchschnitts aller Referenzkategorien in Modell A würde der Haushalt im Mehrfamilienhaus folglich 2.225 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr emittieren. Es wurde eine OLS-Regression („Ordinary Least Squares“) angewendet. Das Signifikanzniveau wird durch Sterne angegeben: \*\*\* p<0,01, \*\* p<0,05, \* p<0,1.

Der Einfluss der übrigen Kategorien versteht sich dann als Differenz zur Referenzkategorie. Negative Koeffizienten quantifizieren eine Reduktion in den Emissionen gegenüber der Referenzkategorie, positive Koeffizienten quantifizieren Mehr-Emissionen. Die Modelle A und B unterscheiden sich in Bezug auf die

erklärenden Variablen: In B sind zusätzlich soziodemografische Variablen berücksichtigt. Modell C gleicht Modell B, beruht aber nur auf den Daten der Haushalte, die zur Miete wohnen (ca. 48% der Haushalte in der EVS).

Im Schnitt betragen die heizbedingten Emissionen eines Haushalts 3.300 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr bei einer Standardabweichung von 2.260 kg CO<sub>2</sub>. Durch dieses hohe Maß der Streuung wird deutlich, wie unterschiedlich die Emissionen der Haushalte in Deutschland verteilt sind. Aus Tabelle 1 geht hervor, dass insbesondere freistehende Einfamilienhäuser, die Wohnfläche und der Energieträger Öl die Emissionen durch das Heizen erhöhen. Beispielsweise erhöht eine Wohnfläche zwischen 160-180m<sup>2</sup> (ca. 90. Perzentil der Verteilung) die Emissionen um 1.900 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr gegenüber einem Einfamilienhaus mit 60-80m<sup>2</sup> Wohnfläche. Haushalte mit einer Ölheizung emittieren durchschnittlich eine Tonne mehr CO<sub>2</sub> pro Jahr.

In Bezug auf das Vermieter-Mieter-Dilemma<sup>16</sup> fällt auf, dass der Umstand, dass ein Haushalt zur Miete wohnt, zunächst (Modell A) keinen Einfluss auf die Emissionsbilanz zu haben scheint (Koeffizient ist nicht signifikant von Null verschieden). Sobald man jedoch für soziodemografische Variablen kontrolliert (Modell B) zeigt sich, dass Mieterhaushalte durchschnittlich c. p. 5% höhere Emissionen vorweisen (+135 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr im Vergleich zum Durchschnittswert 2.560 kg CO<sub>2</sub> pro Jahr in Modell A). Dieser Unterschied zwischen Modell A und B ist getrieben vom Haushaltseinkommen<sup>17</sup>, das in Mieterhaushalten durchschnittlich niedriger ausfällt. In Modell A misst der Koeffizient der Kategorie „Mieter“ nicht nur den Unterschied zwischen Mieterhaushalten und Haushalten im eigenen Wohnraum per se, sondern auch den Unterschied, der sich Unterschieden im Einkommen dieser Gruppen von Haushalten zurechnen lässt. Rechnet man den Effekt von Unterschieden in diesen und anderen sozioökonomischen Merkmalen heraus, so ergibt sich das Ergebnis in Modell B. Da ärmere Haushalte grundsätzlich Anreize haben, weniger Energie zu verbrauchen, liegt es nahe, dieses Ergebnis als Hinweis auf einen schlechteren Gebäudezustand von Mietimmobilien zu interpretieren. Diese Interpretation ist konsistent mit dem kleineren emissionsreduzierenden Effekt von jüngeren Gebäuden relativ zur Referenzkategorie (Baujahr 1949-1990), der sich im Mieter-Subset (Modell C) zeigt, wenn man das Modell C mit den Modellen A und B vergleicht. Die Regressionsanalyse gibt somit erste Anhaltspunkte für einen strukturellen Unterschied zwischen Mieter- und Eigentümer-bewohnten Immobilien.

---

<sup>16</sup> Das Vermieter-Mieter-Dilemma (englisch, „landlord-tenant dilemma“) wird in der Literatur regelmäßig als Grund angeführt, weswegen die Gebäudeenergieeffizienz zwischen Eigentümern und Mietern abweicht. Da Mieter in Deutschland ihre Heizkosten meist selbst bezahlen, haben die Vermieter keinen Anreiz in die Gebäudeeffizienz zu investieren, da sie davon nicht direkt profitieren. Während die Gebäudehülle und die von Mietern verwendeten Haushaltsgeräte tatsächlich durchschnittlich ineffizienter sind als bei Eigentümer-bewohnten Gebäuden (Best, et al., 2021; Krishnamurthy & Kriström, 2015), besteht über das tatsächliche Vorhandensein eines Energiemehrverbrauchs und seiner Höhe noch keine Einigkeit in der Literatur (Allcott & Greenstone, 2012; Singhal, et al., 2023; Melvin, 2018).

<sup>17</sup> in dieser Studie durch die Haushaltskonsumausgaben approximiert.

## 3.2. Eine Haushalts- und Gebäudetypologie

Während in Tabelle 1 ein linearer Zusammenhang zwischen den jährlichen Haushaltsemissionen und den erklärenden Variablen angenommen wurde, muss dies in der Realität nicht zwingend zutreffen. Um potenziell nichtlineare Zusammenhänge zu beschreiben, nutzen wir im Folgenden Methoden des maschinellen Lernens („Regressionsbäume“). Der Regressionsbaum teilt den Datensatz an jedem Knotenpunkt entlang einer vom Algorithmus datenbasiert ausgewählten unabhängigen Variable wiederholt in zwei „Äste“ auf, in denen die Varianz der zu erklärenden Variable (Haushaltsemissionen) über alle einem Ast zugeordneten Beobachtungen am geringsten ausfällt. Mit jedem weiteren Knotenpunkt wird das Sample in Bezug auf die zu erklärende Variable homogener. Wichtig ist hierbei zu erwähnen, dass sich Methoden des maschinellen Lernens wie die hier verwendeten Regressionsbäume zwar sehr gut zur Vorhersage eines unsicheren Ereignisses auf Basis beobachtbarer Merkmale eignen, weniger jedoch zur Identifizierung kausaler Zusammenhänge (z. B. da bei starker Korrelation zweier Variablen möglicherweise nur eine der beiden zur Teilung des Datensatzes durch den Algorithmus verwendet wird, auch wenn die andere ursächlich ist (De'ath & Fabricius, 2000; Loh, 2014; Toth & Phipps, 2014)).

Abbildung 3 bildet den errechneten Regressionsbaum ab. Da die Wohnfläche stark Einfluss auf die Haushaltsemissionen nimmt (siehe Tabelle 1) und der Regressionsbaum ansonsten zu sehr von der Wohnfläche geprägt sein würde, wird an dieser Stelle die Emissionsintensität (kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>2</sup> und Jahr)<sup>18</sup> als abhängige Variable verwendet. Die Intensitäten in den Endpunkten steigen von links nach rechts (farblich von grün zu rot). Zunächst teilt der oben beschriebene Algorithmus den Datensatz in die Gruppen der mit Öl heizenden Haushalte und jene ein, die mit Gas, Fernwärme oder Strom heizen. Innerhalb der Heizöl-Verästelung ist die Frage der Eigentumsverhältnisse prägend. Haushalte, die zur Miete wohnen und mit Öl heizen, haben mit ca. 50 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>2</sup> und Jahr die höchste Emissionsintensität (ganz rechts im Baum). Diese Gruppe ist mit ca. 10,6% der Haushalte des Datensatzes auch eine nicht zu vernachlässigende Gruppe. In den anderen Gruppen korreliert die Emissionsintensität stark mit dem Baujahr der Immobilien. Überraschenderweise ist die Emissionsintensität bei Mietern auch bei den neuesten Gebäuden (seit 2001) höher als bei vergleichbaren Gebäuden, die von Eigentümern bewohnt sind. Dieser Unterschied ist vor dem Hintergrund ausgeweiteter baulicher Regulierung seit 2000 nicht unmittelbar zu erwarten. Überraschend ist auch, dass Zweifamilienhäuser oder Eigentümer-bewohnte Wohnungen in Mehrfamilienhäusern tendenziell eine höhere Emissionsintensität als andere Gebäudetypen vorweisen. Ein potenzieller Grund hierfür könnte in Koordinationsproblemen der beteiligten Parteien bei Fragen der energetischen Sanierung liegen.

Basierend auf der Kategorisierung durch die Methode des Regressionsbaums bestehen besonders relevante Gruppen mit einem hohen Potenzial für Emissionseinsparungen zum einen aus Haushalten in Gebäuden, die mit Öl beheizt werden (Mieterwohnungen [10,6%] und in älteren Eigentümer-bewohnten Häusern [9,6%]). Zum anderen bieten ältere Immobilien, die mit Gas beheizt werden (46,7%), ein hohes Potenzial. Dabei fallen Zweifamilienhäuser (4,0%) erneut als vergleichsweise emissionsintensiver auf.

---

<sup>18</sup> Eine übersichtliche Darstellung der Verteilung der Heizemissionsintensität nach Baujahr und Energieträger findet sich in Abbildung 9.

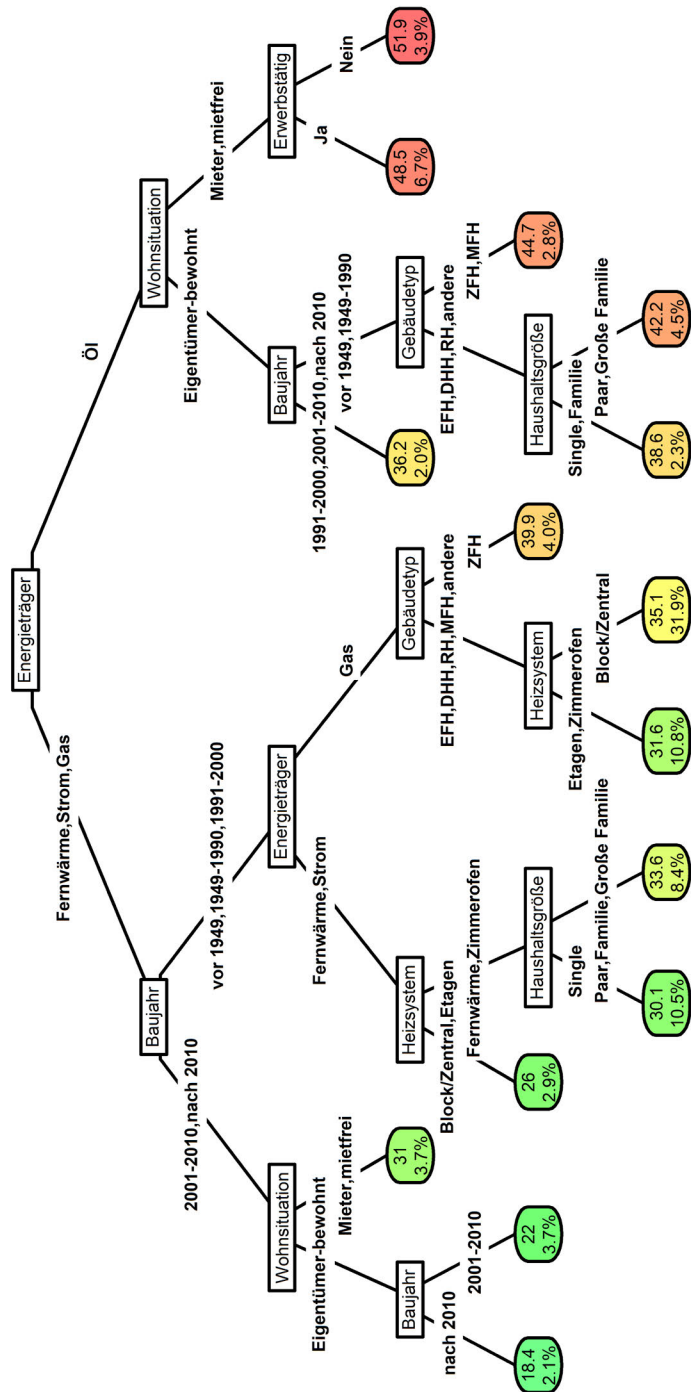


Abbildung 3. Regressionsbaum zur Identifizierung von Subgruppen der Emissionsintensität

Hinweise: Die Emissionsintensität ist in kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>2</sup> und Jahr angegeben. Der Regressionsbaum ist auf fünf Stufen begrenzt. Zudem wird die Auswahl in jedem Knotenpunkt derart beschränkt, dass über mindestens fünf Prozent der Beobachtungen des Ausgangsdatensatzes entschieden wird und jeder Endpunkt bzw. jeder Pfad dabei mindestens zwei Prozent des Datensatzes betrifft. Der Anteil der jeweiligen Äste am Datensatz wird in Prozent in den farbigen markierten Feldern angegeben, zusammen mit der durchschnittlichen Emissionsintensität der jeweiligen Gruppe. EFH: Einfamilienhaus, ZFH: Zweifamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus, DHH/RH: Doppelhaushälfte/Reihenhaus.



