

Studie zur Bewertung externalisierter Kosten beim CO₂-Ausstoß

August 2025

Autorinnen und Autoren

Jana Hack, Clemens Rohde (Fraunhofer ISI)

Stephan Kritzinger (ZIV)

Angelika Paar (ifeu)

Heidelberg, 04. September 2025

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	2
Tabellenverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	4
Glossar	5
1 Veranlassung und Ziele der Untersuchung	6
2 Grundlagen bestehender Internalisierungsmethoden	8
2.1 Arten externalisierter Kosten infolge des Klimawandels	8
2.2 Instrumente zur Internalisierung von Umweltkosten	11
2.3 Lücken der Internalisierung und Möglichkeiten für das Land Hessen	21
3 Anwendungsfälle in der Praxis	23
3.1 Ziele und Vorgehen	23
3.2 Ergebnisse der Interviews	24
4 Praxisberechnungen in Hessen	31
4.1 Vorgehen	31
4.2 Praxis-Berechnung Fall 1: Lückenschluss im Frankfurter U-Bahn-Netz	31
4.3 Praxis-Berechnung Fall 2: Infrastruktur (Brücke)	33
4.4 Praxis-Berechnung Fall 3: Gebäude	33
4.5 Praxis-Berechnung Fall 4: Beschaffung (IT)	36
4.6 Praxis-Berechnung Fall 5: Beschaffung (Fahrzeuge)	38
5 Zusammenfassung, Fazit und Empfehlung für Hessen	42
5.1 Fazit aus den Analysen	42
5.2 Empfehlung zur weiteren Ausgestaltung einer Internalisierung in Hessen	44
6 Annex Interviewleitfaden	46
Literaturverzeichnis	48

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1: UNTERSCHIEDUNG VON MAßNAHMEN ZUM KLIMASCHUTZ (VERMEIDUNG VON UMWELTSCHÄDEN) UND KLIMAAANPASSUNGSMAßNAHMEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH LUBW LANDESANSTALT FÜR UMWELT BADEN-WÜRTTEMBERG 2024)	10
ABBILDUNG 2: ZUSAMMENSPIEL VON SCHADENSKOSTEN UND VERMEIDUNGSKOSTEN (EIGENE DARSTELLUNG NACH FRIEDRICH 2001).....	11
ABBILDUNG 3: CO ₂ -EMISSIONSHANDEL MIT CAP-AND-TRADE MECHANISMUS (EIGENE DARSTELLUNG NACH VARSANI UND GUPTA 2025).....	15
ABBILDUNG 4: CBAM AM BEISPIEL DER EUROPÄISCHEN UNION (EU) (EIGENE DARSTELLUNG NACH THE CONFERENCE BOARD 2022)	16
ABBILDUNG 5: BERECHNUNG EINES WERTUNGSPREISES ANHAND EINES SCHATTENPREISES (EIGENE DARSTELLUNG NACH PÜSTOW ET AL. 2023).....	19
ABBILDUNG 6: MIT DER CO ₂ -STEUER SOLLN EMISSIONSARME AKTIVITÄTEN WENIGER STARK FINANZIELL BELASTET WERDEN ALS EMISSIONSINTENSIVE AKTIVITÄTEN (EIGENE DARSTELLUNG)	21
ABBILDUNG 7: GELTUNGSBEREICHE BEI DER INTERNALISIERUNG EXTERNER KOSTEN BEI DEN AUSGEWÄHLTEN INTERVIEWPARTNERINNEN UND -PARTNERN (QUELLE: INTERVIEWS).....	25
ABBILDUNG 8: VARIANTENÜBERSICHT IN DER TIEFERGEHENDEN UNTERSUCHUNG DER MACHBARKEITSSTUDIE (QUELLE: SCHÜßLER-PLAN).....	32
ABBILDUNG 9: EMISSIONEN IN DER UNTERNEHMENS-IT (NACH BECKER ET AL. 2022)	36

Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: ÜBERSICHT DER NATIONALEN INTERNALISIERUNGSMETHODEN UND ANWENDUNGSLÜCKEN IN VERSCHIEDENEN SEKTOREN	21
TABELLE 2: ANWENDUNGSBEISPIELE AUS DEN INTERVIEWS	25
TABELLE 3: BEPREISUNGSSTRATEGIEN DER STADT STUTTGART, DES ERZBISTUMS FREIBURG UND VON RHEINLAND-PFALZ	27
TABELLE 4: VERSTÄRKER UND HEMMNISSE BEI DER EINFÜHRUNG EINER INTERNALISIERUNGSMETHODE (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	28
TABELLE 5: HEMMNISSE UND TREIBER DER UMSETZUNG EINER INTERNALISIERUNGSMETHODE (QUELLE: EIGENE DARSTELLUNG)	29
TABELLE 6: VERGLEICH DER CO ₂ -EMISSIONEN UND SCHADENSKOSTEN DER DREI VARIANTEN.....	33
TABELLE 7: VARIANTENVERGLEICH RADBRÜCKE MIT 80 M LÄNGE	33
TABELLE 8: KOSTENVERGLEICH ÜBER 20 JAHRE, VARIANTE 1 OHNE ENERGETISCHE SANIERUNG, VARIANTE 2 MIT SANIERUNG UND VARIANTE 3 MIT ERSATZNEUBAU (EIGENE BERECHNUNG/DARSTELLUNG IFEU 2025).....	35
TABELLE 9: KOSTENVERGLEICH DER BEIDEN MONITORE (SCOPE 2 UND 3) (EIGENE BERECHNUNGEN).....	37
TABELLE 10: KOSTENVERGLEICH DER BEIDEN NOTEBOOKS (SCOPE 2 UND 3) (EIGENE BERECHNUNGEN)	38
TABELLE 11: GRUNDDATEN FÜR DEN KOSTENVERGLEICH DER DREI FAHRZEUGALTERNATIVEN (QUELLE: HERSTELLERANGABEN)	39
TABELLE 12: KOSTENVERGLEICH DER DREI FAHRZEUGALTERNATIVEN (EIGENE BERECHNUNGEN).....	40

Abkürzungsverzeichnis

BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CHF	Schweizer Franken
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ e	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
DEHSt	Deutsche Emissionshandelsstelle
EU	Europäische Union
ETS	Emissions Trading System (Emissionshandelssystem)
GHD	Gewerbe, Handel und Dienstleistungen
HKlimaG	Hessisches Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (Hessisches Klimagesetz)
HMLU	Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
KSG	Klimaschutzgesetz
LHO	Landeshaushaltsordnung
LULUCF	Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft
nEHS	nationales Emissionshandelssystem
NOK	Norwegische Krone
THG	Treibhausgase
UBA	Umweltbundesamt
WPG	Wärmeplanungsgesetz

Glossar

Anpassungskosten	Anpassungskosten beziehen sich auf die finanziellen Aufwendungen, die erforderlich sind, um die negativen Auswirkungen von Umweltschäden zu mildern.
CO ₂ -Preis	Der finanzielle Wert, welcher entweder real oder virtuell für die Anwendung eines preisbasierten Instruments zur Internalisierung von Umweltkosten einer bestimmten Emissionsmenge zugewiesen wird, wird „CO ₂ -Preis“ genannt.
CO ₂ -Steuer	Die CO ₂ -Steuer ist eine hoheitlich erhobene Abgabe, die darauf abzielt, den Ausstoß von CO ₂ -Emissionen zu reduzieren und den Klimawandel zu bekämpfen. Im Allgemeinen dienen Steuern der Deckung des allgemeinen Finanzbedarfs. Mit Bezug auf CO ₂ -Steuern werden oftmals CO ₂ -Abgaben oder allgemein CO ₂ -Preise verstanden, deren Einnahmen zweckgebunden (z. B. für Klimaschutzprojekte) genutzt werden können.
CO ₂ -Vermeidungskosten	Kosten zur Vermeidung von CO ₂ -Emissionen, z. B. Kosten für Gebäudedämmung oder für die Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien.
Diskontrate	Abzinsungsfaktor zur Bewertung zukünftiger Kosten im Vergleich zu heutigen Werten.
Externe Kosten	Treibhausgasemissionen verursachen ökologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Schäden, die in vielen Fällen nicht in die Marktpreise einfließen. Diese externen Kosten werden nicht durch die Verursachenden getragen, sondern auf die Allgemeinheit oder auf zukünftige Generationen in Form von externen Umwelteffekten abgewälzt.
Internalisierung	Einbeziehung externer Kosten in ökonomische Entscheidungen.
Klimafolgeschadenskosten	Schadenskosten, die durch CO ₂ -Emissionen verursacht werden.
Schadenskosten	Schadenskosten sind monetär bewertete Schäden an Menschen und Umwelt, die durch menschliche Umwelteinflüsse entstehen oder erwartet werden.
Schattenpreis	Hypothetischer CO ₂ -Preis, der in Entscheidungsprozessen, z. B. bei Variantenanalysen bei der Vergabe von Aufträgen, für den CO ₂ -Ausstoß der Varianten veranschlagt wird.
Scopes	Für eine standardisierte Erfassung aller direkten und indirekten Emissionen, findet nach dem Greenhouse Gas Protocol, eine Zuordnung in drei sogenannten Scopes statt. Scope 1 Emissionen sind direkte Emissionen, in der Regel aus der Verbrennung fossiler Energieträger, Prozessemissionen und Verflüchtigungen. Scope 2 Emissionen sind „energiebezogene indirekte Emissionen“, aus der netzgebundenen Bereitstellung von Strom und Wärme. Scope 3 Emissionen sind die weiteren indirekten Emissionen entlang der Wertschöpfungskette. Diese umfassen sowohl Emissionen mit direktem Produktionsbezug als auch übergeordnete Emissionen wie beispielsweise aus dem Pendeln der Mitarbeitenden.

1 Veranlassung und Ziele der Untersuchung

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Treibhausgasemissionen verursachen nicht nur ökologische, sondern auch erhebliche wirtschaftliche und gesellschaftliche Schäden, die in vielen Fällen nicht in die Marktpreise einfließen. Diese Kosten entstehen durch Produktion und Konsum, werden jedoch nicht von den Verursachenden getragen, sondern belasten die Allgemeinheit oder zukünftige Generationen in Form von verursachten Umwelteffekten. Diese Umwelteffekte – etwa Luftverschmutzung, Verlust biologischer Vielfalt oder Klimafolgen wie Extremwetterereignisse – treten teils unmittelbar auf, teils erst zeitlich verzögert. Werden sie bei Investitionen dauerhaft ignoriert, kann dies zu erheblichen Folgewirkungen führen – darunter steigende Gesundheitskosten, sinkende landwirtschaftliche Erträge, höhere Versicherungsprämien oder Infrastrukturverluste (Bundesumweltministerium 2010).

Werden die Verursacher solcher Schäden nicht zur Verantwortung gezogen, gelten die Kosten als externalisiert (Vatn und Bromley 1997). Die Höhe dieser externalisierten Kosten zeigt an, welcher Anteil der tatsächlichen Gesamtkosten von der Gesellschaft getragen wird (Müller 2024). Deshalb ist es wichtig, auch langfristige und schwer quantifizierbare Umweltfolgen in die Kostenrechnung einzubeziehen (Bürger und Matthey 2018) und Schadstoffemissionen durch (staatliche oder betriebswirtschaftliche) Instrumente zu bepreisen. Externe Kosten werden so internalisiert. Eine Folge ist, dass Anreize zur Vermeidung der Emissionen geschaffen werden (Bundesumweltministerium 2010). Neben Verbraucherinnen und Verbrauchern richten sich diese Internalisierungsinstrumente häufig an Unternehmen. Laut einer McKinsey Studie von 2021 nutzten im Jahr 2019 bereits 23 % der globalen Unternehmen einen internen Preis für Treibhausgasemissionen (THG), während 22 % die Einführung in den nächsten zwei Jahren planten (Fan et al. 2021).

Ziel der vorliegenden Studie ist es, für das Land Hessen Methoden zur Internalisierung externer Kosten darzustellen und deren Anwendungspotenzial in der Praxis zu bewerten. In § 7 des Hessischen Gesetz zur Förderung des Klimaschutzes und zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels (HKlimaG) ist festgehalten, dass bei der Planung, Auswahl und Durchführung von Investitionen und bei der Beschaffung durch das Land Hessen für die Vermeidung oder Verursachung von THG-Emissionen ein CO₂-Preis zugrunde zu legen ist. Im Kabinettsentwurf des ersten Bürokratieabbaugesetzes ist allerdings eine Streichung des entsprechenden Absatzes vorgesehen. Anhand von Interviews mit Expertinnen und Experten, die bereits in ihrem Aufgabenbereich Internalisierungen umgesetzt haben, sowie praxisnahen Berechnungen im Kontext hessischer Infrastruktur- und Beschaffungsvorhaben wird aufgezeigt, wie eine nachhaltigere Verteilung umweltbedingter Kosten gelingen kann.

Die Internalisierung externer Kosten wird nach der Höhe der Kostensätze und gewählten Instrumente unterschieden. Schätzungen zu externen Kosten weisen aufgrund unterschiedlicher Betrachtungsgrenzen oder Annahmen teilweise eine beträchtliche Streuung auf. Im Kapitel 2.1 werden verschiedenen Ansätze zur Bewertung dieser externen Kosten beschrieben.

Im darauffolgenden Kapitel 2.2 werden verschiedene Instrumente dargestellt, die eine Internalisierung von externen Kosten ermöglichen. In den Instrumenten werden auch weitere Differenzierungen sichtbar, beispielsweise zum Zeitpunkt der Internalisierung und den damit verbundenen Lenkungswirkungen oder den angesetzten Bilanzgrenzen der internalisierenden Institution. In der Studie stehen externe Kosten, die durch den Klimawandel infolge der Treibhausgasemissionen entstehen, im Fokus.

Hinweis: In der Studie wird CO₂ oder THG als Synonym für Treibhausgasemissionen genutzt. Wenn CO₂-Äquivalente (CO_{2e}) genannt werden, dann handelt es sich dabei explizit um mehrere Treibhausgase, die mittels Äquivalente auf CO₂ vereinheitlicht werden.

2 Grundlagen bestehender Internalisierungsmethoden

2.1 Arten externalisierter Kosten infolge des Klimawandels

Zum Vergleich von Methoden zur Internalisierung von externen Kosten ist zunächst ein Verständnis der verschiedenen Kostenarten von Bedeutung. In der wissenschaftlichen Literatur werden in der Regel zwei Arten externalisierter Kosten, die durch den Klimawandel verursacht werden, unterschieden:

- Klimafolgeschadenskosten, zu denen beispielsweise auch Anpassungskosten an die Folgen des Klimawandels gehören, und
- THG-Vermeidungskosten

Beide werden im Folgenden näher beschrieben.