### 3.3. Regionale Verteilung heizbedingter Emissionen

Um die regionale Verteilung heizbedingter Emissionen aufzuzeigen, verwenden wir die unter 2.1. beschriebene Verknüpfung von EVS- und Zensusdaten. Abbildung 4 veranschaulicht einerseits die regionalen jährlichen heizbedingten Emissionen pro Kopf (Panel a) und andererseits die heizbedingten jährlichen Emissionen pro Wohnfläche in  $m^2$  (Panel b). Durchschnittlich betragen die Pro-Kopf-Emissionen eines Landkreises 1,58 Tonnen  $CO_2$  pro Jahr bei einer Standardabweichung von 0,15 Tonnen. Dabei zeigen sich regionale Unterschiede: Die Emissionen pro Kopf fallen beispielsweise in Landkreisen der Bundesländer Saarland, Rheinland-Pfalz, Bayern, Hessen und Schleswig-Holstein höher aus als in anderen Landkreisen Deutschlands. Das Ruhrgebiet, der Agglomerationsraum Berlin-Brandenburg sowie im Allgemeinen bevölkerungsreiche Landkreise (Großstädte) fallen hier besonders auf. Die Emissionsintensität (Emissionen pro Wohnfläche) zeigt ein gegensätzliches Muster (Panel b): Vor allem flächenmäßig kleinere Landkreise, die sich durch einen verstärkten Raum auszeichnen, weisen höhere Emissionen pro Quadratmeter auf, vermutlich getrieben durch die hohe Bevölkerungsdichte. Das führt dazu, dass ländliche Landkreise, in denen weniger Menschen auf mehr Quadratmetern wohnen, eine geringere Emissionsintensität zeigen. Abbildung 12 im Anhang veranschaulicht diesen Zusammenhang. Durchschnittlich liegt die Intensität eines Landkreises bei 32  $kg CO_2$  pro  $m^2$  und Jahr bei einer Standardabweichung von 1,7  $kg CO_2$ .

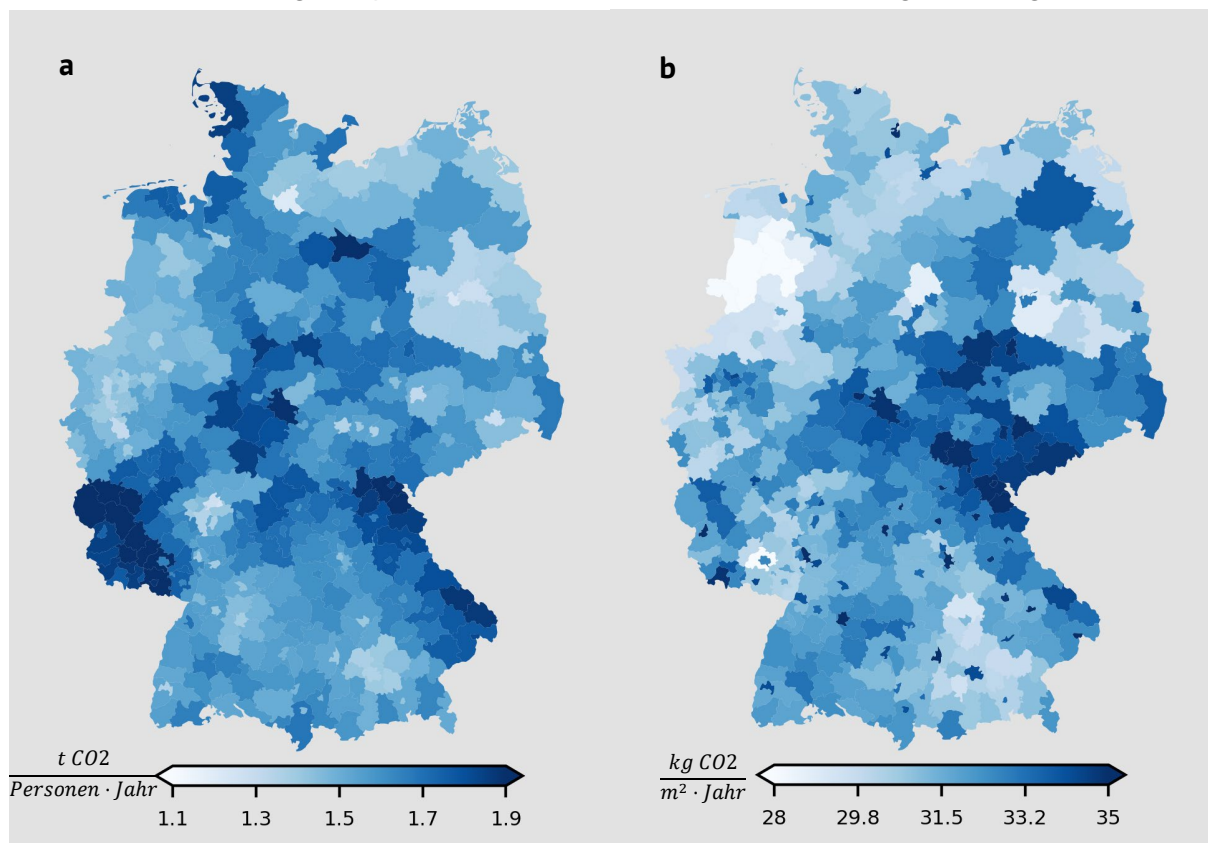


Abbildung 4 Regionale heizbedingte jährliche Emissionen pro-Kopf (a) und pro Wohnfläche in  $m^2$  (b)

Dabei ist der Anteil einzelner Energieträger zum Heizen zwischen den Regierungsbezirken unterschiedlich verteilt, wie Abbildung 13 darstellt. Während Gas in allen Regionen einen hohen Anteil ausmacht, ist dieser in nordwest- und westdeutschen Bundesländern besonders ausgeprägt. Haushalte in Süddeutschland



heizen dagegen vergleichsweise häufiger mit Öl, während in den ostdeutschen Bundesländern und den Stadtstaaten ein deutlich höherer Anteil der Haushalte mit Fernwärme heizt. Die unterschiedliche Verteilung der Energieträger in den Bezirksregionen hat aber vermutlich einen geringen zusätzlichen Einfluss auf mögliche Unterschiede zwischen den Landkreisen in Abbildung 4, da die Kohlenstoffintensitäten für die drei relevantesten Energieträger (Gas, Öl, Fernwärme) für das Jahr 2018 sehr ähnlich ausfallen (siehe Tabelle 2).

### 3.4. Kapitalisierte Kosten des Nicht-Sanierens

Eine wichtige Grundlage zur Erarbeitung kosteneffizienter Politikmaßnahmen besteht darin, zunächst zu bewerten, welche Gebäudetypen bzw. Heizsysteme die höchsten gesellschaftlichen Kosten verursachen, und, wie diese minimiert werden können. Eine solche Betrachtung wird im nun folgenden Teil vorgenommen.

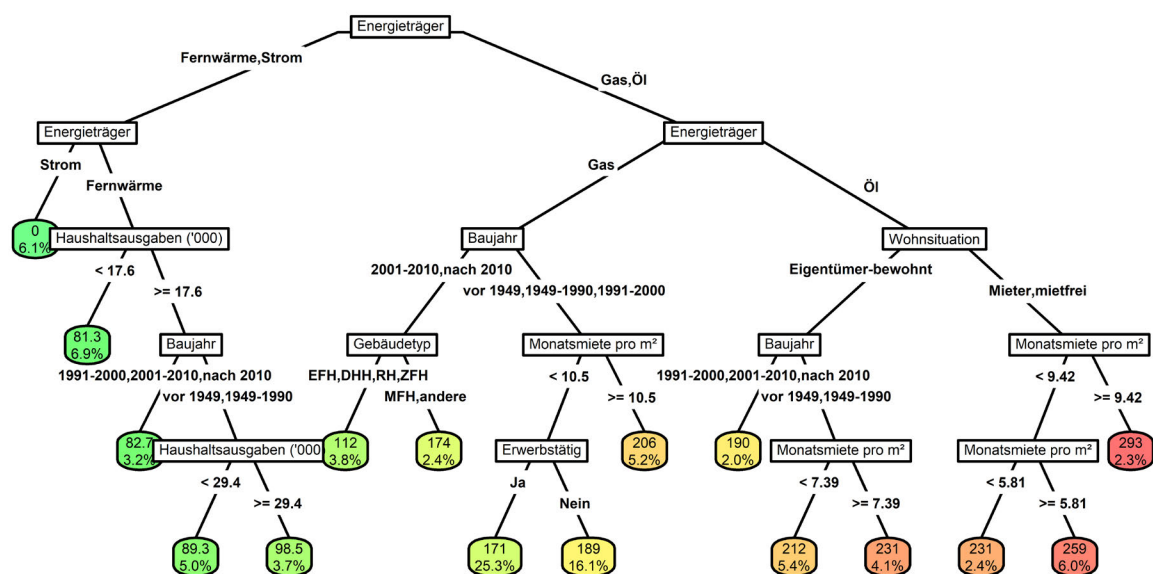


Abbildung 5 Kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten pro m<sup>2</sup> nach Gebäude-spezifischen und soziodemografischen Merkmalen eines Haushalts  
 Hinweise: Das CO<sub>2</sub>-Kostenaufteilungsgesetz zwischen Vermietern und Mietern ist hier nicht berücksichtigt. Der Baum wird in gleicher Weise restringiert wie derjenige in Abbildung 3. Der Anteil der jeweiligen Äste am Datensatz wird in Prozent in den farbigen markierten Feldern angegeben, zusammen mit der durchschnittlichen Emissionsintensität der jeweiligen Gruppe. EFH: Einfamilienhaus, ZFH: Zweifamilienhaus, MFH: Mehrfamilienhaus, DHH/RH: Doppelhaushälfte/Reihenhaus.

Wie in Abschnitt 2.2. beschrieben, nutzen wir zur Quantifizierung der heizbedingten Emissionskosten einen effizienten CO<sub>2</sub>-Preispfad von Pietzcker et al. (2021). Unter der Annahme gleichbleibender Emissionen kann dann bewertet werden, welchem Kapital die gesellschaftlichen Kosten der Emissionen im Gebäudebestand bis 2045 entsprechen<sup>19</sup>. Wir bezeichnen das Resultat als kapitalisierte Kosten des „Nicht-Sanierens“, wobei unterstellt wird, dass es nicht schon aufgrund eines technischen Fortschritts zu Emissionseinsparungen kommt, wenn Gebäude oder deren Haustechnik instandgesetzt werden. Zudem werden

<sup>19</sup> Eine übersichtliche Darstellung der Verteilung der kumulierten und diskontierten CO<sub>2</sub>-Kosten nach Baujahr und Energieträger findet sich in Abbildung 10.

die kapitalisierten Kosten relativ zu einem Szenario gemessen, in dem die heizbedingten Emissionen der Wohngebäude auf null gesenkt werden.

Abbildung 5 präsentiert einen Regressionsbaum, der sich von jenem in Abbildung 3 unterscheidet, da nun eine Klassifikation anhand der kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten des Nicht-Sanierens vorgenommen wird, statt anhand der heizbedingten Emissionen. Die kapitalisierten Kosten sind die diskontierten Kosten bis zum Jahr 2045 und damit die Investitionshöhe die maximal möglich ist, damit sich die eingesparten CO<sub>2</sub>-Kosten bis 2045 gerade noch amortisieren. Der Regressionsbaum unterscheidet zunächst anhand des Energieträgers zwischen den beiden Gruppen „Fernwärme, Strom“ und „Gas, Öl“. Dieses Ergebnis resultiert aus der Begrenzung der Analyse auf CO<sub>2</sub>-Kosten aus dem ETS<sub>2</sub> (siehe 2.2). Die unter „Fernwärme, Strom“ aufgeführten Haushalte emittieren beim Heizen zwar ebenfalls CO<sub>2</sub>, jedoch werden diese Emissionen bereits im ETS<sub>1</sub> gehandelt, weswegen die von Pietzcker et al. (2021) berechneten jährlichen CO<sub>2</sub>-Preise auf diese Bereiche nicht anwendbar sind. Einerseits sind die Klimaziele durch den ETS<sub>1</sub> in den Preisen von Strom und Fernwärme bereits jetzt schon eingepreist, andererseits werden die Anbieter dieser Energieträger von sich aus die Emissionen auf netto-null senken. Damit dekarbonisieren sich Wohnungen, die mit Strom und Fernwärme heizen, praktisch „von selbst“, das heißt ohne zusätzliche Investitionsentscheidung der Haushalte.

Die unter der Gruppe „Gas, Öl“ beschriebenen Pfade führen zu kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten, die zwischen 112 und 293 EUR pro m<sup>2</sup> Wohnfläche variieren. Für die deutliche Mehrheit der deutschen Haushalte fallen durchschnittliche kapitalisierte Kosten von mehr als 170 EUR pro m<sup>2</sup> Wohnfläche an. Gesamtgesellschaftlich lohnt es sich also, für die beschriebenen Gebäude einen äquivalenten Betrag der Haushaltsemissionen pro m<sup>2</sup> zu investieren, da dies langfristig CO<sub>2</sub>-Kosten gleicher Höhe vermeidet. Innerhalb derjenigen Haushalte, die mit Öl heizen, findet der Regressionsbaum darüber hinaus eine Korrelation von Mieterhaushalten mit den CO<sub>2</sub>-Kosten. Durchschnittlich führen diese Pfade zu kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten, die für Eigentümer-bewohnte Haushalte bevölkerungsgewichtet ca. 21% niedriger ausfallen<sup>20</sup>.