2.1.1 Klimafolgeschadenskosten

Klimafolgeschadenskosten (im Folgenden auch allgemein Schadenskosten genannt) sind monetär bewertete Schäden an Menschen und Umwelt, die durch den Klimawandel entstehen oder erwartet werden. Dabei wird beispielsweise der Einfluss auf die menschliche Lebensqualität unter Berücksichtigung potenzieller oder tatsächlicher Umweltgefahren betrachtet (Lee und Choi 2018). Die Methodenkonvention des Umweltbundesamts (UBA) zeigt einheitliche und transparente Maßstäbe für die Bewertung umweltrelevanter Kosten auf (Bünger und Matthey 2018).

In dieser Methodenkonvention fasst das UBA folgende Kostenkategorien unter Umweltschadenskosten (ebenda):

- Kosten nicht vermiedener Umwelt- und Gesundheitsschäden: Diese unterteilen sich wiederum in Kosten möglicher Maßnahmen zur Verringerung oder Behebung tatsächlich verursachter Schäden (die noch nicht durchgeführt werden) und Kosten aus verbleibenden Nutzenverlusten, die nicht reduziert oder eingedämmt werden (können).
- Kosten der Schadensverringerung: Dies umfasst Kosten tatsächlicher oder geplanter Beseitigungsmaßnahmen sowie Anpassungs- und Ausweichkosten. Diese Kosten lassen sich in direkte Kosten (Kosten zur unmittelbaren Beseitigung oder Begrenzung von Schäden) und indirekte Kosten (Kosten die aufgrund einer Verhaltensänderung oder Anpass-

sung auf die Beeinträchtigung entstehen) sowie in Vorsorgekosten (Kosten, die im Vorfeld getätigt werden, um die Schadenswahrscheinlichkeit zu verringern) unterteilen (Müller 2024; Bünger und Matthey 2018).

Die Schätzung von Schadenskosten basiert auf Modellierungen und auf einer Wirkkette aus THG-Emissionen, THG-Konzentration in der Atmosphäre, Erderwärmung, Veränderung des Klimas und den daraus resultierenden direkten und indirekten Folgen für Menschen und Umwelt. Folgen für Menschen und Umwelt treten heute und in Zukunft auf. Daher werden in die Kostenschätzungen auch Diskontierungen einbezogen. Diskontraten sind entscheidend für die Bewertung zukünftiger Schäden, indem sie zukünftige Schäden mit Bezug zur Gegenwart abwerten. Bei Umweltschäden, die in ferner Zukunft eintreten, beeinflussen schon geringe Diskontraten das Ergebnis enorm. So wird ein Schaden, der in 30 Jahren auftritt, bei einer Diskontrate von 1 % mit 74 % seines heutigen Wertes berücksichtigt, bei einer Diskontrate von 3 % mit 41 %. Tritt der Schaden erst in 60 Jahren ein, was z.B. für Klimaschäden ein üblicher Zeitrahmen ist, reduziert sich die Gewichtung (bei 1 % Diskontrate) sogar auf 55 % (Bünger und Matthey 2018).

Die Methodenkonvention des UBA berücksichtigt bei der Berechnung von Klimaschadenskosten die zeitliche Dimension künftiger Schäden durch die Anwendung unterschiedlicher Diskontraten. Dabei werden zwei Varianten unterschieden:

- Eine Diskontrate von 1 % ergibt zum Stand 2024 einen Kostensatz von rund 300 €/t CO₂. Dieser Wert spiegelt wider, dass es auch künftig Wirtschafts- oder Effizienzwachstum gibt und dass spätere Generationen eine größere materielle Ausstattung haben.
- Daneben weist die Methodenkonvention einen nicht diskontierten Wert von rund 880 €/t CO₂ zum Stand 2024 aus – dieser spiegelt eine vollständige Gleichbewertung heutiger und zukünftiger Schäden wider (Diskontrate = 0 %) (Matthey und Bünger 2024).

Die Wahl der Diskontrate ist eine normative Entscheidung, die indirekt auch eine Zeitpräferenzannahme enthält: Eine höhere Diskontrate verringert die Bedeutung zukünftiger Schäden im heutigen Entscheidungsprozess, während eine niedrige oder null Diskontrate der Verantwortung gegenüber künftigen Generationen besonders Rechnung trägt.

Ergebnisse der Studie „Kosten durch Klimawandelfolgen“ (Trenczek et al. 2022)

In einer durch Prognos, GWS und IÖW durchgeführten Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (2022) wurden klimawandelbezogene Schäden in Deutschland detailliert analysiert und quantifiziert. Darin wurde eine Schadensübersicht aller relevanten Extremwetterereignisse in Deutschland im Zeitraum 2000 bis 2021 erstellt. Insgesamt wurden für den genannten Zeitraum 145 Mrd. € Schadenskosten durch direkte und indirekte Schäden erfasst. 71 Mrd. € sind auf Sturzfluten, Überschwemmungen und Starkregen zurückzuführen, 32 Mrd. € auf Sturm, Hagel und Schnee und 42 Mrd. € auf Hitze. Das tatsächliche Schadensausmaß liegt jedoch über diesem Wert. So umfasst die Summe laut der Autorinnen und Autoren nur monetäre Schäden. Darüber hinaus lassen sich für einzelne Ereignisse keine indirekten Effekte ermitteln. Und im Bereich der hitzebedingten Schäden sind Schäden bisher unzureichend untersucht und quantifiziert.

Für einen Großteil der extremwetterbedingten Schäden (ca. 35 Mrd. € aus Hitze und Dürre sowie ca. 40 Mrd. € aus den Sturzfluten an Ahr und Erft im Juli 2021), welcher in der Studie anhand beleuchteter Einzelereignisse ermittelt wurde, liegt eine Attribution vor. Hier kann eine Verbindung zwischen Klimawandel und Auftreten von Extremwetterereignissen hergestellt werden.

Kosten durch Klimawandelfolgen in der Metropole Ruhr (Eiserbeck et al. 2024)

Im Auftrag des Regionalverbands Ruhr führt die Prognos AG eine Studie zur Bedeutung der Klimaanpassungswirtschaft in der Metropole Ruhr sowie von (ausgewählten) Kosten durch Klimawandelfolgen in der Metropole Ruhr durch. Bei den Kosten wurden hitzebedingte Produktionsausfälle, Kosten durch Niedrigwasser auf Rhein und Ruhr sowie zusätzliche Kosten im Gesundheitssystem durch Hitze (ohne Todesfälle) monetär bewertet. Die Studie befindet sich derzeit noch in der Erstellungsphase. Gezeigt wird, dass sich Klimafolgenkosten auch auf kleinräumiger Ebene abschätzen lassen.

Anpassungskosten sind entsprechend der oben dargestellten Einteilung Teil der Kosten der Schadensverringerung. Anpassungskosten umfassen finanzielle Aufwendungen, die erforderlich sind, um die negativen Auswirkungen von Schäden infolge des Klimawandels zu mildern. Diese Kosten können sowohl die Kosten für kurzfristige Anpassungsmaßnahmen wie die Installation von Klimaanlage, als auch die Kosten für langfristige Infrastrukturinvestitionen, wie den Bau von Deichanlagen, umfassen (Oberpriller et al. 2021).

Maßnahmen können sowohl der Anpassung als auch der Vermeidung dienen. Die entsprechenden Kosten können dann beiden Kategorien zugeordnet werden. Eine Abgrenzung von Maßnahmen zur Klimawandelanpassung im Vergleich zu Klimaschutzmaßnahmen, die einen Vermeidungsansatz verfolgen, ist in Abbildung 1 dargestellt. Ein Beispiel für Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel ist die Schaffung vorausschauender Maßnahmen für den Umgang mit Hochwasserereignissen, um die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels so gering wie möglich zu halten (Umweltbundesamt Österreich 2024).

Anpassungskosten werden häufig von verschiedenen Akteurinnen und Akteuren getragen. Die Kosten für die Anschaffung von Klimaanlage in Wohnungen werden von der anschaffenden Person getragen, während Kosten für Maßnahmen im Städtebau oder im Hochwasserschutz von der Gesellschaft getragen und somit vergemeinschaftet werden. Insofern besteht auch die Gefahr der ungerechten Verteilung der Kosten, da Verursachende der notwendigen Anpassung nicht entsprechend ihrer Verantwortung belastet werden.

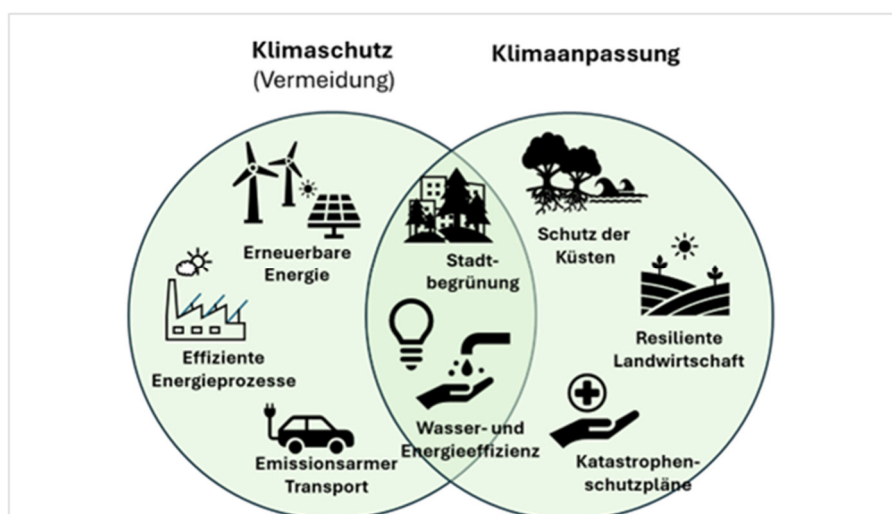


Abbildung 1: Unterscheidung von Maßnahmen zum Klimaschutz (Vermeidung von Umweltschäden) und Klimaanpassungsmaßnahmen (eigene Darstellung nach LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg 2024)

2.1.2 CO₂-Vermeidungskosten

CO₂-Vermeidungskosten sind die Kosten für Maßnahmen zur Vermeidung oder Verringerung jener Aktivitäten, die Klimafolgeschäden verursachen. Vermeidungskosten können sich auf CO₂-Emissionen mit und ohne Äquivalente beziehen. Vermeidungskosten stehen somit in keinem unmittelbaren Zusammenhang mit den Kosten der Klimafolgeschäden. In der Argumentation können sie nützlich sein, falls unzureichende Kenntnisse für Klimafolgeschäden und deren Kosten bestehen. Vermeidungskosten werden anhand von spezifischen Szenarien zur CO₂-Vermeidung geschätzt. Darin werden CO₂-Vermeidungskosten in Abhängigkeit zum Emissionspfad ausgewiesen. Der Emissionspfad ist entsprechend der geltenden Gesetzgebung rechtlich vorgegeben (Klimaschutzgesetze auf Bundes- und auf Landesebene sowie das Pariser Klimaschutzabkommen als völkerrechtliche Vereinbarung). Die Vermeidungskosten sind die Kosten für technologische oder organisatorische Maßnahmen, die zu einer THG-Minderung führen. Sie umfassen typischerweise Investitions- und Betriebskosten von Minderungsmaßnahmen und -technologien, abzüglich erzielter Einsparungen oder Erlöse. Die Grenzvermeidungskosten werden aus der Modellrechnung extrahiert, als Kosten zur Vermeidung der jeweils nächsten THG-Emissionseinheit. Durch die Vermeidung von Emissionen und die Inkaufnahme von Vermeidungskosten werden Schadens- und Anpassungskosten vermieden (s. Abbildung 2).

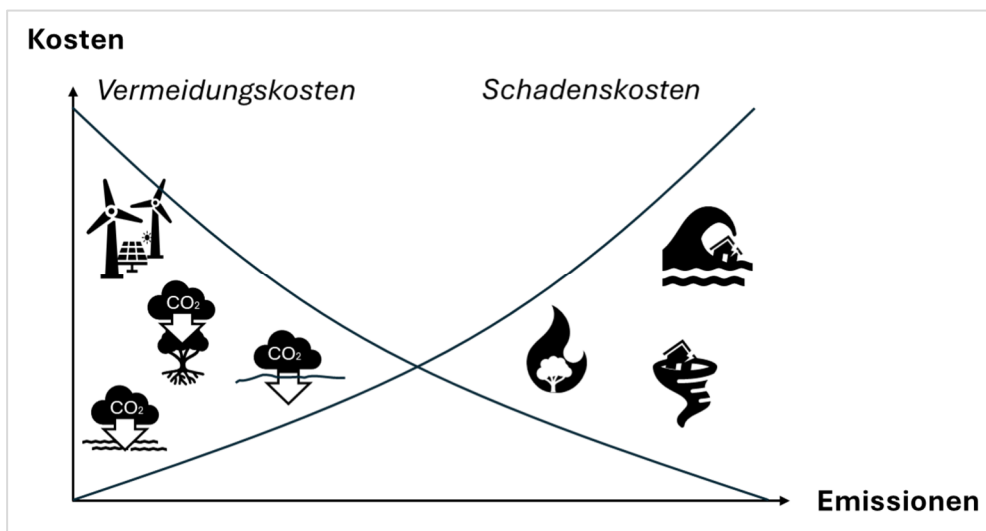


Abbildung 2: Zusammenspiel von Schadenskosten und Vermeidungskosten (eigene Darstellung nach Friedrich 2001)

2.2 Instrumente zur Internalisierung von Umweltkosten

Die in Kapitel 1.2 dargestellten Arten von externalisierten Kosten können mit Hilfe unterschiedlicher Instrumente internalisiert werden. Dafür lassen sich folgende Ansätze beschreiben:

- **Marktbasierte Instrumente**, die ökonomische Anreize nutzen, um Emittenten zu klimafreundlichen Verhalten zu bewegen. Darunter fallen preisbasierte Instrumente wie der CO₂-Emissionshandel oder CO₂-Steuern aber auch freiwillige Kompensationspreise oder interne Preise wie Schattenpreise. Der finanzielle Wert, welcher entweder real oder vir-

tuell für die Anwendung eines preisbasierten Instruments zur Internalisierung von Umweltkosten, einer bestimmten Emissionsmenge zugewiesen wird – bspw. einer Tonne CO₂ – wird häufig „CO₂-Preis“ genannt.

- **Regulatorische / fiskalische Instrumente**, die Regeln und Rahmenbedingungen definieren, welche die THG-Emissionen reduzieren oder begrenzen. Darunter fallen technische Regelungen wie z. B. Emissionsgrenzwerte, Subventionsabbau für klimaschädliche Technologien oder Verfahren aber auch Fördermaßnahmen für klimafreundliche Maßnahmen.
- **Informatorische Instrumente**, die auf Transparenz und Entscheidungswissen setzt. Darunter fallen Maßnahmen wie CO₂-Kennzeichnungen oder Nachhaltigkeitsberichterstattungen.