Die Folgepfade, die sich von der „Energieträger“-Verzweigung zu „Gas“ abspalten, zeichnen sich durch niedrigere kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten des Nicht-Sanierens aus. Innerhalb dieser Pfade weist die Variable „Baujahr“ eine erhebliche Korrelation mit den kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten auf. Auffällig sind hier die um 55% höheren Beträge von Mehrparteienhäusern gegenüber Ein-/Zweifamilienhäusern bei Gebäuden, die erst nach 2001 gebaut wurden. Bei Ersteren scheinen Sanierungsmaßnahmen stärker angeraten.

Auch die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten lassen sich mit der in Abschnitt 2.2. beschriebenen Methode in Bezug auf deren geografische Verteilung innerhalb Deutschlands darstellen. Abbildung 6 beschreibt die geografische Verteilung einerseits pro Bundesbürger (Panel a) und andererseits pro Quadratmeter Wohnfläche (Panel b). Auffällig ist hier der Unterschied zwischen west- und ostdeutschen Landkreisen, wobei die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten in Ostdeutschland im Schnitt geringer ausfallen. Der Grund hierfür liegt v. a. in Unterschieden bezüglich der Bedeutung der Energieträger Strom und Fernwärme, deren Emissionskosten in der vorliegenden Analyse wegen der Zugehörigkeit zum ETS<sub>1</sub> nicht berücksichtigt werden. Diese Energieträger sind in Ostdeutschland und den Stadtstaaten besonders ausgeprägt (siehe Abbildung 13). Zu

---

<sup>20</sup> Wie bereits erwähnt, ist dieser Zusammenhang als Korrelation zu verstehen. Die in Tabelle 1 dargestellte Regressionsanalyse gibt einen präziseren Einblick in mögliche kausale Zusammenhänge.

einem ähnlichen Ergebnis ist jüngst auch eine Auswertung der Deutschen Energie-Agentur (dena) gekommen (Gebäudeforum Klimaneutral, 2023). Im Mittel über alle Landkreise liegen die kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten der heizbedingten Emissionen pro Kopf bei 7.430 EUR bei einer Standardabweichung von 1.100 EUR (Min: ~3.920 EUR, Max: ~10.180 EUR). Bezogen auf die Wohnfläche ergibt sich ein Betrag von ca. 150 EUR pro m<sup>2</sup> bei einer Standardabweichung von 15 EUR (Min: ~97 EUR, Max: ~186 EUR).

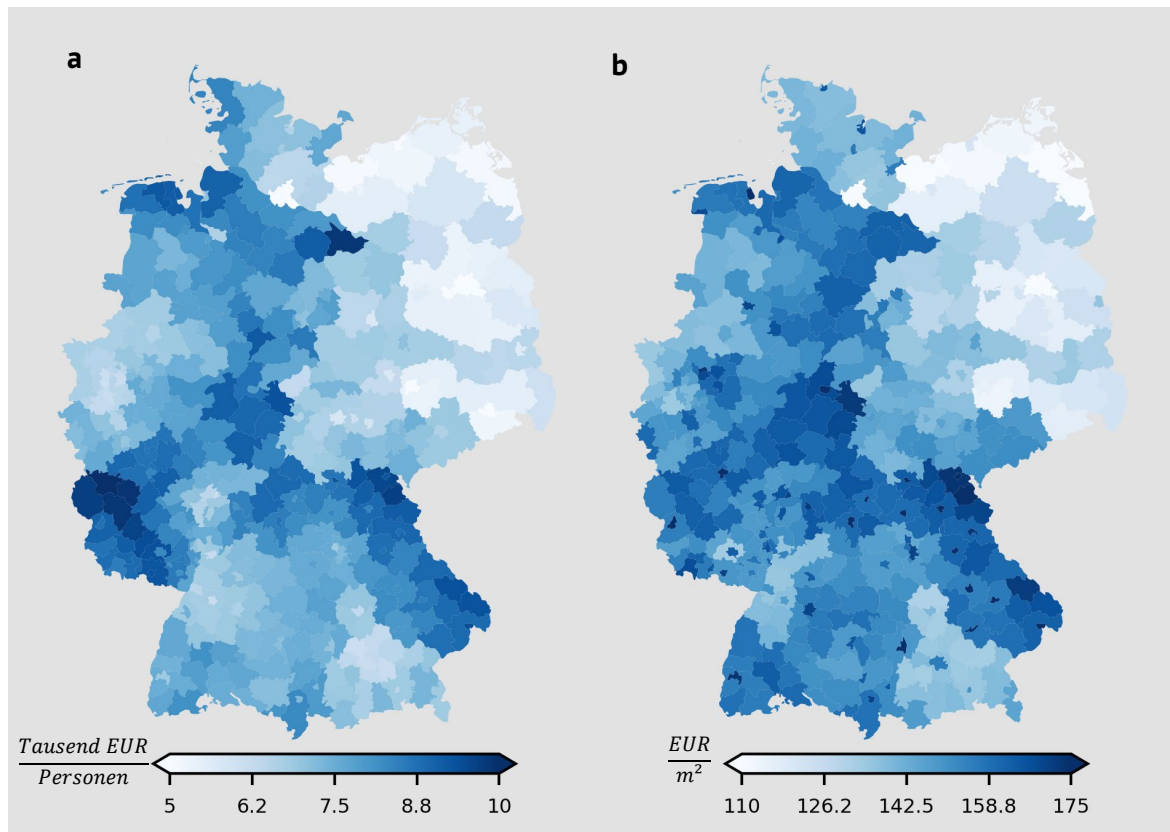


Abbildung 6 Kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten pro Kopf und pro m<sup>2</sup> Wohnfläche

Zum Abschluss unserer Analyse vergleichen wir die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten heizbedingter Emissionen mit dem Ertragspotenzial von Wohnimmobilien. Wie oben beschrieben, messen wir die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten als jenes Kapital, das erforderlich ist, um bei einer Rendite von 3% Zahlungen zu generieren, die den jährlichen CO<sub>2</sub>-Kosten der heizbedingten Emissionen deutscher Wohngebäude bis 2045 entsprechen. Wie hoch ist dieser Betrag relativ zu dem Wert von Mieteinnahmen? Diese Frage erlaubt Rückschlüsse auf die Finanzierbarkeit von Investitionen, die effizient erscheinen, um Emissionen im Gebäudesektor zu vermeiden. Dies sind nicht notwendigerweise die Investitionen, die tatsächlich erforderlich wären, um eine vollkommene Emissionsvermeidung zu erreichen. Wir messen stattdessen direkt die Finanzierbarkeit des gesellschaftlichen Werts, der einer vollkommene Emissionsvermeidung im Gebäudesektor zugeschrieben werden kann, wenn man unterstellt, dass es ansonsten zu gar keiner Reduktion heizbedingter Emissionen kommen würde. Liegen die tatsächlichen Investitionskosten über diesem Wert, so stellt sich die Frage, ob sie überhaupt effizient sind, d. h. ob die Emissionsreduktion nicht vielleicht besser außerhalb des Gebäudesektors stattfinden sollte.

Die Analyse erfolgt in zwei Schritten. Wir berechnen zunächst den Ertragswert der deutschen Wohngebäude als jenes Kapital, das bei einer Rendite von 3% notwendig ist, um Zahlungen zu generieren, die den Mieten bis 2045 entsprechen. Dieses Kapital setzen wir anschließend ins Verhältnis zu ebenso kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten der heizbedingten Emissionen<sup>21</sup>.

Innerhalb der EVS werden Daten zu den gezahlten Mietpreisen pro Haushalt zur Verfügung gestellt. Für Eigentümer-bewohnte Wohneinheiten wird die Kaltmiete seitens des Statistischen Bundesamts geschätzt. Auf der Grundlage dieser Daten ergibt sich die Verteilung der kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten in Prozent des Werts der Nettokaltmiete, die in Panel a von Abbildung 7 dargestellt ist. Zusätzlich können die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten als Vielfaches der gezahlten/geschätzten monatlichen Nettokaltmiete eines Haushalts dargestellt werden (Panel b in Abbildung 7). Diese Betrachtung kann als „Break-even“-Überschlagsrechnung verstanden werden: Wie viele Monatsmieten wären erforderlich, um einen „Break-even“ auf das maximale Investitionsvolumen zu erreichen, bei dem es optimal wäre, heizbedingte Emissionen vollständig zu vermeiden?<sup>22</sup>

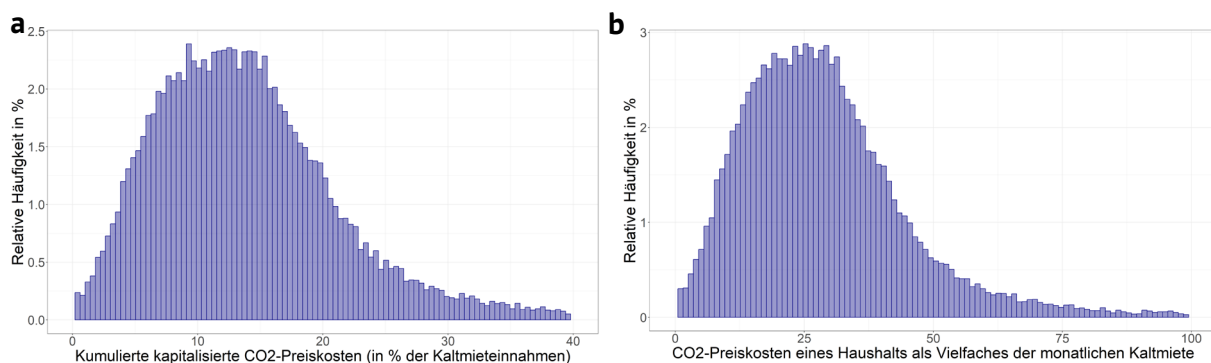


Abbildung 7 Verteilung und Höhe der kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten

Hinweise: Panel a setzt die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten eines Haushalts zu den kapitalisierten Nettokaltmietzahlungen ins Verhältnis. Panel b gibt an, welche Anzahl von Kaltmieten einen Break-even auf den Wert der CO<sub>2</sub>-Kosten erlaubt. Es wurden in beiden Diagrammen ausschließlich die Haushalte berücksichtigt, die mit Gas oder Öl heizen.

Für das beschriebene CO<sub>2</sub>-Preisszenario des EU-REMIND-Modells ergeben sich Werte der CO<sub>2</sub>-Kosten heizbedingter Emissionen bis 2045, die im Median 13% des Werts der Kaltmietzahlungen im gleichen Zeitraum betragen (Durchschnitt: 15%), wobei dieser Anteil zwischen den Haushalten stark schwankt. So liegen das 25. Perzentil mit 8,6% und das 75. Perzentil mit 18,2% ca. 9,6 Prozentpunkte auseinander.<sup>23</sup> Es zeigt sich beispielsweise, dass Haushalte, die in Gegenden mit niedrigem Mietniveau leben, mit überproportional starken CO<sub>2</sub>-Kosten konfrontiert sind (siehe Abbildung 18)<sup>24</sup>.

<sup>21</sup> Dabei werden die angegebenen Mietpreise (exkl. Energiekosten) um die kalten Betriebskosten nach Bundesland bereinigt (basierend auf DESTATIS (2019)). Zusätzlich wird das Preisniveau angepasst. Die Preise in der EVS gelten für das Jahr 2018 und werden auf das Jahr 2021 (EU-REMIND-Preise Pietzcker et al. (2021)) mithilfe des Verbraucherpreisindexes fortgeschrieben ( $i = \{1,4|0,5|3,1\}$  als Prozentänderung der Vorjahrespreise zwischen 2018 und 2021, siehe DESTATIS (2023)).

<sup>22</sup> Diese Betrachtung nutzt die im Jahr 2018 (EVS-Daten) gezahlte Monatsnettokaltmiete von Haushalten (in Preisen von 2021) und sieht von einer Diskontierung zukünftig verlorener Mieteinnahmen (Vermieter) bzw. implizit zu zahlender Mietzahlung (Eigentümer) ab. Gleichzeitig wird angenommen, dass die Inzidenz bei den Vermietern liegt.

<sup>23</sup> Eine zusätzliche Perspektive auf die gesellschaftliche Bedeutung dieser kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten bietet Abbildung 14, in welcher die Verteilungsfunktion der geschätzten CO<sub>2</sub>-Kosten dargestellt sind.

<sup>24</sup> Da die Kaltmiete zur Berechnung des verwendeten Indikators für die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten verwendet wird, hängt die Größenordnung dieses überproportionalen Zusammenhangs von der Annahme der Mietpreiserhöhungen ab. In dieser Analyse nehmen wir keine steigenden Mieten an. Steigen die Mieten jedoch weniger stark als die CO<sub>2</sub>-Kosten und unterschiedlich stark in verschiedenen Regionen (Stadt/Land), bleibt ein überproportionaler Zusammenhang bestehen.

Panel b in Abbildung 7 beschreibt den Wert der CO<sub>2</sub>-Kosten der heizbedingten Emissionen eines Haushalts bis 2045 als Vielfaches der (implizit) gezahlten monatlichen Nettokaltmiete. Es handelt sich, wie oben beschrieben um die Verteilung der Anzahl von Nettokaltmieten, die einen Break-even auf das maximale Investitionsvolumen ermöglichen, das zur Vermeidung jeglicher heizbedingten Emissionen deutscher Wohngebäude effizient sein kann. Die Analyse zeigt, dass diese Break-even-Punkte für die Mehrheit der Haushalte bei über zwei Jahren liegen und um einen Median von 27 Monaten schwanken. Das 75. Perzentil liegt bei 30 Monaten<sup>25</sup>. In einer Robustheitsanalyse prüfen wir eine alternative Perspektive mit einer Erweiterung des Zeithorizonts bis 2100 (siehe Abbildung 16). Dabei zeigt sich eine Verschiebung und Stauchung der Verteilung mit Medianwerten von 23% bzw. 49 Monaten<sup>26</sup>.

### 3.5. Regionale Betroffenheit und Förderpriorisierung

Abbildung 8 veranschaulicht abschließend eine Schätzung der kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten auf Landkreisebene und die sich durch den Mietwert ergebende regionale Betroffenheit. Dazu wurde in Panel a der Quotient aus den kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten und den kapitalisierten Nettokaltmieten der vorhandenen Wohnfläche berechnet. Das Verhältnis variiert zwischen 3,8 und 16,5%<sup>27</sup>. Im bundesweiten Durchschnitt beträgt es 9,7% bei einer Standardabweichung von 2,4 Prozentpunkten. Auffällig ist, dass die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten in dichter besiedelten Landkreisen geringer ausfallen – also dort, wo die Mietwerte höher liegen<sup>28</sup>.

Dieser Zusammenhang lässt sich auch grafisch abtragen. Abbildung 19 stellt der Bevölkerungsdichte eines Landkreises ihre geschätzten kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten gegenüber. Die durchgeführte Regression zeigt, dass ein Anstieg der Bevölkerungsdichte um 1% mit einem um ca. 0,007 Prozentpunkte signifikant niedrigeren Wert der Kosten heizbedingter Emissionen einhergeht. Das bedeutet, dass insbesondere in den Stadtstaaten (sowie in ihren Agglomerationsräumen) und in anderen Großstädte durch die Vermeidung heizbedingter Emissionen im Verhältnis zum Wert der Mieten weniger gesellschaftlicher Nutzen entsteht (bis 8%) als in ländlich geprägten Landkreisen.

Um den beschriebenen Zusammenhang noch genauer darzustellen und die einzelnen Landkreise gegeben knapper notwendiger öffentlicher Gelder zu priorisieren, nutzen wir einen Indikator, der in drei Schritten berechnet wird. Im ersten Schritt wird die Verteilung der kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten pro m<sup>2</sup> bis 2045 in Dezile eingeteilt. Im zweiten Schritt wird Selbiges mit der Verteilung der regionalen Break-even-Punkte unternommen, die am Ende des letzten Abschnitts präsentiert wurde (siehe Panel b von Abbildung 7). Der

<sup>25</sup> Diese Analyse nutzt den mittleren CO<sub>2</sub>-Preisfad von Pietzcker et al. (2021). Der Einfluss unterschiedlicher Annahmen über den Markthochlauf und dementsprechend resultierender Werte für die gezeigten Scatterplots kann der Abbildung 15 entnommen werden.

<sup>26</sup> In diesem Szenario wurde angenommen, dass der CO<sub>2</sub>-Preis nach 2045 auf selbigem Niveau verharrt. Der weitere Verlauf ist a priori nicht eindeutig: Durch weitere folgende Entwicklungsschübe der CO<sub>2</sub>-Vermeidungstechnologien könnte der CO<sub>2</sub>-Preis nach 2045 fallen, aber auch steigen, falls die Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-Emissionen steigt. Der Verlauf des Preisfadens kann jedoch nicht mehr als Hotelling-Pfad mit einer 3%-Rate angenommen werden, weil die Emissionen ab 2045 konstant bei Netto-null liegen.

<sup>27</sup> Zur Abschätzung des impliziten Immobilienvermögens eines Landkreises wurde der durchschnittliche Kaltmietpreis (ohne Betriebskosten) eines Landkreises genutzt ([www.inkar.de](http://www.inkar.de)). Die Daten stammen von inserierten Immobilienangeboten und liegen kategorial vor (1 EUR-Abstände).

<sup>28</sup> Abbildung 17 stellt die geschätzten diskontierten Mietwerte pro Quadratmeter auf Landkreisebene dar.



Indikator ergibt sich anschließend im dritten Schritt als Produkt der Dezilkennziffern beider Verteilungen. Der Minimalwert eins (Produkt aus den Dezilwerten eins und eins) gibt an, dass Wohnungen nicht von CO<sub>2</sub>-Kosten betroffen sind, während der Maximalwert 100 angibt, dass Wohnungen zur Gruppe der Wohnungen mit den höchsten kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten pro m<sup>2</sup> und den höchsten Break-even-Punkten gehören.

Die Verteilung bietet Anhaltspunkte für eine effiziente regionale Priorisierung knapper öffentlicher Fördermittel, denn bei hohen kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten (je m<sup>2</sup> bis 2045) ist die Reduktion von Emissionen gesellschaftlich besonders wertvoll und bei hohen Break-even-Punkten sind gleichzeitig Zuschüsse und Förderprogramme essenziell, um die dafür notwendigen Investitionen zu finanzieren. Solche Investitionen würden ansonsten wahrscheinlich oftmals ausbleiben, weil sie Gebäudeeigentümern (bzw. deren Banken) als schwer finanzierbar erscheinen.

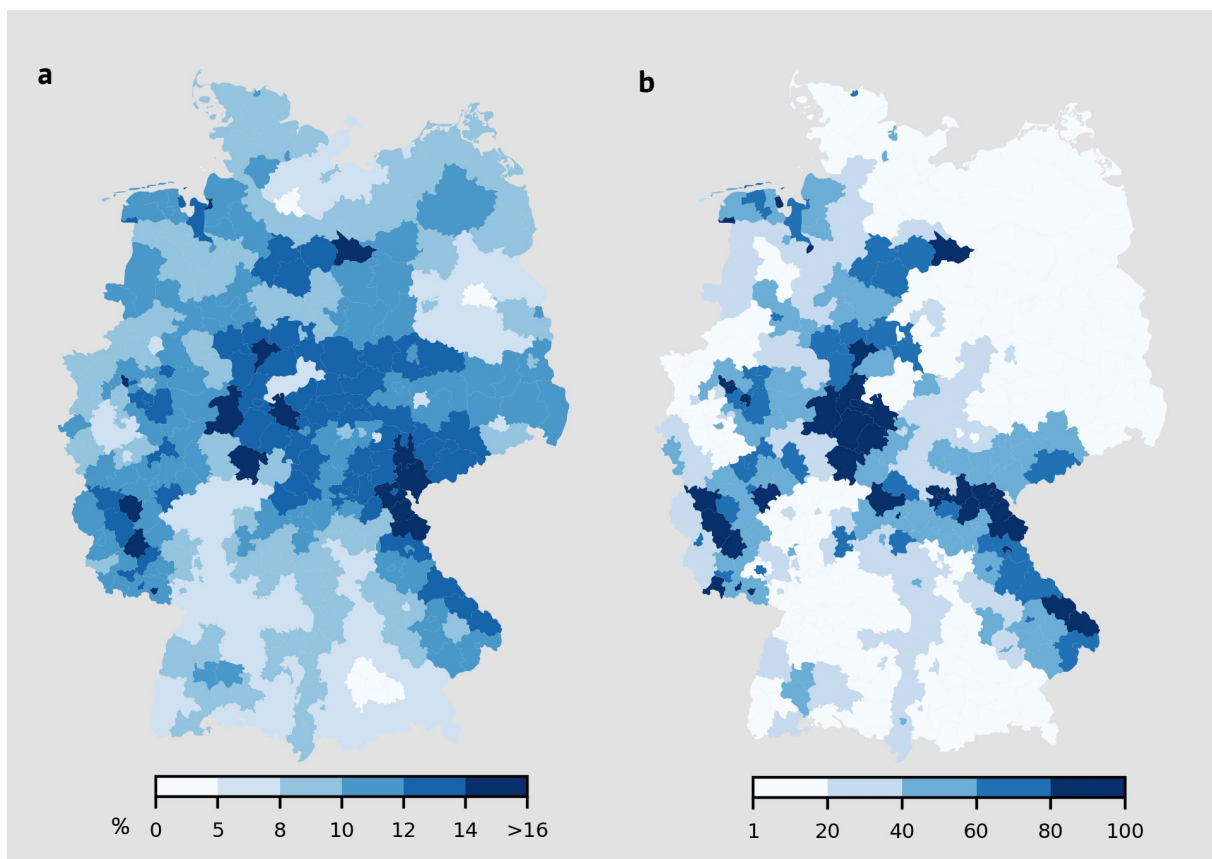


Abbildung 8 Regionale Betroffenheit und kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten als Anteil des Mietwerts (in %)

Hinweise: Panel a zeigt die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten als Anteil des Mietwerts (in %). Panel b erweitert diese Perspektive: Zunächst wurde für jeden Landkreis das jeweilige Dezil der Gesamtverteilung der regionalen kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten pro m<sup>2</sup> bestimmt. Anschließend wurden die regionalen Break-even-Punkte wie in Abbildung 7 als Quotient aus den kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten und dem monatlichen Mietwert bestimmt. Auch für diese Werte wurde die regionale Zugehörigkeit zum jeweiligen Dezil bestimmt. Beide Dezilwerte einer Region wurden anschließend multipliziert. Das Ergebnis kann zwischen 1 und 100 variieren, wobei der Wert 100 Regionen mit vermutlich höchster Förderbedürftigkeit markiert. Der Mietwert wurde dabei auf Basis von kategorialen Nettokaltmietpreisdaten auf Landkreisebene approximiert ([www.inkar.de](http://www.inkar.de)).

Der deutschlandweite Durchschnitt des Förderindikators liegt über alle Landkreise bei 32 (Standardabweichung: 27, siehe Abbildung 8b). Regionen in Teilen von Rheinland-Pfalz, Hessens, Bayerns, Niedersachsens und auch Nordrhein-Westfalens fallen durch unseren Indikator als besonders förderbedürftig auf. Demgegenüber erweisen sich Regionen in Nord-/Ost- und Süddeutschland als wenig betroffen. Dies ist wie die Analysen oben zeigen, entweder durch relativ geringe kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten oder durch relativ hohe Mietwerte getrieben. Abbildung 20 befasst sich zuletzt mit möglicherweise vorhandener Heterogenität dieser Ergebnisse anhand von Darstellung der EVS-Haushaltsdaten. Ältere, mit Öl beheizte und ländlich gelegene Wohneinheiten fallen hier als förderungsbedürftig auf.

## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Vor dem Hintergrund der durch das EU-Parlament beschlossenen Ausweitung des Emissionshandels auf den Wärme- und Verkehrssektor untersucht diese Analyse, welche Haushaltsmerkmale zu besonders hohen heizbedingten Emissionen führen und wie diese in Deutschland regional verteilt sind. Zudem schätzen wir die sozialen Kosten des gegenwärtigen Heizsystems unter der Annahme gleichbleibender Emissionen und eines optimalen CO<sub>2</sub>-Preispfads (EU-REMIND, Pietzcker et al. (2021)).

Durch eine Verschneidung mehrerer Datensätze kann die Verteilung und Höhe der Emissionen und CO<sub>2</sub>-Kosten erstmals umfassend und regional aufgelöst (Landkreisebene) dargestellt werden. Es zeigt sich, dass die gesellschaftlichen Kosten der heizbedingten Emissionen stark über verschiedene Arten von Haushalten variieren. Die Kosten fallen auch regional stark unterschiedlich aus: Insbesondere in Ostdeutschland und in den Stadtstaaten fallen die CO<sub>2</sub>-Kosten durch den größeren und mehrheitlich bereits im ETS1 befindlichen Fernwärmesektor geringer aus. Dieser Unterschied relativiert sich jedoch etwas, sobald man die Kosten in Relation zu dem Wert der Wohnfläche eines Landkreises setzt (hier approximiert durch die Mietpreise). In besonders dichtbesiedelten Gegenden, wo Wohnraum sehr nachgefragt ist, fällt der Anteil der CO<sub>2</sub>-Kosten geringer aus, während er in mietpreisgünstigeren Gegenden (mittleres Deutschland, Teile Ostdeutschlands, Bayerns und Rheinland-Pfalz) deutlich höher ausfällt.

Die hier durchgeführte Betrachtung verweist auch auf die Herausforderungen der Transformation des Gebäudesektors. Die Orientierung an CO<sub>2</sub>-Kosten verdeutlicht, dass nicht alle energetischen Sanierungsmaßnahmen volkswirtschaftlich sinnvoll sind. Maßnahmen mit geringen Kosten und hohen Emissionseffekten – wie die Umrüstung auf Wärmepumpe oder Fernwärme – erscheinen für viele Wohneinheiten sinnvoll. Allerdings kann es bei hohen Investitionskosten eben auch sinnvoll sein, eine Emissionseinsparung hinauszuzögern (und zunächst in einem anderen Sektor vorzunehmen) bis CO<sub>2</sub>-Preise entsprechend hoch oder Investitionskosten durch technischen Fortschritt gefallen sind. In Gegenden mit geringen Mietpiegelwerten und geringen Immobilienwerten kann eine hohe CO<sub>2</sub>-Bepreisung ohne entsprechende finanzielle Kompensationsmaßnahmen Immobilienbesitzer in finanzielle Schwierigkeiten führen: Einerseits werden die Kosten des Nicht-Sanierens durch die CO<sub>2</sub>-Bepreisung hier sehr hoch, andererseits werden diese Eigentümer aufgrund des relativ geringen Immobilienwertes Schwierigkeiten haben, eine Sanierung

zu finanzieren. Die hier dargestellten Analysen geben Anhaltspunkte dafür, wie Fördermittel effizient regional verteilt werden können. Zudem legen wir eine Typologie von Haushalten vor, die bei der Gestaltung von Förderungsmaßnahmen berücksichtigt werden sollte.