Der Fokus der Studie liegt auf den marktbasierten Instrumenten, die im Folgenden genauer erläutert werden. Marktbasierte Instrumente unterscheiden sich vor allem hinsichtlich der Bildung ihres Preises. Während der Preis pro Tonne CO_{2e} beim Emissionshandel über einen Marktmechanismus gebildet wird, handelt es sich bei den anderen Instrumenten entweder um einen festen Wert (z. B. beim Schattenpreis und bei Steuern und Abgaben) oder es besteht eine Kopplung an den Emissionshandel (unter Anderem angedacht beim Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM)). Die Instrumente unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Ausgestaltung, ihrer Ziele und ihrer Lenkungswirkung. Die dargestellten Marktinstrumente reichen vom EU-Binnenmarkt bis hin zu Internalisierungsinstrumenten einzelner Institutionen oder Unternehmen, die entsprechend auch durch das Land Hessen eingeführt werden könnten.

2.2.1 Emissionshandel

Beschreibung und Ziele des Instruments

Der Emissionshandel ist ein marktbasiertes Instrument zur Reduktion von Emissionen. Dabei wird zum einen für die Emissionen im Bilanzraum eine feste Obergrenze staatlich festgelegt („Cap“). Diese gilt in der Regel für eine vorab definierte Periode. Die im Rahmen des Bilanzraums agierenden Emittenten dürfen diese Menge an THG-Emissionen nicht überschreiten. Ein klimapolitisch anspruchsvolles Cap sorgt somit dafür, dass Zertifikate, die zu THG-Emissionen berechtigen, ein knappes Gut werden und sich durch den Handel („Trade“) am Markt ein Preis dafür bildet. Der Preis soll die Unternehmen anreizen, mehr in Klimaschutz zu investieren (DEHSt 2025a). Der Emissionshandel soll mit möglichst geringem volkswirtschaftlichem Aufwand dafür sorgen, dass eine bestimmte Menge an THG-Emissionen, die regelmäßig in Handelsperioden festgelegt wird, nicht überschritten wird.

Ausgestaltung und Lenkungswirkung des Instruments

Emittenten, die vom Emissionshandelssystem erfasst werden, müssen für jede Tonne CO_{2e} eine Berechtigung (Zertifikat) abgeben. Die Ausgabe der Berechtigungen kann über kostenlose Zuteilungen oder Auktionen erfolgen (Primärmarkt). Auf dem Sekundärmarkt können auch von Nicht-Emittenten Zertifikate bzw. Berechtigungen verkauft oder erworben werden (s. Abbildung 3). Durch den Handel mit den Zertifikaten erhält jede Tonne CO_{2e}-Emissionen einen Wert. Sind die Kosten für den Kauf von Zertifikaten höher als Investitionen in Klimaschutz, werden diese angereizt. Hohe CO_{2e}-Preise sind für eine Lenkungswirkung besonders dort erforderlich, wo in Zukunft kostenintensivere Technologien eingesetzt werden müssen,

die (noch) nicht mit konventionellen Technologien im Wettbewerb bestehen können (Pietzcker et al. 2021).

Beispiele:

Für Deutschland sind aktuell zwei Emissionshandelssysteme relevant:

- Für die Energiewirtschaft¹ und energieintensive Industrie² sowie die Luftfahrzeugbetreiber und Schifffahrtsunternehmen gilt der europäische Emissionshandel (EU-ETS 1). Erfasst werden alle direkten THG-Emissionen (inkl. Äquivalente, Scope 1-Emissionen) der Unternehmen.
- Für die Nutzung von fossilen Brennstoffen in den nicht vom EU-ETS adressierten Sektoren (insbesondere private Haushalte, Verkehr, Gewerbe und die nicht vom ETS erfassten Industrien) gilt seit 2021 der nationale Emissionshandel (nEHS, Einführung durch das Brennstoffemissionshandelsgesetz BEHG). Ab dem Jahr 2027 wird der nationale Emissionshandel dann durch den erweiterten europäischen Emissionshandel (EU-ETS 2) abgelöst. Das bedeutet, dass die Bereiche Gebäude und Straßenverkehr auch in den europäischen Emissionshandel integriert werden. Das BEHG adressiert die direkten THG-Emissionen inkl. Äquivalente.

Der **EU-ETS 1** zielt im Rahmen des „Fit For 55“ Pakets darauf ab, die THG-Emissionen bis 2030 um mindestens 55 % im Vergleich zu 2005 zu reduzieren. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde das oben beschriebene Cap angepasst. Der lineare Reduktionsfaktor stieg 2024 von davor 2,2 % auf 4,3 % und 2028 auf 4,4 % (DEHSt 2024). Laut Europäischer Kommission sanken die Emissionen aller am EU-ETS 1 teilnehmenden Anlagen 2023 um etwa 17 % gegenüber dem Vorjahr. Gegenüber dem Beginn des europäischen Emissionshandels im Jahr 2005 liegt der Emissionsrückgang europaweit bei 48 % (Umweltbundesamt 2025).

Das Instrument wurde allerdings auch verschiedentlich kritisiert. Auf globaler Ebene war das Instrument zeitweilig nicht effizient genug, da zum Beispiel der EU-ETS zeitweise den Ersatz europäischer Produkte durch außereuropäische Importe zur Folge hatte (Fanelli und Ortis 2020). Auch die kostenfreie Zuteilung der Emissionsrechte an bestehende Unternehmen führte zu deutlicher Kritik, da die Anreizwirkung zur Emissionsreduktion für diese Unternehmen nur gering war. Diese Kritikpunkte wurden jedoch durch die Weiterentwicklung des EU-ETS teilweise adressiert: Seit Phase III (2013-2020) erfolgt die Zuteilung auf Basis produktbezogener Benchmarks, und die freie Zuteilung wird schrittweise reduziert. Zusätzlich zielt der 2023 eingeführte CBAM darauf ab, Wettbewerbsverzerrungen durch Importe aus Ländern mit niedrigeren Klimastandards zu vermeiden und Carbon Leakage künftig wirksam zu begrenzen (Dechezleprêtre et al. 2025).

Positiv hervorzuheben ist darüber hinaus, dass Erlöse aus der Zertifikatsvergabe in Finanzierungsinstrumente wie dem Klima- und Transformationsfonds in Deutschland fließen, mit dem wiederum Maßnahmen in den Klimaschutz finanziell unterstützt werden können (Umweltbundesamt 2024b).

Mit dem **BEHG** wurde die nationale Bepreisung von CO_{2e}-Emissionen in Deutschland auch außerhalb des EU-ETS als nationales Emissionshandelssystem eingeführt. Das Instrument

¹ Große Energieanlagen, insbesondere fossil befeuerte Kraftwerke, Heizkraftwerke (Kraft-Wärme-Kopplung) und Heizwerke (jeweils ab 20 MW Feuerungswärmeleistung)

² Energieintensive Industrieanlagen, beispielweise Hochöfen der Stahlindustrie, Raffinerien, Zementwerke, Aluminiumwerke, Anlagen der Chemieindustrie

adressiert die Inverkehrbringer und Lieferanten fossiler Energieträger wie Erdgas, Öl oder Benzin und Diesel. Für die Menge der verkauften Energieträger und die damit verbundenen THG-Emissionen sind Emissionszertifikate zu erwerben (DEHSt 2025c). Die entsprechenden Kosten werden in der Regel über die Energiepreise an die Verbraucherinnen und Verbraucher weitergegeben.

Ziel des nationalen Emissionshandels ist eine Reduktion der Emissionen, die durch die einbezogenen Energieträger entstehen. Der nationale Emissionshandel wirkt in Verbindung mit den weiteren in diesen Sektoren etablierten Klimaschutzinstrumenten, wie beispielsweise der Förderung der energetischen Gebäudesanierung. Diese Instrumente sollen insbesondere die soziale und ökonomische Verträglichkeit des Emissionshandels sicherstellen. Der nationale Emissionshandel wird in zwei Phasen umgesetzt. In der ersten Phase erfolgt ein Verkauf der Emissionsrechte zu festen Preisen. Es gibt keine Begrenzung der verkauften Menge an Emissionsrechten. Somit wirkt das BEHG in dieser ersten Phase eher wie eine Abgabe. Erst ab dem Jahr 2026 findet eine Auktionierung der Emissionsrechte statt. Und ab 2027 wird das BEHG in den EU-ETS 2 überführt, mit dem die Emissionen in den Bereichen Gebäude und Straßenverkehr bis zum Jahr 2030 um 42 % gegenüber 2005 gesenkt werden sollen.

Preise

Der durchschnittliche Preis der Emissionsrechte im EU-ETS 1 lag im Jahr 2020 bei 24,61 €/t CO_{2e}, 2022 bei 80,32 € und 2023 bei 83,66 € (Umweltbundesamt 2024b). Aktuell (Stand 2025) schwankt er zwischen 60 und 80 €/t CO_{2e} (DEHSt 2025b).

Im nationalen Emissionshandel werden laut § 10 BEHG ab 2026 die Emissionsrechte zu einem Preis zwischen 55 €/t CO_{2e} und 65 €/t CO_{2e} versteigert. Der für die Jahre zuvor geltende Festpreis liegt bei 45 €/t CO_{2e} im Jahr 2024 und 55 €/t CO_{2e} im Jahr 2025. Die Preise im nationalen Emissionshandel bzw. im ETS 2 steigen lt. UBA Projektionsbericht für 2024 bis zum Jahr 2050 auf 181 €/t CO_{2e}.

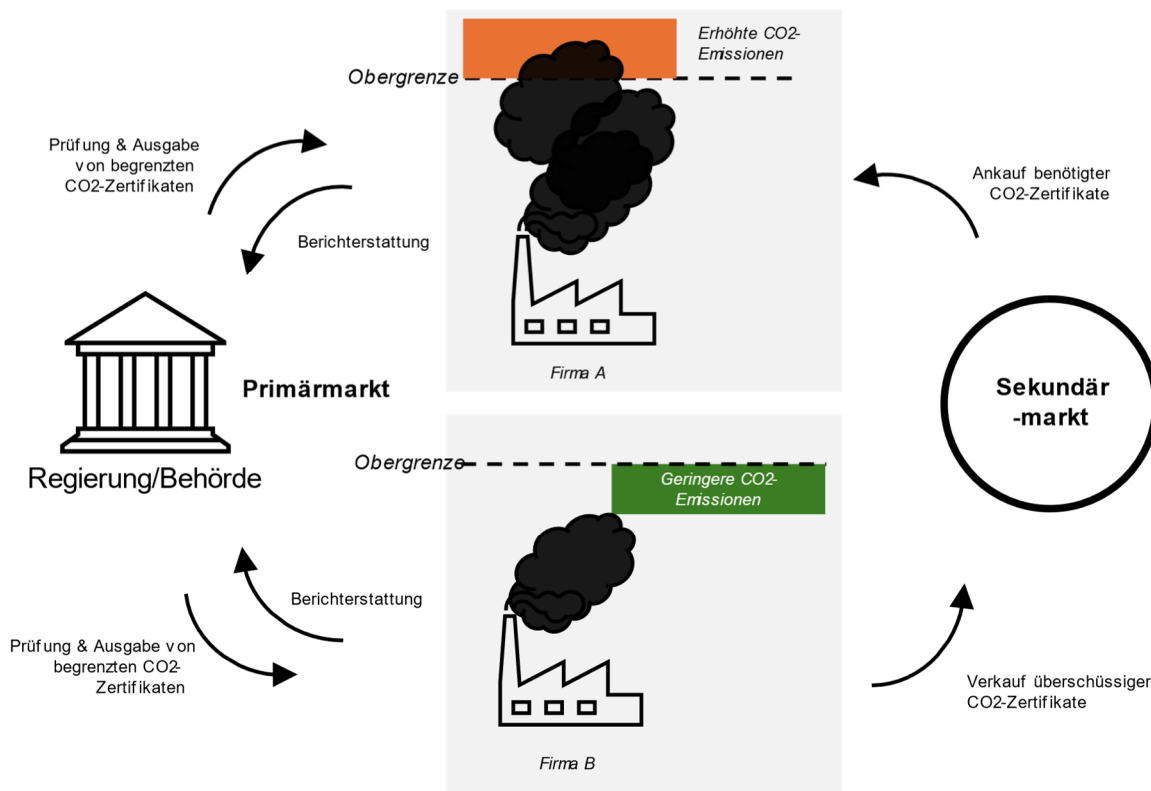


Abbildung 3: CO₂-Emissionshandel mit Cap-and-Trade Mechanismus (eigene Darstellung nach Varsani und Gupta 2025)

2.2.2 Carbon Border Adjustment Mechanism

Beschreibung und Ziele des Instruments

In Wirtschaftszonen mit einem CO₂-Bepreisungsinstrument (bspw. EU-ETS) kann die heimische Industrie gegenüber Unternehmen benachteiligt werden, die diesen Instrumenten nicht unterliegen. Wie in Abbildung 4 dargestellt, dient der CBAM dazu, diese Wettbewerbsverzerrungen zwischen der Binnenwirtschaftszone und der Außenwirtschaftszone zu vermeiden. Zur Vermeidung dieser Nachteile wird für Importe in die Binnenwirtschaftszone eine Ausgleichszahlung erhoben, die die importierten Produkte so verteuert, als würden sie der Regulierung der Binnenwirtschaftszone unterliegen (vgl. Abbildung 4). Der CBAM ergänzt somit einen Emissionshandel und soll faire Wettbewerbsbedingungen sicherstellen (Overland und Sadaqat Huda 2022).

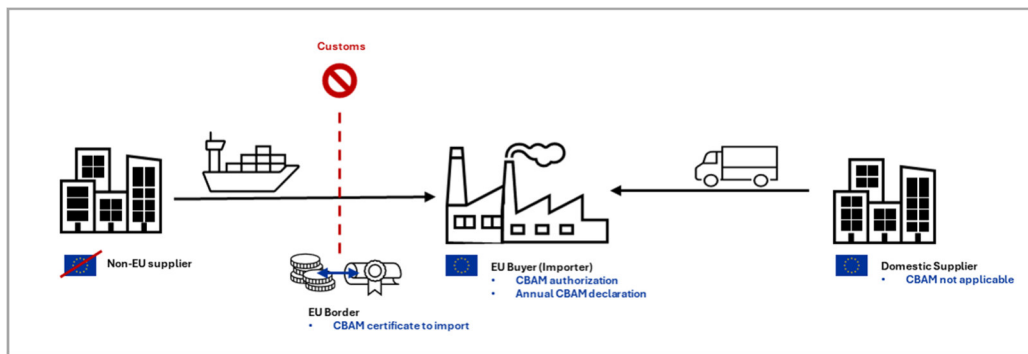


Abbildung 4: CBAM am Beispiel der Europäischen Union (EU) (eigene Darstellung nach The Conference Board 2022)

Darüber hinaus sollen Nicht-EU-Staaten angereizt werden, entweder ihr Emissionshandelssystem mit dem EU-ETS zu verbinden oder ihre Umweltstandards so anzuheben, dass die Abgaben entfallen können.