## 5. Literaturverzeichnis

- Allcott, H. & Greenstone, M., 2012. Is There an Energy Efficiency Gap?. *Journal of Economic Perspectives*, February, Band 26, p. 3–28.
- BDEW, 2023. *Beheizungsstruktur des Wohnungsbestandes in Deutschland*, s.l.: s.n.
- Best, R., Burke, P. J. & Nishitaten, S., 2021. Factors Affecting Renters' Electricity Use: More Than Split Incentives. *The Energy Journal*, September, Band 42.
- Cischinsky, H. & Diefenbach, N., 2018. *Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016. Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand*, s.l.: s.n.
- De'ath, G. & Fabricius, K. E., 2000. Classification and Regression Trees: A Powerful Yet Simple Technique for Ecological Data Analysis. *Ecology*, Band 81, p. 3178–3192.
- DESTATIS, 2019. *Wohnen in Deutschland – Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018*, s.l.: s.n.
- DESTATIS, 2023. *Verbraucherpreisindex: Deutschland, Jahre*, s.l.: s.n.
- Frederiks, E., Stenner, K. & Hobman, E., 2015. The Socio-Demographic and Psychological Predictors of Residential Energy Consumption: A Comprehensive Review. *Energies*, January, Band 8, p. 573–609.
- Frondel, M. et al., 2022. *So wird geheizt: Ergebnisse des Wärme- und Wohnen-Panels 2021*, s.l.: s.n.
- Gebäudeforum Klimaneutral, 2023. *GEG-Novelle 2024 – Vergleich des Ost-West-Gebäudebestandes*, s.l.: s.n.
- Hotelling, H., 1931. The economics of exhaustible resources. *Journal of political Economy*, Band 39, p. 137–175.
- Kellner, M. et al., 2023. *Systematische Verteilungsanalyse zur Wärmewende: Welche Haushalte tragen die Kosten und wie kann die Entlastung aussehen?*, s.l.: s.n.
- Köveker, T., Kröger, M. & Schütze, F., 2022. *Wärmemonitor 2020 und 2021: Heizenergiebedarf leicht gesunken, Klimaziele aber verfehlt*, s.l.: s.n.
- Krishnamurthy, C. K. B. & Kriström, B., 2015. How large is the Owner-Renter Divide in Energy Efficient Technology? Evidence from an OECD cross-section. *The Energy Journal*, October, Band 36.
- Loh, W.-Y., 2014. Fifty years of classification and regression trees. *International Statistical Review*, Band 82, p. 329–348.
- Mellwig, P., Pehnt, M., Stede, J. & Schütze, F., 2022. *Klimaschutz im Gebäudebereich: Erklärungen für stagnierende CO<sub>2</sub>-Emissionen trotz erfolgreicher Sanierungsmaßnahmen*, s.l.: s.n.
- Melvin, J., 2018. The split incentives energy efficiency problem: Evidence of underinvestment by landlords. *Energy Policy*, April, Band 115, p. 342–352.
- Pietzcker, R. et al., 2021. *Notwendige CO<sub>2</sub>-Preise zum Erreichen des europäischen Klimaziels 2030*, s.l.: s.n.
- Roofs, C. et al., 2021. Documentation of the CO<sub>2</sub>-price incidence webtool «MCC CO<sub>2</sub>-Preis-Rechner».
- Singhal, P. et al., 2022. Beyond good faith: Why evidence-based policy is necessary to decarbonize buildings cost-effectively in Germany. *Energy Policy*, October, Band 169, p. 113191.
- Singhal, P., Sommer, S., Kaestner, K. & Pahle, M., 2023. *Split-Incentives in Energy Efficiency Investments? Evidence from Rental Housing*, s.l.: s.n.
- Toth, D. & Phipps, P., 2014. *Regression tree models for analyzing survey response*. s.l., s.n., p. 339–351.



## Anhang

### Kohlenstoffdioxidintensität auf Basis des Energieträgers

Tabelle 2 Kohlenstoffdioxidintensitätsfaktoren mit Durchschnittspreis nach Energieträger (Stand 2018)

Energieträger	Anteil in EVS, %	Anteil (2018)*, %	CO <sub>2</sub> -Intensität 2018	Durchschnittspreis 2018
Heizöl	22	23 (25)	0,266 $\frac{kg\ CO_2}{kWh}$ bzw. 2,66 $\frac{kg\ CO_2}{L}$	0,694 $\frac{EUR}{L}$
Gas	54	52 (55)	0,201 $\frac{kg\ CO_2}{kWh}$	0,065 $\frac{EUR}{kWh}$
Fernwärme	18	14 (15)	0,280 $\frac{kg\ CO_2}{kWh}$	0,084 $\frac{EUR}{kWh}$
Strom	6	6 (6)	0,468 $\frac{kg\ CO_2}{kWh}$	0,302 $\frac{EUR}{kWh}$

Hinweise: Die Werte zur CO<sub>2</sub>-Intensität sowie dem Durchschnittspreis pro Energieträger sind gemittelte Werte des Jahres 2018. \*: Daten zu verwendeten Energieträgern stammen aus dem Zusatzprogramm des Mikrozensus 2018. Diese können hier mit der EVS-Stichprobe verglichen werden. Der Anteil in den Klammern gibt dabei einen hypothetischen Anteil an, falls in Deutschland tatsächlich nur die vier hier aufgeführten Energieträger verwendet würden, die wir innerhalb der EVS nutzen (DESTATIS, 2019).

### Verwendete Variablen innerhalb dieser Analyse

Tabelle 3. Verwendete Variablen der EVS 2018 und des Zensus 2011

Variable	Merkmale bzw. Datentyp	ggf. Anpassung für Zensus-Daten <sup>29</sup>
<b>Abhängige Variable</b>		
Heizemissionen in kg CO <sub>2</sub> /a	numerisch	
CO <sub>2</sub> -Kosten in EUR/m <sup>2</sup>	numerisch	
<b>Gebäudespezifische Variablen</b>		
Gebäudeart	- Freistehendes Einfamilienhaus - Doppelhaushälfte/Reihenhaus/Reihenendhaus - Zweifamilienhaus - Mehrfamilienhaus - Sonstige	- Einfamiliengebäude (Einfamilienhaus, Reihenhaus, Reihenendhaus, Doppelhaushälfte <sup>30</sup> ) - Zweifamilienhaus - Mehrfamilienhaus
Baujahr	- vor 1949 - 1949-1990 - 1991-2000 - 2001-2010 - nach 2011	Aggregation feinerer Kategorisierung und Approximation auf Grundlage der Neubauten nach 2011, siehe weiter unten
Wohnsituation	- Mieter - Eigentümer - Mietfrei	- Mieter/mietfrei - Eigentümer
Heizsystem	- Fernwärme - Block-/Zentralheizung - Etagenheizung - Einzel-/Mehrraumöfen	

<sup>29</sup> Das Verknüpfen und Abbilden der Ergebnisse mit den Zensus-Daten wurde ausschließlich hinsichtlich der gebäudespezifischen Variablen vorgenommen.

<sup>30</sup> Dieses Merkmal ist innerhalb der EVS nicht separat aufgeführt (siehe linke Spalte).

Energieträger	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fernwärme</li> <li>- Strom</li> <li>- Gas</li> <li>- Öl</li> </ul>	Verwendung der Anteile auf Ebene der Regierungsbezirke der Daten Mikrozensus 2018 (DESTATIS, 2019).
Wohnfläche in m <sup>2</sup>	numerisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>- unter 40m<sup>2</sup></li> <li>- 40-60m<sup>2</sup></li> <li>- 60-80m<sup>2</sup></li> <li>- 80-100m<sup>2</sup></li> <li>- 100-120m<sup>2</sup></li> <li>- 120-140m<sup>2</sup></li> <li>- 140-160m<sup>2</sup></li> <li>- 160-180m<sup>2</sup></li> <li>- 180-200m<sup>2</sup></li> <li>- mehr als 200m<sup>2</sup></li> </ul>
<b>Regionalisierungsvariablen</b>		
Ost-/Westdeutschland	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ost</li> <li>- West</li> </ul>	
Stadt-/Agglomerationsraum	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Stadt</li> <li>- Verstädterter Raum</li> <li>- Land</li> </ul>	
<b>Sozio-demografische Variablen</b>		
Miete in EUR/m <sup>2</sup>	numerisch	
Haushaltsausgaben in EUR	numerisch	
Erwerbstätig	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ja</li> <li>- Nein</li> </ul>	
Haushaltsgröße	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Single</li> <li>- Paar</li> <li>- Kleinfamilie (3 Personen)</li> <li>- Familie (4 Personen)</li> <li>- Großfamilie (&gt;5 Personen)</li> </ul>	
Lebensaltersabschnitt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- jünger als 30 Jahre</li> <li>- 30-45 Jahre</li> <li>- 45-65 Jahre</li> <li>- älter als 65 Jahre</li> </ul>	

## Verteilung der zentralen abhängigen Variablen

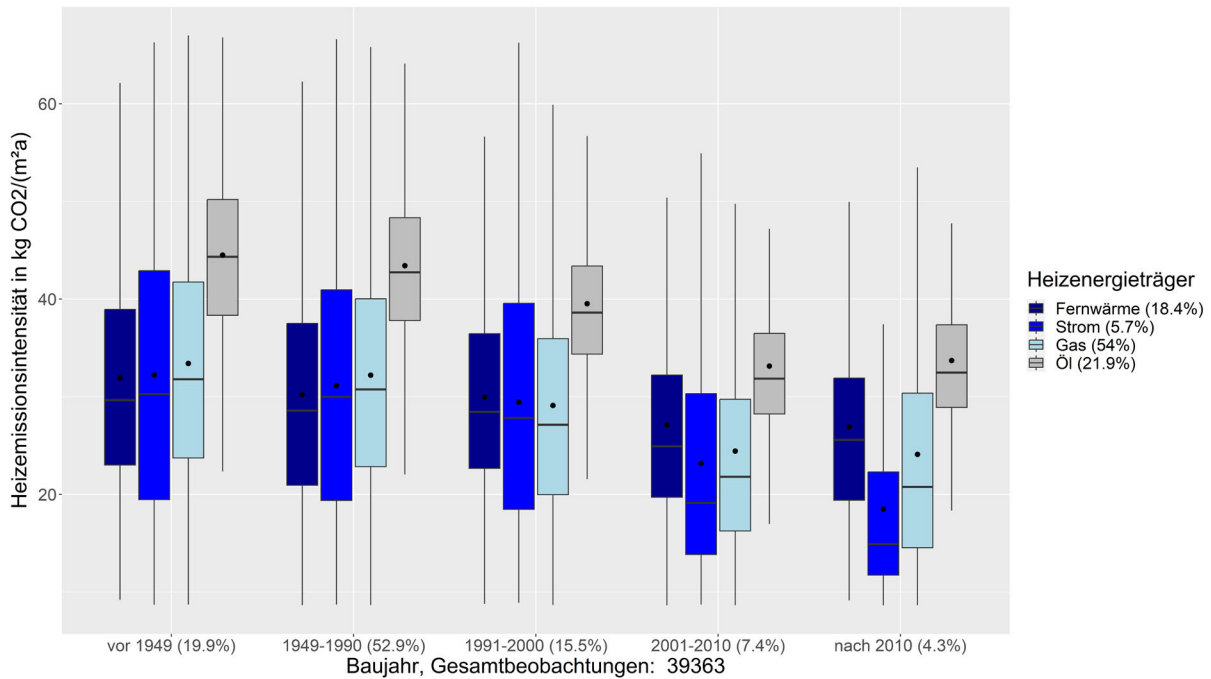


Abbildung 9 Verteilung der Heizemissionsintensität in kg CO<sub>2</sub>/(m<sup>2</sup>a) nach Baujahr und Energieträger

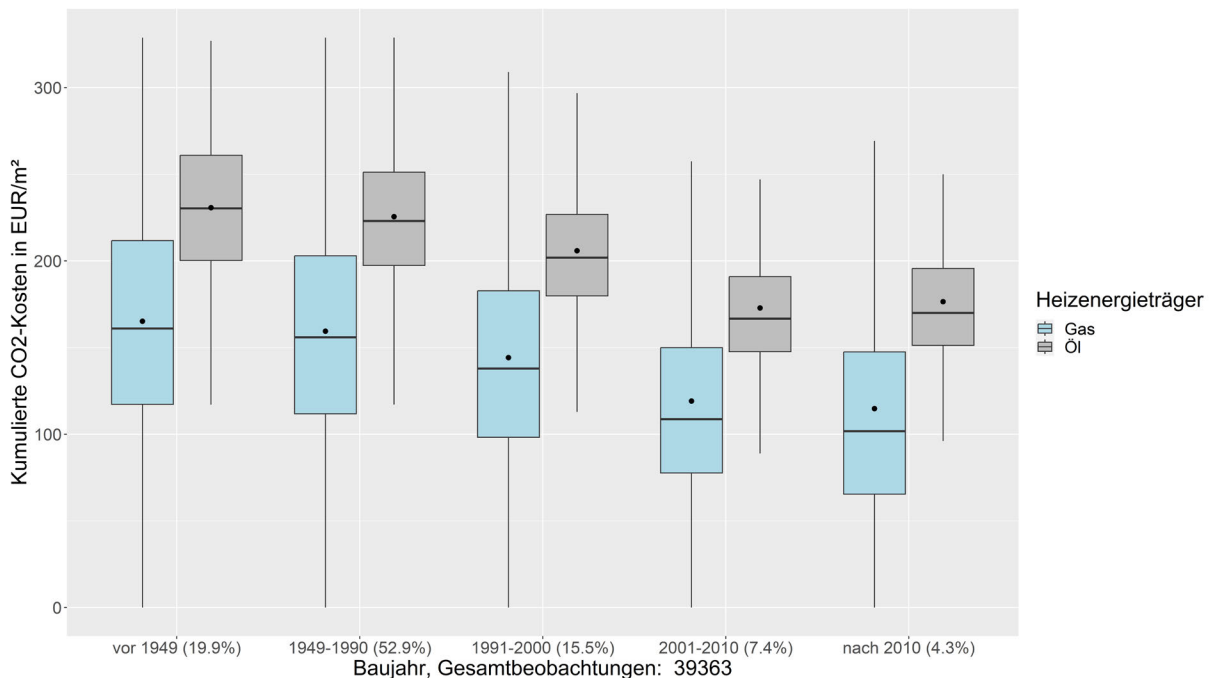


Abbildung 10 Verteilung der kumulierten und diskontierten CO<sub>2</sub>-Kosten in EUR/m<sup>2</sup> nach Baujahr und Energieträger

Hinweise: Boxplots veranschaulichen die Verteilung numerischer Variablen. Dabei gibt die Box den Bereich der Datenpunkte einer Variable an, in den die mittleren 50% der Datenpunkte fallen (25. bis 75. Perzentil). Innerhalb der Box ist der Median- (Strich) sowie der Durchschnittswert (Punkt) abgebildet. Die vertikalen Linien außerhalb der Box stellen die minimalen und maximalen Werte der Variable dar, vernachlässigen dabei jedoch potenzielle Ausreißer.

## Methode zur Fortschreibung der Zensus-Daten aus dem Jahr 2011

Mithilfe der Angabe zu Wohnungsneubauten seit 2011 auf Landkreisebene durch die Datenbank INKAR der BBSR wurde die EVS-Kategorie „nach 2011“ (bis 2020) imputiert. Insgesamt beträgt die Anzahl der Neubauten in diesem Zeitraum ~2,5 Millionen Wohnungen bundesweit. Im selben Zeitraum ist ein Wohnungsabgang von 251.000 Wohnungen zu verzeichnen (siehe [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Wohnen/Publikationen/Downloads-Wohnen/fortschreibung-wohnungsbestand-pdf-5312301.pdf?__blob=publicationFile)), d.h. ein Netto-Neuzugang von ca. ~2,25 Millionen Wohnungen. Daraus wurde der Anteil für ersetzte an den neuentstandenen Wohnungen geschätzt: 9,9%.

Annahme 1: Es wurde angenommen, dass der Anteil neuentstandener Wohnungen, die alte Wohnungen ersetzen, für alle Landkreise und für den gesamten Zeitraum (2011 bis 2020) gleich hoch ist.

Für jeden Landkreis wurde daraufhin der Netto-Wohnungszugang berechnet. Die innerhalb des Zensus 2011 berechnete Anzahl der Gesamtwohnungen auf Landkreisebene wurde um diese Anzahl ergänzt. Anschließend wurde die Anzahl der ältesten beiden Baujahr-Kategorien zu gleichen Teilen um den geschätzten Wohnungsabgang auf Landkreisebene reduziert.

Annahme 2: Der Wohnungsabgang auf Landkreisebene wurde zu gleichen Teilen auf die beiden letzten Baujahr-Kategorien („vor 1949“, „1949-1990“) aufgeteilt. Die Wohnungsanzahl dieser beiden Kategorien wurde dementsprechend reduziert.

Hinsichtlich der geschätzten Anzahl an Wohnungsneubauten nach 2011 ist diese Methode sehr robust, da die Daten der INKAR übertragen wurden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Wohnungsabgang regional unterschiedlich stark ausgeprägt ist. So könnten in Städten vermehrt Wohnungen saniert als zurückgebaut werden. Auch die Annahme über die Verteilung des Wohnungsabgangs auf die übrigen Baujahr-Kategorien kann zunächst nicht geprüft werden.

## Vergleich der Monatsgradtage des Jahres 2016/17

Als Heiztage werden diejenigen Tage bezeichnet, in denen die durchschnittliche Temperatur unter 15°C liegt. Die Gradtage berücksichtigen weitergehend die Temperaturdifferenz zwischen einer 20°C-Raumwärme zur Außentemperatur. Monatsgradtage summieren die jeweiligen Gradtage eines Monats. Um zu veranschaulichen, ob die beiden Jahre 2016/17 deutschlandweit tendenziell wärmer oder kälter waren, mitteln wir die Daten der regionalen Monatsgradtage des DWD und bilden diese zusammen mit den durchschnittlichen Monatsgradtagen der Vergleichsperiode zwischen 2006 bis 2015 ab.

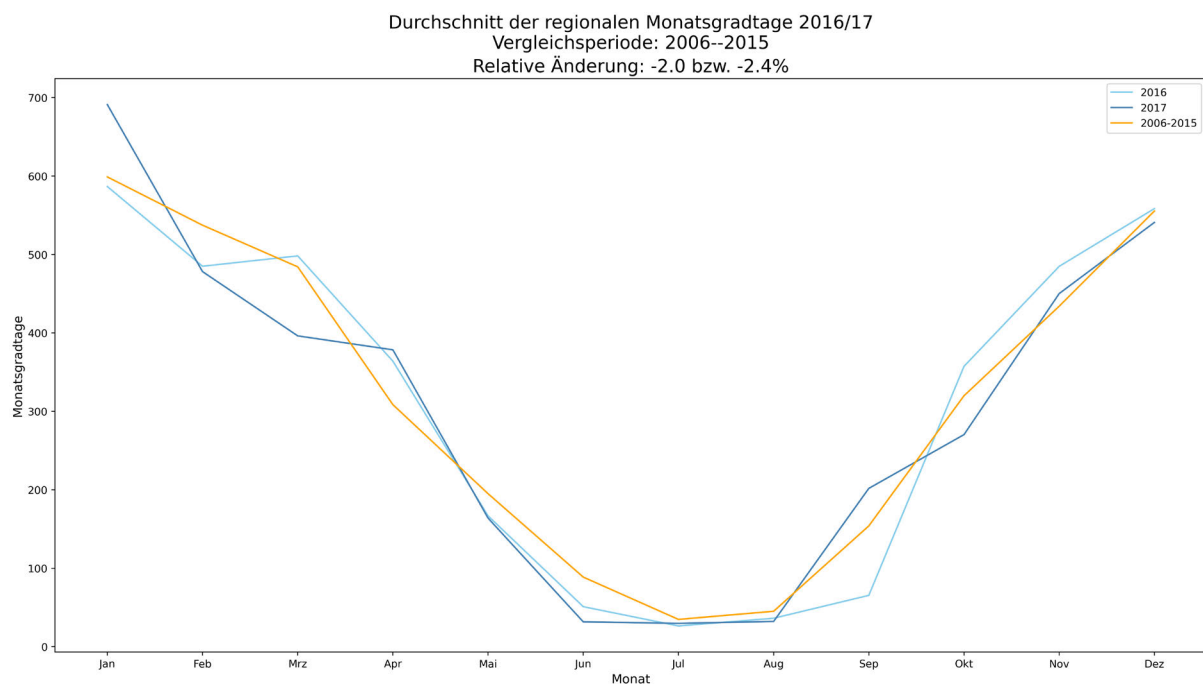


Abbildung 11. Vergleich der durchschnittlichen Monatsgradtage in 2016/17 mit dem Vergleichszeitraum 2006-2015  
Hinweise: Die Darstellung basiert auf den Daten des Deutschen Wetterdienstes (siehe [https://www.dwd.de/DE/leistungen/gtz\\_kostenfrei/gtz\\_kostenfrei.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/gtz_kostenfrei/gtz_kostenfrei.html)). Da Haushalte ihre Heizkosten meist als monatliche Abschläge bezahlen, die auf dem Verbrauch des Vor- bzw. in Grenzfällen auch des Vorjahres beruhen, betrachten wir die Jahre 2016 und 2017. Bei der Erhebung der EVS Daten wurden Haushalte über Ausgaben im Jahr 2018 befragt.

## Heterogenität der Pro-Kopf-Wohnfläche auf Landkreisebene

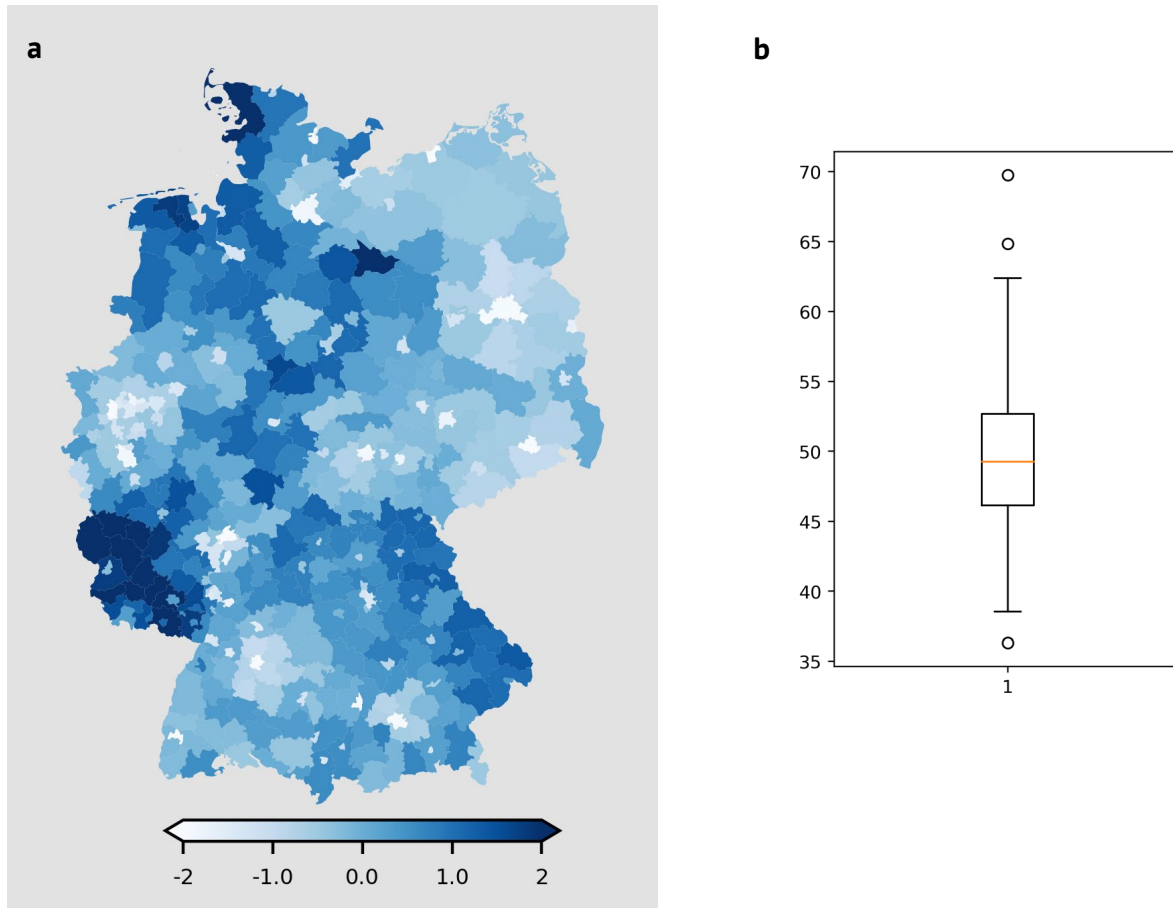


Abbildung 12 Abweichung der Pro-Kopf-Wohnfläche eines Landkreises vom bundesdeutschen Durchschnitt im Jahr 2020 (in Standardabweichungen, a) sowie die Verteilung der gemittelten pro-Kopf-Wohnfläche (in m<sup>2</sup>, b)