Ausgestaltung und Lenkungswirkung des Instruments

Der CBAM der europäischen Union (EU) ist Teil des europäischen „Fit for 55“-Pakets und gilt seit dem 1. Oktober 2023. Der CBAM richtet sich in der jetzigen Phase an Importeure, die CO₂-intensive Produkte wie Strom, Zement, Stahl, Aluminium, Düngemittel und Wasserstoff in die EU einführen und hier auf dem Binnenmarkt verkaufen wollen. Teilnahmepflichtig sind Industrie- und Handelsunternehmen, aber auch Einzelunternehmen oder Privatpersonen. In Deutschland ist die Deutsche Emissionshandelsstelle (DEHSt) im UBA für das CBAM zuständig.

In der momentanen Übergangsphase (2023 bis Ende 2025) gelten noch keine finanziellen Verpflichtungen und Betroffene unterliegen hauptsächlich Berichtspflichten. Die Verpflichtung zur Abgabe von CBAM-Zertifikaten soll 2026 beginnen und dann schrittweise ansteigen, genauso wie sich auch die kostenlose Zuteilung an die EU-Hersteller der betreffenden Waren verringert wird. Im Rahmen aktueller Entscheidungen gab es Anpassungen am CBAM: Im Mai 2025 hat das Europäische Parlament beschlossen, dass Warenströme erst ab einer Importmenge von 50 Tonnen pro Jahr betroffen sind. Zudem wurde der Start formal auf 2027 verschoben (Abnett 2025).

Ähnlich wie beim EU-ETS II müssen ab 2026 als Teil des CBAM auch Emissionszertifikate erworben und abgegeben werden, die den Emissionen z.B. einer importierten Ware entsprechen. Der CBAM-Preis wird sich an die durchschnittlichen Auktionspreise im europäischen Emissionshandel anlehnen. Bis 2034 wird die kostenlose Zuteilung für diese Produkte vollständig eingestellt, und die CBAM-Verpflichtung gilt für 100 % der Emissionen. In den Herkunftsländern gezahlte CO₂-Preise werden unter bestimmten Voraussetzungen anerkannt (Umweltbundesamt 2024a).

An dem CBAM wird allerdings kritisiert, dass es als marktbasiertes Instrument indirekt dafür sorgen könnte, dass die Kosten an Verbraucherinnen und Verbraucher weitergetragen werden, anstatt, wie eigentlich beabsichtigt, Unternehmen zu einem Umdenken zu veranlassen (Bayer und Schaffer 2024). Seine Wirkung entspricht de-facto dem eines Zolls auf die impor-

tierten Waren. Darüber hinaus wird dem Mechanismus vorgeworfen, Handel mit Unternehmen, die außerhalb der OECD Länder agieren, schwerer zu belasten, als mit Unternehmen der OECD Länder (Lin und Zhao 2024).

Preise

Die Verkaufsphase für die CBAM-Zertifikate wurde – trotz der Einführung des Instruments im Jahr 2026 – kürzlich auf Februar 2027 verschoben. Damit verzögert sich der tatsächliche Zahlungszeitpunkt und die zukünftige Preisentwicklung ist deshalb bisher noch unklar. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Preise für CBAM-Zertifikate jedoch ähnlichen Schwankungen ausgesetzt sein werden, wie die ETS-Preise (Generalzolldirektion 2024). Das bedeutet, dass der Preis für CBAM-Zertifikate nicht festgelegt, sondern wöchentlich auf Basis des durchschnittlichen EUA-Auktionspreises der Vorwoche berechnet wird. CBAM-Preise werden voraussichtlich erstmals veröffentlicht, wenn die Übergangsphase endet und Zertifikate verpflichtend abzugeben sind (Essers und Werth 2025; European Commission 2025).

2.2.3 Schattenpreis

Beschreibung und Ziele des Instruments

Der Schattenpreis zielt auf eine (kalkulatorische) Entscheidungsunterstützung im Rahmen von kriterienbasierten Variantenanalysen (z. B. Lebenszykluskostenvergleichen) ab. Er ist ein rechnerischer und somit fiktiver Preis, der pro Emissionseinheit angewendet wird.

Durch die Integration des Schattenpreises in Entscheidungsprozesse werden externalisierte Kosten internalisiert, auch wenn sie nicht unmittelbar anfallen. Dadurch werden bislang nicht eingepreiste Umwelt- und Klimakosten in die Wirtschaftlichkeitsberechnung mit einbezogen. Damit wird, je nach gewähltem Umweltkostenansatz (vgl. Kapitel 2.1), die Emissionsvermeidung oder der Klimafolgeschaden Teil des Entscheidungsprozesses. Bei Vergabeprozessen kann der Schattenpreis somit die Entscheidung hin zu einer aus Klimaschutzsicht präferierten Lösung beeinflussen. Der Schattenpreis führt dazu, dass ggf. im Einkaufspreis teurere Varianten bevorzugt werden.

Ausgestaltung und Lenkungswirkung des Instruments

Im Vergabeprozess wird die erwartete Menge CO₂ eines Produkts ermittelt und mit einem für alle Bieter einheitlichen Schattenpreis je Tonne CO₂ belegt. Dieser Schattenpreis wird für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf den Angebotspreis aufgeschlagen. Wettbewerb entsteht dadurch, dass Bieter Anreize erhalten, das erwartete Treibhauspotenzial ihrer Produkte zu reduzieren, beispielsweise durch den Einsatz CO₂-optimierter Materialien (siehe Abbildung 5). Je nach gewünschter Lenkungswirkung gibt es für die Bestimmung der Höhe des Schattenpreises für Treibhausgasemissionen verschiedene Ansätze (siehe Kapitel 2.1).

Die Lenkungswirkung eines Schattenpreises ergibt sich unmittelbar aus der Auswahl des Untersuchungsrahmens für die Ermittlung der THG-Emissionen. Beispielsweise erzeugt ein Verkehrsprojekt THG-Emissionen durch den Bau und den Betrieb der Verkehrsanlage, die Herstellung der Baumaterialien, wie auch durch die verkehrlichen Wirkungen. Dabei können THG-Emissionen zusätzlich entstehen (z. B. durch Bau und Betrieb, Herstellung der Baumaterialien), Verkehrsprojekte können aber auch THG-Minderungswirkung erzeugen (z. B. durch Verkehrsvermeidung, -verlagerung). Die Erhebung der für die Bewertung notwendigen

Daten kann je nach Untersuchungsrahmen aufwendig sein. Während bei einigen Bewertungen Daten genutzt werden können, die als Teil von Entscheidungsprozessen sowieso erhoben werden (z.B. Energieverbrauch) ist die Datenerhebung bei anderen Wirkungen deutlich komplexer, beispielsweise Umweltwirkungen im Lebenszyklus von Produkten oder die Wirkung von Planungs- und Infrastrukturmaßnahmen (z.B. Verkehrsverlagerung).

Beispiele

Einige öffentliche Institutionen auf Bundesebene sind bereits gesetzlich verpflichtet, den Schattenpreis in Entscheidungsprozesse zu integrieren. § 13 des Bundes-Klimaschutzgesetzes beinhaltet das sog. Berücksichtigungsgebot. Absatz 1 regelt, dass bei der Planung, Auswahl und Durchführung von Investitionen und bei der Beschaffung auf Bundesebene zur Vermeidung der THG-Emissionen ein CO₂-Preis anzusetzen ist. Dafür wurde die allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Beschaffung klimafreundlicher Leistungen (Allgemeine Verwaltungsvorschrift Klima) erarbeitet. Beschaffungsvorgänge des Bundes müssen demnach seit 2022 einen Schattenpreis einbeziehen (Bundswirtschaftsministerium 2020).

In Baden-Württemberg wurde verpflichtend ab dem 1. Juni 2023 der CO₂-Schattenpreis für alle Beschaffungen des Landes sowie für Baumaßnahmen des Landes eingeführt. Im Rahmen von Wirtschaftlichkeitsberechnungen zu Neubauten oder Sanierungen muss ein rechnerischer Preis für jede über den Lebenszyklus der Maßnahme entstehende Tonne CO₂ veranschlagt werden. Dieser Preis orientiert sich an den vom UBA empfohlenen Werten für Schadenskosten, der zum Zeitpunkt des Beschlusses im März 2021 bei 180 €/t CO_{2e} lag (Löschel und Schulze 2022).

Seit 2020 setzte die Stadt Stuttgart für alle städtischen Wirtschaftlichkeitsberechnungen 50 €/t CO₂ an, wobei der Betrag jährlich um 15 € erhöht wurde. Am 12. April 2024 wurde beschlossen, ab Mai 2024 ebenfalls den vom UBA empfohlenen Preis in Höhe von 300 €/t CO₂ zu verwenden (Landeshauptstadt Stuttgart, 2024).

In verschiedenen Staaten bestehen Modelle, um Schattenpreise in Vergabeverfahren, z.B. bei Bauinvestitionen, zu berücksichtigen (Püstow et al. 2023). Durch einen Executive Order der Biden-Regierung müssen Bundesbehörden in den USA bei umweltrelevanten Entscheidungen gemäß dem National Environmental Policy Act (NEPA) Schattenpreise für Treibhausgasemissionen berücksichtigen. Diese werden von der Interagency Working Group berechnet und zentral veröffentlicht; sie gelten auf Bundesebene, allerdings wurde ihre tatsächliche Anwendung durch die Behörden bislang uneinheitlich und seit der Trump-Regierung nur noch in gesetzlich zwingenden Fällen umgesetzt (Löschel und Schulze 2022; Friedman 2025).

In Großbritannien gibt es seit 2009 eine einheitliche Schätzung des Schattenpreises, die vom Department for Business, Energy and Industrial Strategy (BEIS) bereitgestellt wird. Seit 2020 fordert das Finanzministerium im sogenannten Green Book die Anwendung des Schattenpreises in der Verwaltung (Löschel und Schulze 2022). Das Land orientiert sich seit dem Climate Change Act 2008 an gesetzlich verbindlichen Obergrenzen für den maximalen Treibhausgasausstoß in jeweils fünfjährigen Zeiträumen. Um diese CO₂-Budgetziele zu erreichen, wurden Schattenpreise für eine Tonne t CO_{2e} festgelegt: 248 £/ t CO_{2e} für 2022, 280 £/t CO_{2e} für 2030 (das entspricht Stand Juli 2025 321 €/t CO_{2e}) und 378 £/t CO_{2e} für 2040 (das entspricht Stand Juli 2025 433 €/t CO_{2e}) (UK BEIS, 2021b) (Löschel und Schulze 2022).

In Frankreich hat das Beratungsgremium „France Stratégie“, welches von Premier Édouard Philippe einberufen wurde, der Alain-Quinet-Kommission einen Bericht mit Empfehlungen eines Schattenpreises präsentiert. Der Bericht empfiehlt einen Schattenpreis von 87 €/t CO₂ für das Jahr 2020 und eine Steigerung auf 250 €/t CO₂ bis zum Jahr 2030 (Löschel und Schulze 2022).

In Norwegen wird bei Vergabeprozessen ein etwas anderer Ansatz verfolgt. Hier wird ein sogenannter Wertungspreis für bestimmte Leistungen ermittelt. Dieser ist die Summe aus dem Angebotspreis und einem Aufschlag basierend auf der Menge der damit verbundenen THG-Emissionen (s. Abbildung 5). Der Bietende mit dem niedrigsten Treibhauspotenzial erhält keinen zusätzlichen Aufschlag. Für die übrigen Bietenden wird die Emissionsdifferenz zwischen ihrem Angebot und dem Angebot mit dem niedrigsten Treibhauspotenzial berechnet. Diese Differenz wird mit 5 NOK pro kg CO_{2e} bepreist (das entspricht Stand Juli 2025 ca. 425 €/t CO_{2e}). Der Aufschlag entspricht also der Differenz in kg CO_{2e} multipliziert mit 5 NOK/kg (Püstow et al. 2023).

Preise

Die oben bereits genannten national umgesetzten Schattenpreise liegen zwischen circa 50 € und 300 €/t CO_{2e}, international werden auch Preise größer als 300 €/tCO_{2e} erreicht (Löschel und Schulze 2022; Püstow et al. 2023). Das UBA empfiehlt, je Tonne THG-Emissionen 300 € (2024) bei einer 1%-Diskontrate anzusetzen(Umweltbundesamt 2020).

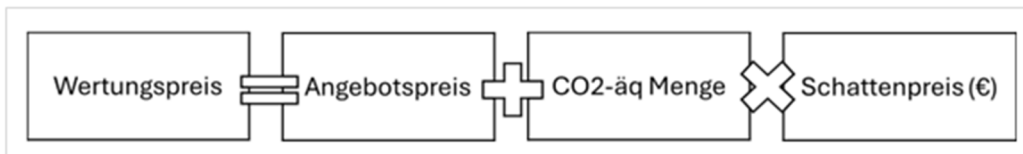


Abbildung 5: Berechnung eines Wertungspreises anhand eines Schattenpreises (eigene Darstellung nach Püstow et al. 2023)

2.2.4 CO₂-Steuer bzw. Abgabe und Umlage

Beschreibung und Ziele des Instruments

Die CO₂-Steuer bzw. -Abgabe und Umlage ist ein Instrument, bei dem Aktivitäten und Produkte, die CO₂-Emissionen verursachen, mit zusätzlichen expliziten Kosten beaufschlagt werden. In der Regel werden Energieträger entsprechend ihrer Klimawirkung zusätzlich besteuert. Eine CO₂-Steuer oder -Abgabe im rechtlichen Sinne wird immer von staatlichen Institutionen eingeführt und erhoben. Wenn privatwirtschaftliche oder zivilgesellschaftliche Organisationen eine freiwillige explizite Internalisierung externer Kosten vornehmen, wird dies im Rahmen des Berichts als CO₂-Umlage bezeichnet, da sie in der Regel dafür verwendet wird, Einnahmen für Klimaschutzmaßnahmen zu generieren.

Das Instrument kann sich sowohl an Unternehmen als auch direkt an Verbraucherinnen und Verbraucher richten und folgt meist dem Verursacherprinzip („polluter-pays-principle“, siehe Abbildung 6). Die Höhe der CO₂-Steuer bzw. -Abgabe und Umlage wird normativ festgesetzt.

Bei einer ausreichenden Zahlungsbereitschaft der Akteursgruppen im Markt bedeutet eine CO₂-Steuer bzw. -Abgabe und Umlage ist nicht zwingend eine Reduzierung der Treibhausgasemissionen.