## Vergleich der vorherrschenden Energieträger auf Ebene der Regierungsbezirke

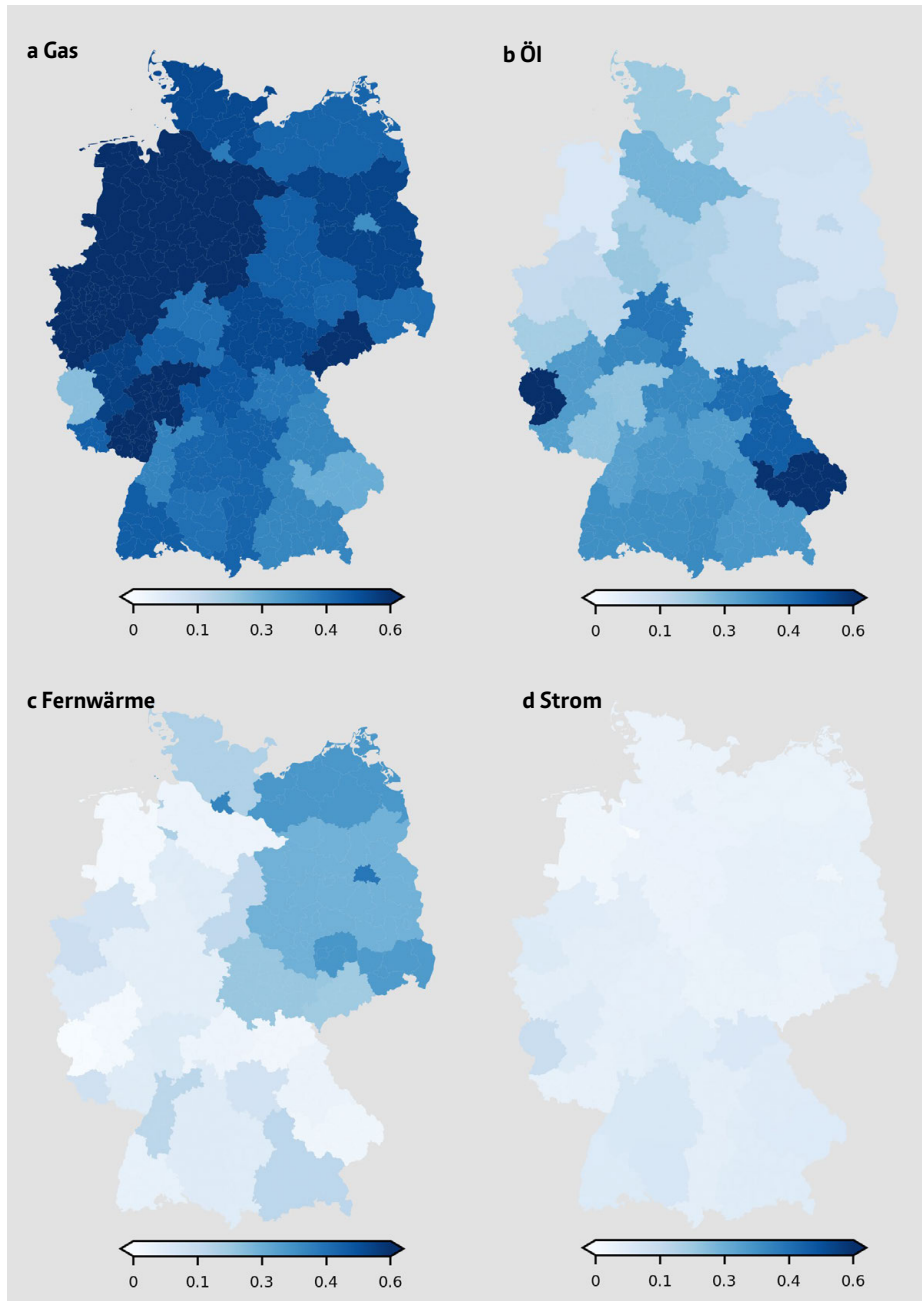


Abbildung 13 Vergleich der für Raumwärme verwendeten Energieträger nach Bezirksregion

Hinweise: Entgegen der geschätzten Daten auf Landkreisebene liegen die Daten zu Energieträgern nur auf Ebene der Regierungsbezirke vor. Die Daten stammen aus dem Zusatzprogramm „Wohnen in Deutschland“ des Mikrozensus 2018 (DESTATIS, 2019).

## Verteilungsfunktion der geschätzten kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten

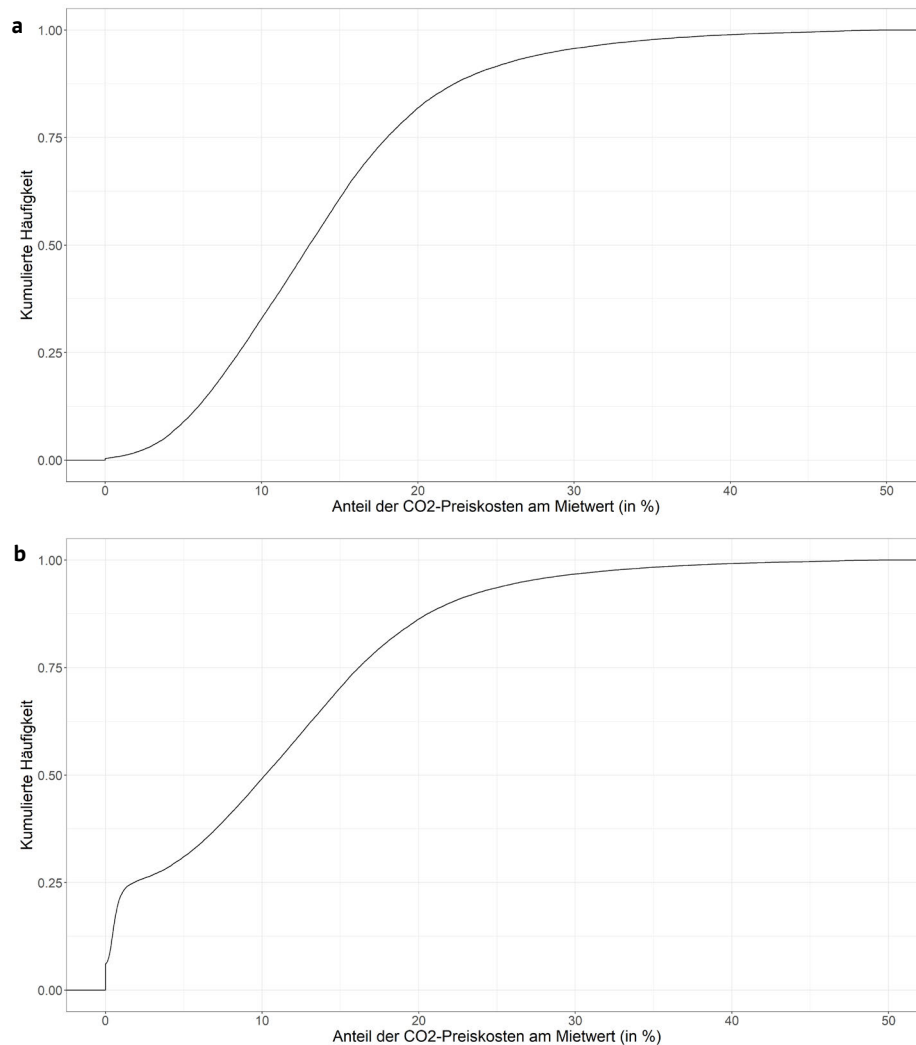


Abbildung 14 Verteilungsfunktion der kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten  
 Hinweise: Die Verteilungsfunktion kumuliert die einzelnen CO<sub>2</sub>-Kostenanteile und gibt daher Aufschluss, wie hoch der Anteil der Gebäude ist, bei denen die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten einen bestimmten Anteil X des Mietwerts (diskontierte Nettokaltmieten) ausmachen. Panel a berücksichtigt nur Gebäude, die mit Gas oder Öl beheizt werden (äquivalent zu Abbildung 7) während Panel b auch solche einbezieht, die mit Strom oder Fernwärme heizen.



## Kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten für unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Preisfade

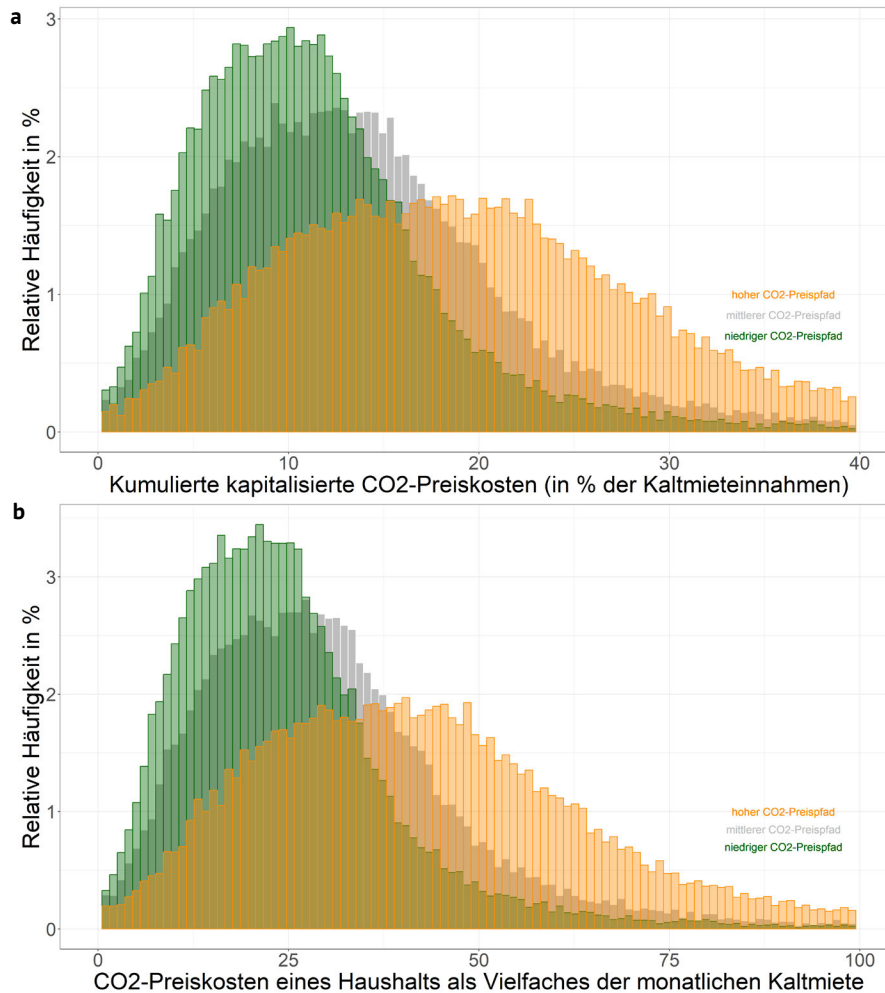


Abbildung 15 Kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten als Anteil der Kaltmiete bzw. als Vielfaches der monatlichen Kaltmiete

Hinweise: Das Histogramm in Panel a setzt die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten eines Haushalts mit den (implizit) gezahlten Nettokaltmietzahlungen ins Verhältnis. Beide Werte berücksichtigen den Zeitraum von 2023-2045 und werden mit einer Diskontrate von 3% diskontiert. Es werden zudem nur Haushalte berücksichtigt, die mit Öl oder Gas heizen. Im Vergleich zu Abbildung 7 werden zwei weitere CO<sub>2</sub>-Preisfade der EU-REMIND-Modellierung (Pietzcker, et al., 2021) berücksichtigt, die unterschiedliche Annahmen über den Markthochlauf im ETS2 unterstellen: Die grau-gefärbte Verteilung gibt das mittlere Szenario wider und entspricht derjenigen in Abbildung 7, während in grün (orange) das niedrige (hohe) Preisszenario dargestellt ist.

## Kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten aus der Langfrist-Perspektive

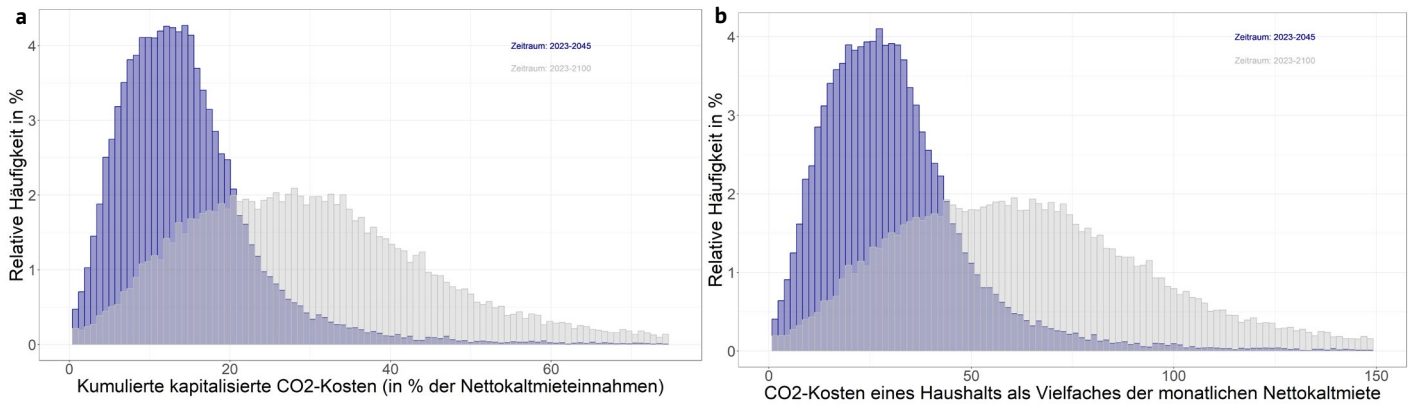


Abbildung 16 Verteilung und Höhe der kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten aus der Langfrist-Perspektive bis 2100

Hinweise: Panel a setzt die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten eines Haushalts zu den kapitalisierten Nettokaltmietzahlungen ins Verhältnis. Panel b gibt an, welche Anzahl von Kaltmieten einen Break-even auf den Wert der CO<sub>2</sub>-Kosten erlaubt. Es wurden in beiden Diagrammen ausschließlich die Haushalte berücksichtigt, die mit Gas oder Öl heizen. Das blaue Histogramm nutzt dabei den in dieser Analyse betrachteten Zeithorizont (2023-2045), während das hellgraue Histogramm den Zeithorizont als Alternative mit konstanten CO<sub>2</sub>-Preisen ab 2045 bis 2100 erweitert.

## Vergleich des Werts eines Quadratmeter Wohnfläche pro Landkreis

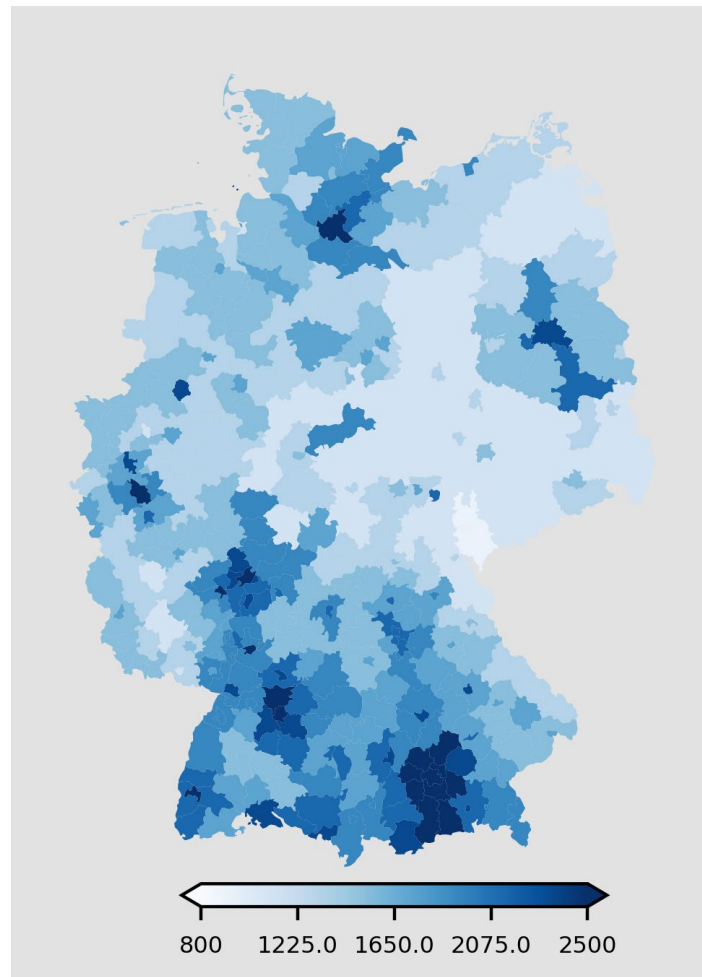


Abbildung 17 Wert eines Quadratmeter Wohnfläche nach Landkreis

Hinweise: Die Skala gibt den diskontierten Wert eines Quadratmeter Wohnfläche pro Landkreis für den Zeitraum von 2023-2045 auf Basis von Nettokaltmietpreisen an (3%-Diskontrate). Die Daten stammen von [www.inkar.de](http://www.inkar.de).

## Korrelation von Kaltmiete und kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten

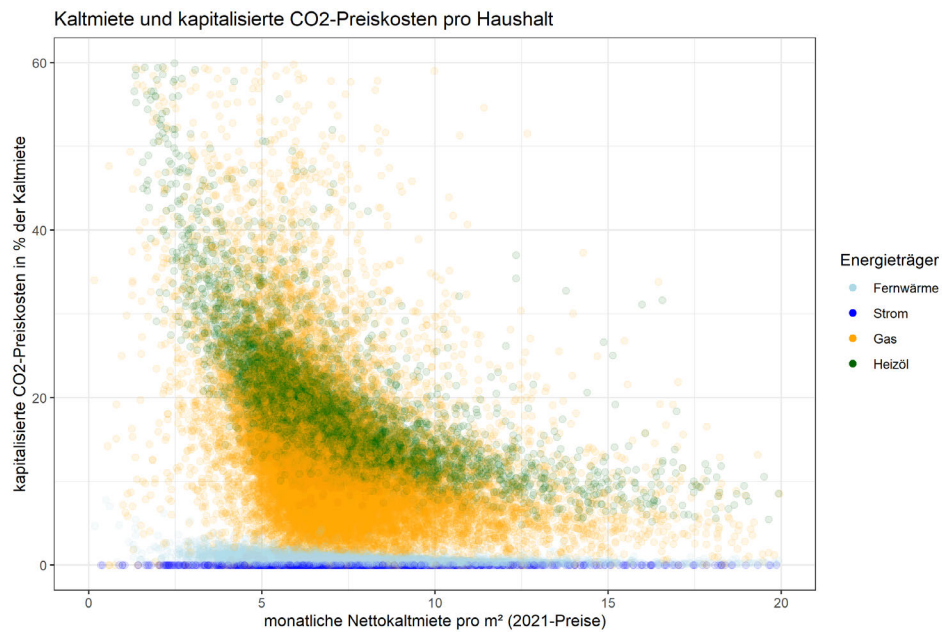


Abbildung 18 Zusammenhang von Nettokaltmiete und kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten auf Haushaltsebene

Hinweise: Auf der x-Achse ist die monatliche Nettokaltmiete (abzgl. Energie- und Betriebskosten) eines Haushalts abgetragen. Für Eigentümer-bewohnte Haushalte wurde diese Variable durch DESTATIS geschätzt. Die y-Achse setzt die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten des Haushalts ins Verhältnis zur gezahlten Kaltmiete in der gleichen Periode. (2023-2045, 3%-Diskontrate). Zusätzlich differenziert die Grafik verschiedene Energieträger durch farbliche Unterscheidung.

## Korrelation von Bevölkerungsdichte und kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten

Bevölkerungsdichte und kapitalisierte CO<sub>2</sub>-Kosten pro Landkreis

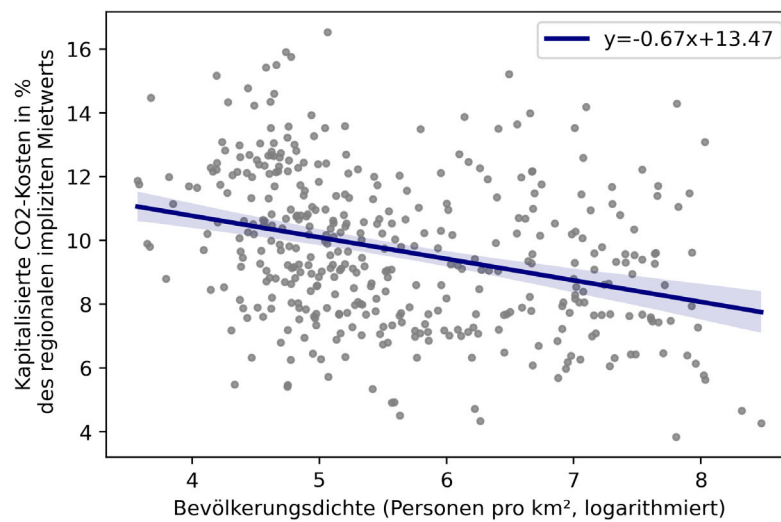


Abbildung 19 Zusammenhang von Bevölkerungsdichte und kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten auf Landkreisebene

Hinweise: Auf der x-Achse ist die Bevölkerungsdichte pro Landkreis abgetragen (Personen pro km<sup>2</sup>, logarithmiert), während die y-Achse die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten in % des Mietwerts eines Landkreises abbildet. Die Regressionsgerade wurde mit einer „level-log-OLS“-Regression durchgeführt. Der Parameter  $\beta = -0.67$  ist dabei wie folgt zu interpretieren: Ein Anstieg der Bevölkerungsdichte um 1% reduziert die kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten um 0,0067 Prozentpunkte. Die gefärbte Fläche gibt das 95%-Konfidenzintervall ein, welches auf Basis der Datenpunkte mit „bootstrapping“ generiert wurde.



## CO<sub>2</sub>-Kosten-Abweichungen nach Kategorien

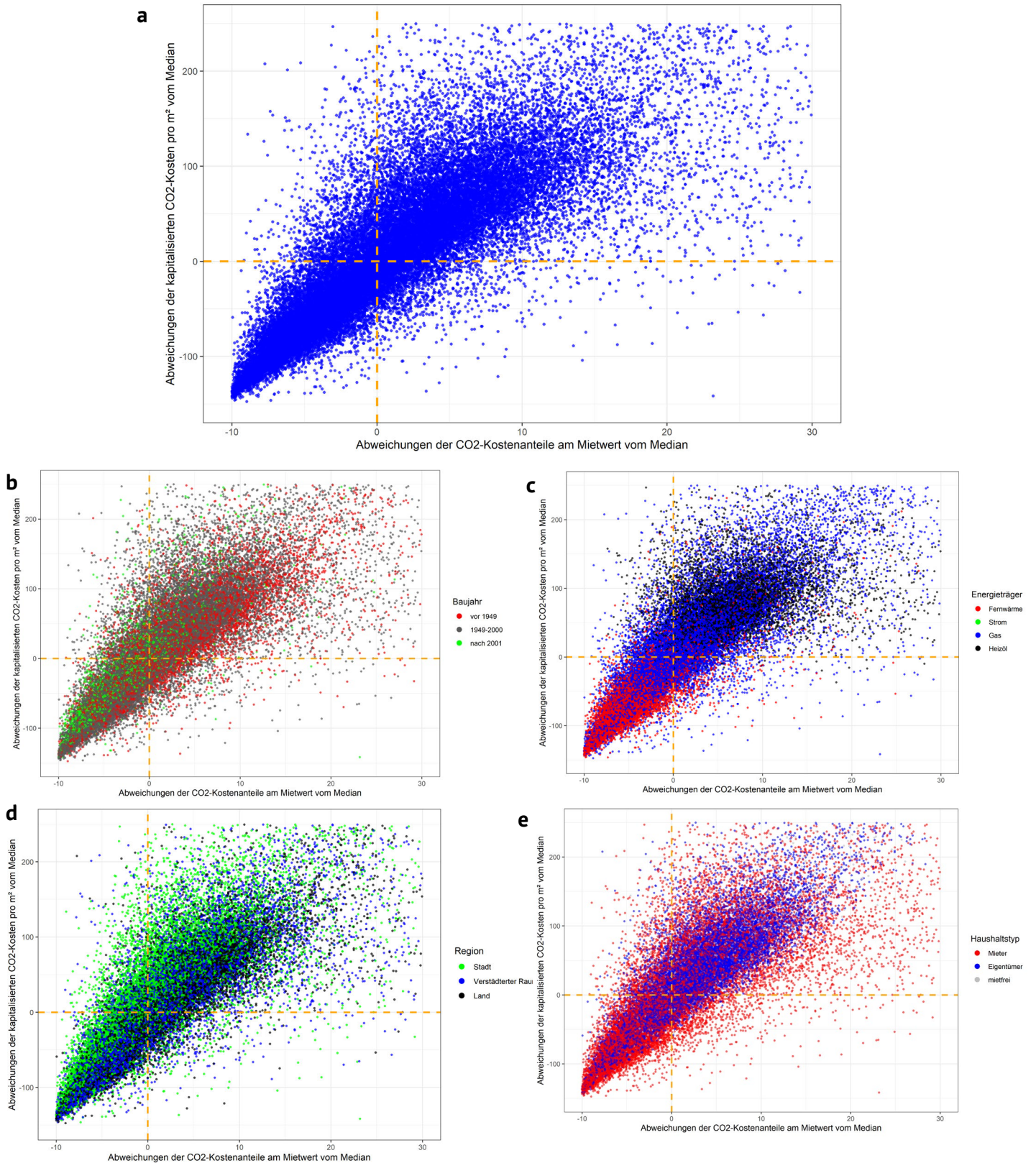


Abbildung 20 Gegenüberstellung und Kategorisierung von kapitalisierten CO<sub>2</sub>-Kosten pro m<sup>2</sup> und als Anteil vom Mietwert

## Berechnung der diskontierten CO<sub>2</sub>-Kosten

$$\text{CO}_2\text{-Kosten} = \sum_{i=0}^T \text{Diskontfaktor}^i \cdot \text{CO}_2\text{-Preis}_{2023+i} \cdot \text{Jahresemissionen}$$

$$\text{CO}_2\text{-Kosten} = E \cdot \sum_{i=0}^T d^i \cdot p_i^{\text{CO}_2}$$

mit:

- $T = 22$ : Zeitraum zwischen 2023 und 2045 (Jahr 2023 wird nicht diskontiert)
- $E$ : Heizbedingte Emissionen in Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr (konstant, Nicht-Sanieren-Szenario)
- $d$ : Diskontfaktor,  $d = \frac{1}{1+r}$ , mit der Diskontrate  $r = 0.03$
- $p_i^{\text{CO}_2}$ : Vermeidungskosten in EUR pro Tonne CO<sub>2</sub> („gesellschaftliche Kosten einer Tonne CO<sub>2</sub>-Emissionen“)

## Quellennachweis Abbildung 1

Die in Abbildung 1 verwendeten Icons stammen von der Internetseite [www.thenounproject.com](http://www.thenounproject.com) und sind bei Angabe des Künstlers frei herunterladbar.

Einfamilienhaus, Mehrfamilienhaus	Firza Alamsyah
Mehrfamilienhaus	Flowicon
Baujahr	Alice Design
Energieträger	bsd studio (Gas), Juicy Fish (Strom), Ayub Irawan (Öl), Angelo Troiano (Fernwärme)
Wohnfläche	Adrien Coquet
Wetter	Omah Icon
Verhalten	Maan Icons
Heizausgaben	Atacan
CO <sub>2</sub> -Emissionen	Jino