Ziel einer CO₂-Steuer bzw. -Abgabe und Umlage ist die Reduzierung von Treibhausgasemissionen durch die Verteuerung der Emissionen. Durch die Belegung der Emissionen mit (ausreichend hohen) Kosten, sind die einzelnen Akteurinnen und Akteure eher bereit, Emissionen durch Verhaltensänderungen zu vermeiden und in klimafreundliche Technologien und Energieträger zu investieren.

Lenkungswirkung des Instruments

Da höhere Emissionen mit dem Instrument oft unmittelbar zu höheren Kosten führen, schafft das Instrument einen monetären Anreiz zur Reduktion von Emissionen. Das durch CO₂-Abgaben und Umlagen eingenommene Geld kann zweckgebunden in die Entwicklung klimafreundlicher Methoden und Technologien investiert werden, während die Einnahmen aus CO₂-Steuern keine Zweckbindung unterliegen dürfen.

Beispiele

In vielen Ländern gibt es bereits unterschiedliche Formen dieses Instruments. Die Schweiz hat beispielsweise eine CO₂-Abgabe auf Heizöl, Erdgas und Kohle, die unmittelbar beim Kauf anfällt und die beispielsweise für Subventionen im Rahmen von Gebäudesanierungen genutzt wird. Schweden (2017-2025) und Dänemark (2005-2007) erhoben in der Vergangenheit eine Flugsteuer auf nationale und internationale Flüge. Aus politischen Gründen wurden beide wieder abgeschafft. Frankreich führte 2020 als Klimaschutzmaßnahme eine indirekte CO₂-Abgabe (sog. Ökosteuer (ecotaxe)) auf Flugtickets ein. Ein direkter Zusammenhang zu den tatsächlich emittierten THG-Emissionen besteht zwar nicht, jedoch nimmt der Steuersatz bei zunehmender Distanz ebenfalls zu und Erlöse dieser Flugsteuer kommen beispielsweise emissionsärmeren Transportmitteln wie der Bahn zugute. Neben CO₂-Steuern für Flüge führte Frankreich schon 2009 eine zusätzliche Steuer für Neuwagenkäuferinnen und -käufer ein, die greift, sobald der Wagen eine bestimmte Emissionsgrenze überschreitet (Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages 2024; Kalinowska et al. 2009). Das Erzbistum Freiburg hat im Jahr eine CO₂-Umlage basierend auf den Treibhausgasemissionen des Bistums eingeführt. Die darüber eingesammelten Mittel werden über einen Klimaschutzfonds zweckgebunden für Klimaschutzmaßnahmen eingesetzt. Jährlich werden so ca. 8 Millionen Euro für Klimaschutzmaßnahmen nach dem Verursacherprinzip umgelegt (Erzbistum Freiburg 2024).

Preise

In der Schweiz liegt die CO₂-Abgabe auf Heizöl, Erdgas und Kohle bei insgesamt 120 CHF/t CO_{2e} (das entspricht im Juli 2025 rd. 128 €/t CO_{2e}) (Bundesamt für Umwelt 2023). Die CO₂-Umlage im Erzbistum Freiburg beträgt 100 €/t CO₂. (Erzbistum Freiburg 2024).

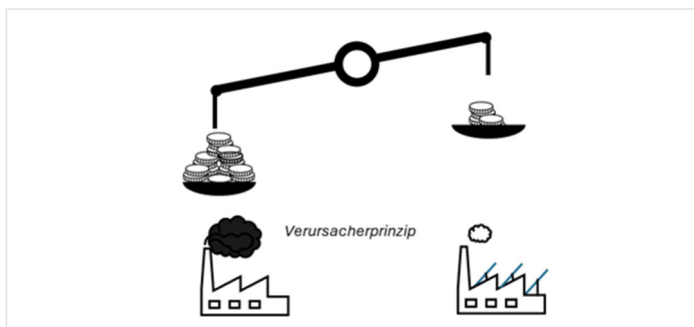


Abbildung 6: Mit der CO₂-Steuer sollen emissionsarme Aktivitäten weniger stark finanziell belastet werden als emissionsintensive Aktivitäten (eigene Darstellung)

2.3 Lücken der Internalisierung und Möglichkeiten für das Land Hessen

Die genannten Instrumente und die Darstellung der Anwendungsfelder zeigen auf, dass bereits verschiedene Methoden zur Internalisierung von Klimafolgekosten bestehen. Tabelle 1 zeigt, dass über bestehende marktwirtschaftliche Internalisierungsinstrumente (ETS I, BEHG bzw. zukünftig ETS II) in allen Sektoren eine Internalisierung von CO₂-Kosten erfolgt. Diese marktwirtschaftlichen Internalisierungsinstrumente orientieren sich in der Preisgestaltung im Wesentlichen an den gesetzlich festgelegten Klimaschutzziele und den damit verbundenen Emissionsminderungsmengen, bieten jedoch viele Ausnahmen überwiegend aus Gründen der Marktverträglichkeit (siehe kostenlose Zuteilung von Zertifikaten oder Eingrenzung des CBAM auf Warenverkehrsmengen größer als 50 Tonnen pro Jahr).

Darüber hinaus existieren in Deutschland weitere Internalisierungen, indem beispielsweise gesetzliche Anforderungen an THG-Emissionen (Obergrenzen) bestehen oder indem Förderprogramme klimafreundliche Lösungen unterstützen. Diese regulatorischen Internalisierungen verursachen bei den jeweiligen Zielgruppen und damit bei den Verursachenden der THG-Emissionen Vermeidungskosten. Die folgende Tabelle 1 fokussiert hier auf die wesentlichen gesetzlichen Grundlagen und erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Sie soll aufzeigen, dass in der Gesamtschau je Sektor weniger konkrete Anwendungslücken als vielmehr Lücken zwischen den angesetzten Preisen und den tatsächlichen gesellschaftlichen Schadenskosten bestehen. Auf Landesebene kann diese Lücke im Wesentlichen durch die Methode des Schattenpreises geschlossen werden, wie es einige Bundesländer bereits umgesetzt haben.

Tabelle 1: Übersicht der nationalen Internalisierungsinstrumente und Anwendungslücken in verschiedenen Sektoren

Sektor	Marktbasiertes Internalisierungsinstrument	Wirkung	Beispielhafte relevante zusätzliche national wirksame Gesetze / fiskalische Regulierungen	Anwendungslücken der Internalisierung
Energie-wirtschaft	Direkt EU-ETS I		Kohleverstromungsbeendigungsgesetz: Abschaffung von Kohlekraftwerken	

Sektor	Marktbasiertes Internalisierungsinstrument	Wirkung	Beispielhafte relevante zusätzliche national wirksame Gesetze / fiskalische Regulierungen	Anwendungslücken der Internalisierung
		Anstieg der Kosten für fossile Energieträger	Erneuerbare-Energien-Gesetz: Ausbau erneuerbarer Energien Klimaschutzgesetz	Differenz zwischen Emissionshandelspreis und Schadenskosten
Industrie	Brennstoffe: Direkt EU-ETS I (energieintensive Industrien) bzw. nationales Emissionshandelssystem (nEHS) und zukünftig ETS II (sonstige Industrien) Strom: Indirekt (siehe Energiewirtschaft)	Anstieg der Kosten für Baustoffe, Vorprodukte, Rohstoffe wie Stahl, Glas, Zement, chemische Produkte etc.	EU-F-Gas-Verordnung	Differenz zwischen anfallenden Vermeidungskosten, CO ₂ -Preis und Schadenskosten
			Energieeffizienzgesetz: Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs	
			Förderprogramme zur Dekarbonisierung des Industriesektors (z.B. Bundesförderung effiziente Wärmenetze)	
			Klimaschutzgesetz	
Private Haushalte / GHD (Gebäude)	Direkt (nEHS und zukünftig ETS II) Strom: Indirekt (siehe Energiewirtschaft)	Verteuerung der fossilen Energieträger fürs Heizen	Gebäudeenergiegesetz: Effizienzvorgaben für Gebäude und 65 %-Anforderung	Differenz zwischen anfallenden Vermeidungskosten, CO ₂ -Preis und Schadenskosten
			Wärmeplanungsgesetz	
			Klimaschutzgesetz	
Verkehr	Direkt (nEHS und zukünftig ETS II) Strom: Indirekt (siehe Energiewirtschaft)	Verteuerung von fossilen Kraftstoffen Benzin/Diesel	EU-Flottengrenzwerte für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge	Differenz zwischen anfallenden Vermeidungskosten, CO ₂ -Preis und Schadenskosten
			Clean Vehicles Directive (EU), umgesetzt in DE: Pflichtquoten für emissionsarme Fahrzeuge	
			Klimaschutzgesetz	

3 Anwendungsfälle in der Praxis

3.1 Ziele und Vorgehen

Ein zentraler Teil dieser Studie bestand in der Analyse praktischer Anwendungsfälle in Hessen, weiteren Bundesländern, Kommunen und Kirchen. Ziel war es, Informationen über die Anwendung und Umsetzung von Internalisierungsmethoden zu sammeln. Dabei sollten Aspekte wie der Status der Implementierung der Instrumente, ihre Einführung, die betroffenen Akteursgruppen sowie mögliche Folgen und Herausforderungen erfasst werden.

Die Informationsbeschaffung erfolgte über Interviews mit Vertreterinnen und Vertretern der Verwaltungen der Länder, Kommunen und Kirchen. Der Auswahl der Institutionen und Personen lagen Netzwerke des Hessischen Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat (HMLU) und der Auftragnehmer zugrunde. Interviewt wurden Expertinnen und Experten aus den Abteilungen/Bereichen, welche sich mit dem Thema zuvor bereits beschäftigt hatten, meist im Rahmen der Einführung einer Internalisierungsmethode.

Insgesamt wurden von Januar bis März 2025 **neun Interviews** mit acht unterschiedlichen Institutionen geführt. Die Interviews fanden zumeist online und in einzelnen Fällen auch persönlich vor Ort statt. Sie dauerten 30-60 Minuten und folgten einem Interviewleitfaden, welcher im Anhang enthalten ist. Neben allgemeinen Daten zur Institution und befragten Person standen die Praxisbeispiele und Informationen zur Einführung, zur Umsetzung, zu betroffenen Akteursgruppen und zu Auswirkungen im Mittelpunkt.

Alle Interviews wurden transkribiert und anschließend ausgewertet. Die befragten Personen gehören zu folgenden Institutionen:

- Hessisches Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt, Weinbau, Forsten, Jagd und Heimat
- Hessisches Ministerium für Finanzen
- Ministerium der Finanzen des Landes Nordrhein-Westfalen
- Ministerium der Finanzen des Landes Rheinland-Pfalz
- KEA Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg GmbH
- Erzbistum Freiburg – Diözesanstelle für Schöpfung und Umwelt
- Stadt Stuttgart
- Stadt Frankfurt am Main

Die Analyse der Interviewergebnisse erfolgte mittels qualitativer Inhaltsanalyse, wobei die Aussagen systematisch kategorisiert und deren Häufigkeiten untersucht wurden. Herausstechende Aussagen wurden in spezifische Themenbereiche eingeordnet.

Der Großteil der angefragten Institutionen zeigte sich kooperativ und war bereit, Informationen für die Studie zur Verfügung zu stellen. Mit einer Ausnahme konnten alle angefragten Institutionen Expertinnen und Experten benennen, die über relevante Erfahrungen und Kenntnisse zu den Internalisierungsmethoden verfügen. Einige der Befragten schlugen sogar weitere Expertinnen und Experten für zukünftige Interviews vor, was auf ein hohes Interesse an der Thematik und auf die Bereitschaft hinweist, den Austausch von Wissen zu diesem Thema zu fördern.

3.2 Ergebnisse der Interviews

3.2.1 Instrumente der Internalisierung und Praxisbeispiele

Unter den acht befragten Institutionen beschäftigten sich sieben mit einem Schattenpreis und eine mit einer CO₂-Umlage. Der Umsetzungsgrad der Internalisierung externer Kosten ist bei den Befragten unterschiedlich. Während einige Organisationen bereits von konkreten Implementierungen und positiven Erfahrungen mit festgelegten Preisen pro Tonne CO₂ berichteten (in drei Institutionen), wandten andere ein, dass eine gesetzliche Vorgabe zwar bestehe, eine Umsetzung noch nicht erfolgt sei. In diesen Fällen herrschen noch Unklarheiten beispielsweise über die konkrete Methodik und den Geltungsbereich. Der Fortschritt der Umsetzung und damit die Wirksamkeit der Internalisierungsinstrumente ist vom Engagement der zuständigen Personen und Entscheidungsträgerinnen bzw. Entscheidungsträgern abhängig.

Die interviewten Expertinnen und Experten nannten insgesamt fünfzehn Anwendungsfälle für Internalisierungen, die vier Geltungsbereichen zugeordnet werden können (siehe Abbildung 7). Aus den Interviews erschloss sich, dass die freiwillige oder gesetzlich verpflichtende Anwendung der Internalisierungsmethode jeweils alle Sektoren oder ausgewählte Sektoren adressiert.

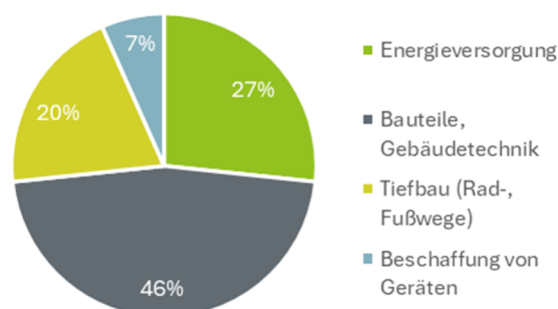


Abbildung 7: Geltungsbereiche bei der Internalisierung externer Kosten bei den ausgewählten Interviewpartnerinnen und -partnern (Quelle: Interviews)

Manche Institutionen wenden Bagatellgrenzen bezogen auf die Investitionssumme an. Diese werden individuell und je nach Geltungsbereich angesetzt. In Baden-Württemberg liegt sie beispielsweise bei 150 000 €. Bagatellgrenzen reduzieren bürokratische Prozesse insbesondere bei Beschaffungen mit niedrigen Stückzahlen und Kleininvestitionen. Die Höhe der Bagatellgrenze muss sich am Geltungsbereich und an der gewünschten Lenkungswirkung orientieren. Weil die absoluten Minderungswirkungen bei niedrigen Investitionen in der Regel eher gering sind, sind Bagatellgrenzen aus Klimaschutzsicht vertretbar.

Aus den neun Interviews ergaben sich konkrete Anwendungsfälle einer Internalisierungsmethode, von denen drei beispielhaft in Tabelle 2 dargestellt sind. Ein mehrfach genanntes Problem der Implementierung ist, dass die Grundlagendaten und Berechnungsmethoden, die zur Bestimmung der mit einer Maßnahme verbundenen CO₂-Emissionen erforderlich sind, fehlen.

Tabelle 2: Anwendungsbeispiele aus den Interviews

PV Anlagen auf Landesgebäuden Hessen	Im Rahmen eines Förderprogramms wurden Solaranlagen auf den Dächern von Landesgebäuden installiert. Die Dimensionierung der Anlage orientierte sich nicht am Bedarf der jeweiligen Einrichtung, sondern am maximalen Ertragspotential der Dachfläche. Überschüssiger Strom wird somit ins Netz eingespeist und „ersetzt“ konventionell erzeugten Strom. Aufgrund des Schattenpreises für vermiedene CO ₂ -Emissionen aus konventioneller Stromerzeugung rechnet sich die größere PV-Anlage. Der erzeugte Strom und die vermiedenen CO ₂ -Emissionen wurden mit dem vom UBA vorgegebenen Schattenpreis multipliziert, bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren.
Biogenes Gas Stuttgart	Bei einer Ausschreibung für die Gasversorgung städtischer Liegenschaften von 2022 bis 2024 wurden für CO ₂ -Emissionen ein Schattenpreis festgelegt, der zu einem biogenen Gasanteil von 35 % geführt hat. Ohne Schattenpreis wäre die Versorgung zu 100 % mit Erdgas erfolgt. Die Emissionsminderung beläuft sich auf ca. 17 000 Tonnen CO ₂ /pro Jahr.
Polizei präsidium	Der Neubau des Polizeipräsidiums in Ludwigshafen beläuft sich auf 150 Mio. € und schafft 450 Arbeitsplätze. Bei diesem Bauvorhaben wurden Recyclingbeton und CO ₂ -

Ludwigs hafen Rhein land Pfalz	arme Zementmischungen eingesetzt. Der Entscheidung für diese Rohstoffe lag eine Wirtschaftlichkeitsberechnung zugrunde, bei der die baubedingten CO ₂ -Emissionen mit einem Schattenpreis belegt wurden. Die Mehrkosten gegenüber einer konventionellen Errichtung des Polizeipräsidiums konnten durch den Schattenpreis haushälterisch begründet werden.
---	--

3.2.2 Lenkungswirkung

Die Interviewten schätzen die potenzielle Lenkungswirkung der Internalisierungsmethoden, insbesondere des CO₂-Schattenpreises, überwiegend positiv ein. Obwohl wenige über konkrete Anwendungsfälle berichten konnten, gingen die meisten von einer potenziell signifikanten steuernden Wirkung aus, die dazu führen könnte, dass CO₂-Emissionen reduziert und energieeffiziente Maßnahmen umgesetzt werden. Die Instrumente fördern demnach die Entscheidungsfindung zugunsten klimafreundlicheren Lösungen und zeigen – insbesondere im Gebäudesektor – deren wirtschaftliche Vorteile (z. B. durch schnellere Kapitalrückflusszeiten) auf. Die Interviewten sind sich einig, dass Schattenpreise eine nachhaltige Transformation beschleunigen könnten. Außerdem könnte die Lenkungswirkung laut den Expertinnen und Experten auch darin bestehen, Märkte zu verändern und neue Standards für Produkte oder Materialien anzuregen, insbesondere bei hoheitlich handelnden Akteursgruppen aus den Verwaltungen. Die Lenkungswirkung kann laut Interviews dabei schrittweise verstärkt werden, indem das Instrument auf weitere Sektoren ausgeweitet wird.

Laut einiger Befragten könne eine neue Marktdynamik entstehen, wenn mit der Internalisierung auch kostenintensive Produkte Vorrang in Beschaffungsprozessen der öffentlichen Hand bekommen. Eine größere Nachfrage nach klimaschonenden Produkten und Dienstleistungen erhöht laut der Interviewten die Wettbewerbsfähigkeit in diesen Segmenten. Dadurch könnten Preise für nachhaltige Produkte langfristig sinken, was wiederum Akzeptanz auch bei Konsumentinnen und Konsumenten schafft.

Evaluationen von bisher umgesetzten Internalisierungsprojekten liegen noch nicht vor. Insofern lassen sich keine unabhängigen, neutralen Aussagen über die Wirkung der Internalisierungsmethoden treffen.

3.2.3 Bepreisungsansätze

Der Teil der befragten Institutionen, der eine Internalisierungsmethode anwendet, begann ursprünglich mit einem eigens errechneten Preis. Der Preis wurde im Laufe der Zeit dynamisiert. Eine dynamische Anpassung des Preises ermöglicht laut einem Interviewten eine flexible Reaktion auf Marktveränderungen und unterstützt somit die Langfristigkeit der Maßnahmen. Generell wird die Bedeutung der Lernerfahrung, die Betroffene in Bezug auf verschiedene Bepreisungsstrategien momentan sammeln können, betont. In Hessen, Baden-Württemberg und in der Stadt Frankfurt orientiert sich der Preis an dem forschungsbasierten Ansatz des UBA. Der darauf basierte Preis liegt momentan (2024) bei einer 1 %-igen Diskontierungsrate bei 300 €/t CO_{2e}.

Drei Beispiele in Tabelle 3 zeigen den Umgang mit der Festlegung eines Preises für den Schattenpreis und die CO₂-Umlage:

Tabelle 3: Bepreisungsstrategien der Stadt Stuttgart, des Erzbistums Freiburg und von Rheinland-Pfalz

Stuttgart	2020 wurde von der Stadt erstmalig ein Schattenpreis von 50 €/t CO ₂ mit einer Dynamisierung von 15 €/t CO ₂ pro Jahr festgelegt. 2024 wurde dann eine Angleichung an den Preis des UBA festgelegt. Der stadtinterne Preis hätte damals bei 110 €/t CO ₂ gelegen und hätte im Vergleich zu dem damaligen Ansatz des UBA von 237 €/t CO ₂ deutlich niedriger gelegen. Der Gemeinderat hat trotzdem eine Orientierung am UBA-Wert beschlossen. Aufgrund der starken Erhöhung wird noch geprüft, ob dieser Preis für die Wirtschaftlichkeitsberechnungen vorgeschrieben wird.
Freiburg	Das Erzbistum Freiburg hat sich statt für einen Schattenpreis für eine CO ₂ -Umlage von 100 €/t CO ₂ entschieden, den Kirchengemeinden für den Energieverbrauch entrichten müssen. Dabei wird pauschal anhand der Energieverbrauchswerte der Gemeindegebäude geschätzt, wieviel die Gemeinden und wieviel die übergreifende Diözese zur Gesamtkobilanz zu den jährlich geschätzten 100 000 Tonnen CO ₂ des Erzbistums beiträgt. Auf dieser Grundlage wird die spezifische CO ₂ -Menge und damit zusammenhängende Zahlung pro Gemeinde festgelegt, für die sie jährlich aufkommen muss. Die eingenommenen Mittel fließen dann in einen Klimafonds, der Projekte unterstützt, die Gemeinden zur Reduzierung ihrer Emissionen verwenden können.
Rheinland Pfalz	Als Teil der Koalitionsvereinbarung von 2021 wurde in Rheinland-Pfalz ein Schattenpreis von 180 €/t CO ₂ vereinbart. Der Anwendungsbereich, in dem dieser verpflichtend gelten soll, war zum Zeitpunkt des Interviews noch offen. Diskutiert wird derzeit noch, ob sich der Schattenpreis an der Empfehlung des UBA orientieren wird.

Die Beispiele zeigen eine große Spanne der angewendeten CO₂-Preise. Die Diskussionen werden vordergründig unter dem Aspekt der Zumutbarkeit eines CO₂-Preises für den Vorhabenträger geführt. Einige Interviewte argumentieren demgegenüber, dass die zurzeit vorgeschlagenen Preise möglicherweise zu niedrig sind, um eine signifikante Lenkungswirkung zu erzielen. Laut Aussage der Interviewten sei es nahezu unmöglich, einheitliche (über die Grenzen der eigenen Zuständigkeit hinaus) Richtlinien zu vereinbaren und Akzeptanz für die Berücksichtigung der Klimakosten zu schaffen.

3.2.4 Soziale Gerechtigkeit

Die Befragten ziehen unterschiedliche Schlüsse zur sozialen Gerechtigkeit im Kontext der Internalisierung von Klimafolgekosten. Vereinzelt sind Interviewte besorgt, dass Bepreisungsansätze potenziell zu Ungleichheiten in der Gesellschaft führen könnten, insbesondere wenn die Kosten der Internalisierung unter sozialen Gesichtspunkten ungleich verteilt würde. Hier bezieht sich die Sorge vor allem auf eine Mittelkonkurrenz, die beispielsweise dazu führen könnte, dass aufgrund einer kurzfristig höheren Investition beispielsweise für eine nachhaltigere Infrastrukturmaßnahme, zeitweise für andere Bereiche (z.B. Bau neuer Kindergärten) weniger Gelder der öffentlichen Hand zur Verfügung stehen.

Ein Großteil der Befragten äußert jedoch keine Bedenken, dass sich langfristig Nachteile für die Gesellschaft ergeben könnten. Die meisten sehen nur indirekte Effekte und erkennen die

Möglichkeit an, dass durch die Internalisierung von CO₂-Kosten langfristig umweltfreundliche Technologien und Lösungen gefördert werden, von denen letztlich die gesamte Gesellschaft profitiert.

Die Förderung klimafreundlicher Maßnahmen könnte, so der Tenor einiger Aussagen, langfristig auch soziale Gerechtigkeit unterstützen, indem sie die Lebensqualität verbessert und Umweltschäden verringert, die vor allem sozial benachteiligte Gruppen stark betreffen.

3.2.5 Kompatibilität der Instrumente

Einige Interviewte betonen, dass der Schattenpreis als separates, ergänzendes Instrument zu bestehenden nationalen oder internationalen Bepreisungssystemen fungieren kann, um spezifische lokale oder sektorspezifische Ziele zu erreichen. Konflikte zwischen Instrumenten auf verschiedenen Ebenen (EU, national, regional) werden von den meisten Befragten nicht gesehen.

Vereinzelte Befragte weisen auf die Gefahr der Doppelbepreisung hin. Insbesondere wurde angemerkt, dass, wenn Kommunen oder Organisationen den Schattenpreis parallel zu einem nationalen CO₂-Preis anwenden, dies zu Verwirrung und zusätzlichen finanziellen Belastungen führen könnte. Die Interviewten gaben zu bedenken, dass Unternehmen in ihrer Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigt werden könnten, falls Bepreisungssysteme parallel angewendet würden. Ein Interviewter merkte dazu an, dass eine klare Kommunikation und Abstimmung zwischen den verschiedenen Systemen erforderlich seien, um die Akzeptanz und die Wirksamkeit der CO₂-Preise zu erhöhen.

3.2.6 Verstärker und Hemmnisse

Wie in Tabelle 4 dargestellt, ist die Einführung von Internalisierungsmethoden laut Expertinnen und Experten eine Herausforderung, da hierfür politische Beschlüsse und administrative Prozesse erforderlich sind. Häufig werden Internalisierungsmethoden im Rahmen größerer Gesetzesänderungen implementiert, wie etwa der Einführung einer Energierichtlinie der Landeshauptstadt Stuttgart im Jahr 2020 oder im Rahmen der Koalitionsvereinbarung von 2021 in Rheinland-Pfalz.

Genannt wurden als Hemmnisse vor allem die fehlende politische Akzeptanz, unterschiedliche Interessen in den Ämtern und die fehlende rechtssichere Bewertung. Auf der anderen Seite gibt es auch Verstärker, wie die Beteiligung möglichst vieler Fachdienststellen, die Vorreiterrolle und die politische Relevanz. Best Practice Beispiele und eine anfängliche Freiwilligkeit fördern ebenfalls die Implementierung dieser Methoden.

Tabelle 4: Verstärker und Hemmnisse bei der Einführung einer Internalisierungsmethode (Quelle: Eigene Darstellung)

Verstärker der Einführung	Hemmnisse der Einführung
Beteiligung möglichst vieler Fachdienststellen	Fehlende Akzeptanz in politischen Gremien

Einnehmen einer Vorreiterrolle	Unterschiedliche Interessen in Ämtern
Politische Relevanz ausnutzen	Fehlende Langzeitperspektive bei Wirtschaftlichkeitsrechnungen
Motivierende Best Practice Beispiele vergleichbarer anderer Stellen	Notwendigkeit einer rechtssicheren Bewertung
Softwareunterstützung der Berechnung	
Freiwilligkeit zu Beginn, dann schrittweise Verschärfung	

Während die Einführung einer Internalisierungsmethode bei allen befragten Institutionen bereits erfolgreich war, deuten die Interviews daraufhin, dass sich die meisten Schwierigkeiten in der Umsetzungsphase zeigen. Wie Tabelle 5 zeigt, wird die Umsetzung durch verschiedene Hemmnisse erschwert, darunter die mangelnde Akzeptanz der tatsächlichen Umsetzung innerhalb der entsprechenden Verwaltung. Zudem mangelt es an Kommunikation zwischen den betroffenen Stellen, an fehlenden rechtlichen Konsequenzen bei der Nichteinhaltung und an klaren Schwellenwerten, was den Aufwand für die Umsetzung unverhältnismäßig hoch erscheinen lässt. Auch die unzureichende Datenverfügbarkeit war ein mehrfach genanntes Hemmnis.

Auf der anderen Seite gibt es auch Verstärker, die die Umsetzung fördern können, wie die Unterstützung von Gemeinden durch ökonomische Expertinnen und Experten und die Vereinfachung von Entscheidungsstrukturen. Vorbildfunktionen schaffen Akzeptanz, während eine klare Kommunikation der gesellschaftlichen Vorteile und die Bereitstellung von Hilfestellungen durch Online-Ressourcen dazu beitragen, das Verständnis für die Maßnahmen zu erhöhen. Durch diese Maßnahmen kann eine bessere Umsetzung und Akzeptanz der Internalisierungsmethoden in der Praxis erzielt werden.

Tabelle 5: Hemmnisse und Treiber der Umsetzung einer Internalisierungsmethode (Quelle: Eigene Darstellung)

Verstärker der Umsetzung	Hemmnisse der Umsetzung
Unterstützung durch ökonomische Expertinnen und Experten	Fehlende politische (interne) Akzeptanz
Top-down-Strukturen erleichtern Entscheidungen	Mangelnde Kommunikation zwischen Ämtern
Kommunikation gesellschaftlicher Vorteile	Keine Konsequenzen bei Nichteinhaltung im Rahmen der Verwaltungsgerichtsbarkeit
Hilfestellung durch Online-Ressourcen und Berechnungstools	Keine Schwellenwerte für Angebote mit geringem Auftragswert führt zu bürokratischer Überforderung
Vorbildfunktion schafft Akzeptanz	Intransparente Methodik für Akteursgruppen
Außenkommunikation: Darstellung von Relevanz und Wirkung	Fehlende Expertise für Emissionsbilanzierung
	Fehlende zeitliche Ressourcen für Ökobilanz
	Unzureichende Datenverfügbarkeit

Verstärker der Umsetzung	Hemmnisse der Umsetzung
	Fehlende politische Kommunikation zur externen Schaffung von Akzeptanz und Relevanz
	Unklarheit bzgl. wirksamer Preisgestaltung

4 Praxisberechnungen in Hessen

4.1 Vorgehen

Die nachfolgenden Praxisberechnungen zeigen, wie die Internalisierung externer Kosten Entscheidungen beeinflussen kann. Gegenstand der Analysen sind drei Bereiche: Infrastruktur, Gebäude und Beschaffung. Für jeden dieser Bereiche wird eine separate Berechnung mit sowie ohne Berücksichtigung eines CO₂-Preises von 300 €/t CO_{2e} in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung angestellt. Der Wert entspricht der momentanen Empfehlung des UBA von 2024 bei einer 1%-igen-Diskontierungsrate.

Bei den Praxisbeispielen Gebäude und Pkw, bei denen die Betriebsphase besonders ins Gewicht fällt, wurde in der Berechnung außerdem eine Dynamisierung des CO₂-Preises angenommen. Die Preissteigerung entspricht den Angaben der UBA-Methodenkonvention 3.2. Die Empfehlung des UBA geht hier bei einer 1 %-igen reinen Diskontierungsrate davon aus, dass der CO₂-Preis sich bis 2030 auf 335 € anhebt.

Bei den nachfolgenden fünf Praxisbeispielen handelt es sich teils um konkrete Vorhaben und Beschaffungen, aber auch konstruierte Beispiele, die in der beschriebenen Form nicht umgesetzt worden sind. Sie sollen aufzeigen, welche Wirkung eine Internalisierung auslösen könnte. Je nach Ergebnis empfehlen sie sich perspektivisch zur Anwendung.

4.2 Praxis-Berechnung Fall 1: Lückenschluss im Frankfurter U-Bahn-Netz

Mit der Eröffnung der ersten U-Bahn-Linie in Frankfurt 1968 (Nordweststadt – Hauptwache) wurde das Frankfurter U-Bahn-Netz kontinuierlich ausgebaut und erweitert. Seit fast 25 Jahren fehlt zwischen den Endstationen der U4 an der Bockenheimer Warte und der der U1/U9 in Ginnheim eine etwa 2 km lange Verbindung. Mittlerweile befindet sich die Planung für diesen Lückenschluss in einem fortgeschrittenen Stadium. Entscheidend für das Linienbestimmungsverfahren ist die Verlagerung des Frankfurter Hochschullebens durch den Umzug der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität vom Campus Bockenheim zum IG Farben-Hochhaus im Westend.

Eine von den drei verbliebenen Varianten (Variante 3i, siehe Abbildung 8 in Gelb) soll nun in einem weiten Bogen in unterirdischer Führung nach Osten die (fehlende) direkte Verbindung zwischen Bockenheimer Warte und Ginnheim verlassen und mit der Station „Campus Westend“ eine umsteigefreie Verbindung zum Frankfurter Hauptbahnhof herstellen. Die Varianten 1a und 1d (pink in Abbildung 8) verlaufen in direkter Verbindung, teilweise in oberirdischer Führung zwischen den beiden Endpunkten. Es werden drei zusätzliche U-Bahn-Stationen eingerichtet.



Abbildung 8: Variantenübersicht in der tiefergehenden Untersuchung der Machbarkeitsstudie (Quelle: Schüller-Plan)

Die drei Varianten wurden nach der für Vorhaben im öffentlichen Verkehr vorgesehenen standardisierten Bewertung beurteilt und einer Nutzwertanalyse unterzogen. Nach den Gewichtungen der Nutzwertanalyse schneidet die Variante 3i am besten ab; sie wird in der Machbarkeitsuntersuchung als die Vorzugsvariante präsentiert. Das Ergebnis überrascht insofern, weil es sich bei der Variante 3i um die längste und damit auch die teuerste der drei verbliebenen Varianten handelt. Dem Ergebnis der Nutzwertanalyse liegt eine Gewichtung von Oberkriterien zu Grunde, bei der umweltbezogene Aspekte mit 28,3 % einfließen. Innerhalb dieses Oberkriteriums schlagen sich die Auswirkungen auf die THG-Bilanz mit 6,5 % nieder. Andere Oberkriterien sind u. a. der Beitrag zur Mobilitätswende, Baukosten und baubedingte Eingriffe.

Bei den Auswirkungen auf die Treibhausgasbilanz wurden die baubedingten CO₂-Äquivalente (in Tonnen) für jede Variante in der Machbarkeitsstudie dargestellt. Werden die baubedingten CO₂-Emissionen monetarisiert, also die CO₂-Emissionen mit dem CO₂-Preis von gegenwärtig 300 €/t CO_{2e} multipliziert, so ergeben sich baubedingte gesamtgesellschaftliche Kosten zwischen 7,8 Mio. € und 13,6 Mio. € (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Vergleich der CO₂-Emissionen und Schadenskosten der drei Varianten

Variante	CO ₂ -Emissionen	Schadenskosten
1a	39 701 t CO _{2e}	11,9 Mio. €
1i	25 922 t CO _{2e}	7,8 Mio. €
3i	45 239 t CO _{2e}	13,6 Mio. €

Für das Unterkriterium Treibhausgasbilanz schneidet die Variante 1i am besten ab. Allerdings kann sich dieser Vorteil aus Sicht des Klimaschutzes in der Gesamtbeurteilung der drei Varianten gemäß der vorgegebenen Gewichtung der Nutzwertanalyse nicht durchsetzen.

Bei den Schadenskosten betragen die Differenzen der Vorzugsvariante 3i zu den beiden aus Klimaschuttsicht vorteilhafteren Varianten 1,7 Mio. € zu 1a und 5,8 Mio. € zu 1i. Im Verhältnis zu den prognostizierten Baukosten von rund 300 Mio. € für die Varianten 1a und 1i und rund 400 Mio. € für die Variante 3i wird deutlich, dass monetarisierte klimabedingten Umweltkosten das Gesamtergebnis kaum beeinflussen.

4.3 Praxis-Berechnung Fall 2: Infrastruktur (Brücke)

Im Bereich Infrastruktur wurde hier das Beispiel einer (hypothetischen) Fahrradbrücke ausgewählt. Daten für den Aufbau der Berechnung wurden aus der Literatur (Arbeitshilfe zur Berücksichtigung eines CO₂-Schattenpreises bei der Planung wasserbaulicher Anlagen, Holzbaustudie der TU-Berlin (Dzhurko et al. 2024)) und aus verfügbaren Praxisinformationen (siehe Beispiel aus Hessen: Radverkehrsbrücke über die Eder | Plan F – Impulse für die kommunale Fahrradmobilität) recherchiert.

Der Variantenvergleich ist in Tabelle 7 dargestellt und berücksichtigt eine Holzbaubrücke im Vergleich zu einer Stahlbetonbauweise. Die Recherche ergab, dass die Holzbaubrücke bereits in den Investitionskosten um 27 % günstiger ist. Die Nutzungsdauer wird entsprechend der zitierten Arbeitshilfe bei Brücken auf 80 Jahre angesetzt. Die Einbeziehung eines CO₂-Preises von 300 €/t CO_{2e} (statisch) für die durch den Bau der Brücke entstandenen CO_{2e}-Emissionen führt dazu, dass sich das Delta zwischen der klimaschädlicheren Variante (Stahlbetonbrücke) und der Holz Ausführung auf 71 % erhöht.

Tabelle 7: Variantenvergleich Radbrücke mit 80 m Länge

	Holzbrücke	Stahlbetonbrücke
Investitionskosten	1 200 000 €	1 650 000 €
Durch den Bau der Brücke verursachten Emissionen	557 t CO _{2e}	928 t CO _{2e}
Schadenskosten verursacht durch die CO _{2e} -Emissionen des Brückenbaus	167 100 €	278 400 €
Gesamtkosten	1 367 100 €	1 928 400 €

4.4 Praxis-Berechnung Fall 3: Gebäude

Bei der Praxisbetrachtung im Gebäudebereich wurde ein Variantenvergleich konstruiert, der die umfangreiche Sanierung einem Abbruch inkl. Ersatzneubau gegenüberstellt. Es handelt sich um ein mittelgroßes einfaches Büro- bzw. Verwaltungsgebäude mit 1 000 m² Bruttogrundfläche. Zur Berechnung der Kosten für einen Neubau und für die Bestandssanierung wurden folgende Quellen genutzt und es wurde vereinfacht angenommen, dass beim Nichtwohngebäude ähnliche Kosten pro Quadratmeter wie beim Wohngebäude (obere Bandbreite) entstehen:

- Bauforschungsbericht Nr. 82: Wohnungsbau – Die Zukunft des Bestandes (Walberg et al. 2022)
- Bauforschungsbericht Nr. 88: Wohnungsbau 2024 in Deutschland: Kosten – Bedarf – Standards (Gniechwitz et al. 2024)
- Technikatalog der Wärmeplanung des Bundesministerium für Wirtschaft und Energie für die Ermittlung der Kosten für eine dezentrale Wärmepumpe (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2024)
- Agora Industrie, ifeu, RISE und Ramboll (2024): Reduktion und Regulierung von Embodied-Carbon-Emissionen im deutschen Gebäudesektor: Schaffung von Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe zur Ermittlung der sog. grauen Emissionen im Gebäudebereich (Agora et al. 2024)
- Projektionsbericht des Bundes 2024 (zur Ermittlung des Emissionsfaktors Strom bis 2045, BEHG- und ETS II-Preise) (Harthan et al. 2024)
- UBA Methodenkonvention 3.2 zur Ermittlung der CO₂-Kosten (Matthey und Bünger 2024)

Im unsanierten Bestand liegt der Endenergieverbrauch für die Wärmeversorgung bei 145 MWh/a, der Stromverbrauch liegt bei 26 MWh/a. Durch die energetische Sanierung wird der Energieverbrauch für die Raumwärme halbiert, beim Neubau wird der Energieverbrauch für die Raumwärme um 75 % reduziert. Der Stromverbrauch wird in Variante 1 und Variante 2 durch Effizienzmaßnahmen um 20 % reduziert.

Im Rahmen des Variantenvergleichs wurde eine Kostenbetrachtung über einen Zeitraum von 20 Jahren durchgeführt. Für die mittleren Preise von Erdgas und Strom in den kommenden 20 Jahren werden 30 ct/kWh Strom und 10 ct/kWh Gas angenommen.

Die durch den laufenden Energieverbrauch verursachten THG-Kosten werden unter Annahme eines pro Jahr um 2 % steigenden CO₂-Preises über 20 Jahre aufsummiert. Bei einem Startwert von 300 €/t CO₂e im Jahr 2025 ergibt sich für 20 Jahre ein mittlerer Schattenpreis von 364 €/t CO₂e.

Die THG-Kosten, die durch sogenannte graue Emissionen entstehen – also jene Emissionen, die bei der Herstellung von Baustoffen oder bei der Durchführung von Bau- und Sanierungsmaßnahmen anfallen – werden einmalig im Entstehungsjahr bilanziert. Nicht einbezogen wurden in der Neubauvariante jedoch die THG-Emissionen und Kosten aus dem Abbruch des Bestandsgebäudes, da hierfür keine belastbaren Daten vorlagen.

Das Ergebnis des Gesamtkostenvergleichs zeigt, dass das sanierte Gebäude im Vergleich zum Neubau deutlich günstiger ist (vgl. Tabelle 9). Der Einfluss der Schadenskosten für die grauen Emissionen ist begrenzt. Vergleicht man die Gesamtkosten, die bei einem Weiterbetrieb des Gebäudes ohne energetische Sanierung entstehen würden mit jenen des energetisch sanierten Gebäudes, erhält man beim sanierten Gebäude einen Wert von 1,36 Mio. € im Vergleich zum energetisch nicht ertüchtigten Bestand von 1,38 Mio. €. Die Schadenkosten werden in diesem Fall entscheidungsrelevant und führen dazu, dass die energetische Sanierung zur günstigsten Variante wird. Wertsteigerungen durch die Sanierung bzw. durch den Neubau sind nicht eingerechnet.

Tabelle 8: Kostenvergleich über 20 Jahre, Variante 1 ohne energetische Sanierung, Variante 2 mit Sanierung und Variante 3 mit Ersatzneubau (eigene Berechnung/Darstellung ifeu 2025)

	Variante 1: ohne energetische Sanierung	Variante 2: energetische Sanierung	Variante 3: Neubau
Grunddaten			
Endenergieverbrauch Wärme	145 MWh/a	72,5 MWh/a	38,9 MWh/a
Endenergieverbrauch Strom	26 MWh/a	20,8 MWh/a	20,8 MWh/a
Heizungstyp	Erdgaskessel	Luft-Wasser-Wärmepumpe	Luft-Wasser-Wärmepumpe
Emissionsfaktor Hauptenergieträger (Erdgas / Strom)	247 g/kWh konstant	Fallend von 328 (2025) auf 25 g/kWh (2045) Mittelwert 60 g/kWh	
Nutzungsdauer	20 Jahre		
Vollkosten Sanierung / Neubau	500 €/m²	1 000 €/m²	3168 €/m²
...davon energiebedingte Mehrkosten	-	500 €/m²	-
Mittlerer Strompreis über 20 Jahre	0,30 €/kWh		
Mittlerer Erdgaspreis über 20 Jahre	0,10 €/kWh		
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe		3,4	
Mittlerer Schattenpreis über 20 Jahre	364 €/t CO₂e		
THG-Emissionen Scope 1, 2 und 3			
THG-Emissionen des Energieverbrauchs (Mittelwert über 20 Jahre)	37,4 t/a	2,8 t/a	2,2 t/a
THG-Emissionen der Instandhaltung / Sanierung / Herstellung	52 t	104 t	348 t
Gesamtkostenberechnung			
Investitionskosten (ohne energiebedingte Mehrkosten)	486 500 €	486 500 €	3 082 464 €
Energiebedingte Mehrkosten	-	486 500 €	-
Stromkosten (20 Jahre, kumuliert)	156 000 €	124 800 €	124 800 €
Wärmekosten (20 Jahre, kumuliert)	290 000 €	127 941 €	68 647 €
Wartungs- und Instandhaltungskosten (20 Jahre, kumuliert)	159 099 €	79 550 €	39 775 €
CO2e-Kosten aus lfd. Energieverbrauch	272 434 €	18 423 €	14 101 €
CO2e-Kosten durch graue Emissionen	15 658 €	31 315 €	104 383 €
Gesamtkosten (Investition, Betrieb, Emissionen)	1 379 691 €	1 355 029 €	3.434 170 €

4.5 Praxis-Berechnung Fall 4: Beschaffung (IT)

Notebooks und Monitore sind ein zentrales Beschaffungsgut in der öffentlichen Verwaltung. Wie in Abbildung 9 dargestellt, nehmen Endgeräte mit 30 % den größten Anteil der Emissionen der Unternehmens-IT ein (Becker et al. 2022). In der Abbildung sind die Emissionen aus der Stromerzeugung für den Betrieb der Unternehmens IT blau dargestellt (Scope 2). Die Emissionen für die Herstellung der genutzten Geräte sind grün dargestellt (Scope 3).

Eine Studie des Öko-Instituts stellt außerdem dar, dass Laptops, nach Desktop-PCs mit Monitor, das zweitgrößte Treibhauspotenzial unter Digitalprodukten aufweisen, die für Büros Relevanz haben und die Lebensdauer von Laptops, sowie Monitoren etwa fünf Jahre beträgt (Gröger 2020). Ihre Beschaffung beeinflusst den ökologischen Fußabdruck der Behörden, denn durch eine Wahl energieeffizienter Geräte können signifikante Einsparungen erzielt werden.



Abbildung 9: Emissionen in der Unternehmens-IT (nach Becker et al. 2022)

Monitore im Vergleich

Im ersten Beispiel zur IT-Beschaffung werden Gesamtkosten mit und ohne Internalisierung der externen Umweltkosten von zwei alternativen Monitoren verglichen. Für den verbrauchsärmeren Monitor A (Philips, Model 27B2G5601) wird mit einem Einkaufspreis von 326 €, für Monitor B (HP Serie 7 Pro FHD) mit einem Einkaufspreis von 282 € gerechnet. Die Preise entsprechen tatsächlichen Produktangeboten des IT-Anbieters Bechtle AG (Stand April 2025). Der Preisunterschied beträgt somit 44 €. Für die Daten wurden reale, marktübliche Produkte ausgewählt. Unter Annahme eines Strompreises von 0,3 €/kWh (Stand April 2025) und einer jährlichen Nutzung von 1.600 Stunden summieren sich diese Verbrauchskosten in der Nutzungsdauer von fünf Jahren für Monitor A auf 31,2 €, wobei sich die Gesamtkosten damit auf 357 € erhöhen, und für Monitor B auf 43,2 €, was zu einer Erhöhung der Gesamt-

kosten auf 325 € führt. Die Preisdifferenz der Monitore kann unter Berücksichtigung der Betriebskosten also trotz des höheren Verbrauchs von Monitor A nicht ausgeglichen werden. Nach Internalisierung der Scope 2 Umweltkosten mit einem CO₂-Preis von 300 €/t CO_{2e} verändert sich das Ergebnis einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht (siehe Tabelle 9).

Nur für einzelne Monitore sind Angaben zu den Herstellungsemissionen (Scope 3) öffentlich zugänglich. Werden diese Emissionen im Variantenvergleich ebenfalls berücksichtigt, verändert sich das Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in diesem Beispiel ebenfalls nicht. Der weniger energieeffiziente Monitor B schneidet also trotz Internalisierung der Scope 2 und 3 Umweltkosten besser ab, da die emissionsbedingten Mehrkosten die Preisdifferenz in der Anschaffung nicht ausgleichen.

Tabelle 9: Kostenvergleich der beiden Monitore (Scope 2 und 3) (eigene Berechnungen)

	Monitor A (Philips, Model 27B2G5601) <i>verbrauchsärmer</i>	Monitor B (HP Serie 7 Pro FHD)
Grunddaten		
Leistung	13 W	18 W
Jährlicher Verbrauch	20,8 kWh	28,8 kWh
Lebensdauer	5 Jahre	
Emissionsfaktor für den deutschen Strom- mix (Stand 2023)*	380 g/kWh	
Strompreis	0,3 €/kWh	
THG-Emissionen Scope 2 und 3		
THG-Emissionen Scope 2	39,5 kg CO _{2e}	54,7 kg CO _{2e}
THG-Emissionen Scope 3	374 kg CO _{2e}	205 kg CO _{2e}
Gesamtkosten-Berechnung (Internalisierung externer Umweltkosten mit Schattenpreis 300 €/t CO _{2e}) über die Lebensdauer von 5 Jahren		
Listenpreis (brutto)	326 €	282 €
Stromkosten	31,2 €	43,2 €
Externe Umweltkosten Scope 2	11,9 €	16,4 €
Externe Umweltkosten Scope 3	112,2 €	61,5 €
Gesamtkosten	481 €	403 €
*UBA, 2023 Der Strompreis wird auf Grund der kurzen Betrachtungsdauer anders als im Gebäudebeispiel statisch betrachtet.		

Für die Berechnung der Lebenszykluskosten verschiedener Beschaffungsprodukte stellt das UBA ein Berechnungstool¹ zum Download bereit, welches als Grundlage für die Schattenpreisberechnung für beispielsweise Computer, Rechenzentren, Monitore sowie Küchen- und Gartengeräte verwendet werden kann.

Notebooks im Vergleich

Im zweiten Praxisbeispiel zur IT-Beschaffung werden die Gesamtkosten mit und ohne Schattenpreis von zwei verschiedenen Notebooks verglichen. Auch hier wurde mit einer Lebensdauer von 5 Jahren, einem Strompreis von 0,3 €/kWh und einer jährlichen Nutzung von 1.600

¹ <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/berechnungswerkzeug-fuer-lebenszykluskosten>

Stunden gerechnet. Für das verbrauchsärmere Notebook A (HP ProBook 465) wird mit einem Einkaufspreis von 806 € und für Notebook B (HP Pro x360 435) mit einem Preis von 790 € gerechnet, entsprechend einem relativ geringen Preisunterschied von etwa 16 €. Die Preise entsprechen auch hier tatsächlichen Produktangeboten des IT-Anbieters bechtle (Stand April 2025). Obwohl Notebook B bei reiner Betrachtung des Listenpreises günstiger ist, führt bereits die Einbeziehung der Betriebskosten dazu, dass die verbrauchsärmere Variante günstiger wird. Auch unter Einbezug der Scope 2 Umweltkosten mit einem CO₂-Preis von 300 €/t CO_{2e} setzt sich das energieeffizientere Notebook A durch (siehe Tabelle 10).

Tabelle 10: Kostenvergleich der beiden Notebooks (Scope 2 und 3) (eigene Berechnungen)

	Notebook A (HP Probook) <i>verbrauchsärmer</i>	Notebook B (HP Pro x360)
Grunddaten		
Leistung	43 W	56 W
Jährlicher Verbrauch	68,8 kWh/a	89,6 kWh
Lebensdauer	5 Jahre	
Emissionsfaktor für den deutschen Strom-mix (Stand 2023)*	380 g/kWh	
Strompreis	0,3 €/kWh	
THG-Emissionen Scope 2 und 3		
THG-Emissionen Scope 2	131 kg CO _{2e}	170 kg CO _{2e}
THG-Emissionen Scope 3	240 kg CO _{2e}	195 kg CO _{2e}
Gesamtkosten-Berechnung (Internalisierung externer Umweltkosten mit Schattenpreis 300 €/t CO _{2e}) über die Lebensdauer von 5 Jahre		
Listenpreis (brutto)	806 €	790 €
Stromkosten	103,2 €	134,4 €
Externe Umweltkosten Scope 2	39,2 €	51,1 €
Externe Umweltkosten Scope 3	72 €	58,5 €
Gesamtkosten	1.020 €	1.034 €

Die Gesamtkostenberechnung zeigt, dass bereits die reine Lebenszykluskostenbetrachtung (Investitionskosten plus betriebsbedingte Kosten) dazu führt, dass das verbrauchsärmere Produkt kostengünstiger wird. Nach der Internalisierung der Scope 2 und Scope 3 Umweltkosten bleibt das Notebook A die präferierte Wahl.

4.6 Praxis-Berechnung Fall 5: Beschaffung (Fahrzeuge)

Die folgende Praxisberechnung widmet sich den Gesamtkosten verschiedener Mittelklasse-Pkw unter Berücksichtigung eines CO₂-Preises. Der Antriebsart von Pkw kommt eine zentrale Rolle bei der Verkehrswende zu. Für den nachfolgenden Vergleich (Tabelle 11) wurden daher einem Verbrennerfahrzeug (Opel Astra 1.5 Diesel Automatik Edition) zwei unterschiedliche Fahrzeugvarianten (VW ID.3 Pro GOAL und BYD Dolphin Design) mit E-Antrieb gegenübergestellt. Für diesen Vergleich wurde eine Beispielrechnung des Online-Tools „Umweltverträgliche Mobilität für die öffentliche Hand“ (Stand: 23.10.2024) verwendet, welches vom ifeu Institut entwickelt wurde.

Die Eingabedaten und Standardannahmen des Tools wie z.B. Energiepreise verschiedener Energieträger (Stand 2024) und Herstellungsemissionen wurden mit folgenden Anpassungen übernommen:

- Als Fahrleistung wurden für alle drei Fahrzeuge 12 400 km pro Jahr gewählt (Bundesministerium für Digitales und Verkehr 2024), was der durchschnittlichen Jahresfahrleistung eines Pkw in Deutschland entspricht.
- Der Bewertungszeitraum eines Pkw wurde nach Anschaffung im Jahr 2025 mit sieben Jahren veranschlagt.

Die Wertminderung wird außerdem auf Basis der Restwertberechnung BEUC berechnet (BEUC 2016). Als Schattenpreis wurden entsprechend der UBA-Empfehlung 300 € pro Tonne CO_{2e} angesetzt (Matthey und Bünger 2024). Bei Elektroautos wird davon ausgegangen, dass 50 % der Ladevorgänge an öffentlichen (externen) Ladestationen stattfinden.

Tabelle 11 zeigt die Scope 1 CO_{2e}-Emissionen ausschließlich für den Verbrenner (Opel Astra), die im Betrieb verursacht werden, während Elektroautos (VW ID.3 und BYD Dolphin) im Betrieb nur indirekten Emissionen (Scope 2) aus der Stromversorgung aufweisen. Bei den Elektroautos fließen die Emissionen der Batterieherstellung (Scope 3) in die Gesamtbilanz ein. Die Herstellungsemissionen für den Fahrzeugrumpf und für den Antrieb werden vernachlässigt, da diese laut Ökobilanzen keine signifikanten Unterschiede zwischen Verbrenner und E-Auto aufweisen (vgl. Helms et al. 2019). Die Emissionen aus den jeweiligen Vorketten werden als Scope 2-Emissionen für alle Fahrzeugtypen berücksichtigt.

Tabelle 11: Grunddaten für den Kostenvergleich der drei Fahrzeugalternativen (Quelle: Herstellerangaben)

	Verbrenner A (Opel Astra) Diesel	Elektroauto B (VW ID.3)	Elektroauto C (BYD Dolphin)
Grunddaten			
Jahresfahrleistung	12 400 km/Jahr		
Bewertungszeitraum	7 Jahre		
Verbrauch	5 l/100km	15,5 kWh/ 100km	15,9 kWh/100km
Energiekosten	1,672 €/l	50,2 ct/kWh	50,2 ct/kWh
CO ₂ Emissionen (Betrieb)	132 g CO ₂ /km	-	-
THG-Emissionen (Batterieherstellung)	-	26,25 g CO _{2e} /km	25,57 g CO _{2e} /km
THG-Emissionen Scope 1-3			
THG-Emissionen Scope 1 (Betrieb)*	11 458 kg CO _{2e}	0 kg CO _{2e}	0 kg CO _{2e}
THG-Emissionen Scope 2 (Vorkette)	~3 612 kg CO _{2e}	3 440 kg CO _{2e}	3 520 kg CO _{2e}
THG-Emissionen Scope 3 (Batterieherstellung)	0 kg CO _{2e}	2 280 kg CO _{2e}	2 220 kg CO _{2e}
*NOx (50,8mg/km mit 0,02 €/g) und PM2.5 Partikel (0,35mg/km mit 0,15 €/g) ebenfalls Teil der Scope 1 THG			

In der Vergleichsrechnung nachfolgend in Tabelle 12 werden die direkten Energieverbrauchs- und die externen Umweltkosten einbezogen. Nicht berücksichtigt werden die

Wartungs- und Versicherungskosten, da sie über den Bewertungszeitraum nur grob prognostiziert und von Beschaffungsstellen nur schwer abgeschätzt werden können. In der Studie zum Lebenszykluskostenrechner wird dazu folgendes erwähnt:

Beim Vergleich von batterieelektrischen Pkw (BEV) mit Verbrennern wird oft angeführt, dass BEV geringere Wartungskosten aufweisen (R + V Versicherung 2024). Dies wird auf den einfacheren Aufbau (weniger Einzelteile als im Verbrennungsmotor) und weniger Verschleißteile zurückgeführt. Auf der anderen Seite hat eine Studie deutscher Versicherungen ergeben, dass BEV in der Reparatur teurer sind als Verbrenner (GDV 2023). Dies liegt an teureren Ersatzteilen und den Investitionskosten der Werkstätten zur Reparatur der E-Pkw, die auf die Kunden umgelegt werden. Geringere Wartungs- und Inspektionskosten von BEV stehen daher höheren Reparaturkosten gegenüber. Aufgrund dieser Unsicherheiten wird auf die Berücksichtigung der Kosten im LZK-Rechner verzichtet (Lambrecht et al. 2024).

Allerdings können sie in dem Tool optional befüllt und bedient werden.

Tabelle 12: Kostenvergleich der drei Fahrzeugalternativen (eigene Berechnungen)

Gesamtkosten-Berechnung (Internalisierung externer Umweltkosten mit Schattenpreis 300 €/t CO ₂ e) über die Lebensdauer von 7 Jahren			
	Verbrenner A (Opel Astra) Diesel	Elektroauto B (VW ID.3)	Elektroauto C (BYD Dolphin)
Listenpreis (brutto)	33 460,00 €	39 425,00 €	34 990,00 €
Wertminderung	24 164,20 €	28 472,00 €	25 269,10 €
Energiekosten	7 256,50 €	6 753,90 €	6 928,20 €
Kfz-Steuer	1 533,00 €	0 €	0 €
Gesamtkosten (excl. Umweltkosten)	32 953,70 €	35 255,90 €	32 197,30 €
Externe Umweltkosten Scope 1 (Betrieb)	3 530,00 €	0 €	0 €
Externe Umweltkosten Scope 2 (Vorkette)	1 082,90 €	1 030,80 €	1 057,40 €
Externe Umweltkosten Herstellung Scope 3 (Herstellung Batterie)	0 €	683,60 €	665,90 €
Gesamtkosten (incl. Umweltkosten)	37 566,60 €	36 940,30 €	33 920,70 €

Wie Tabelle 12 zeigt, liegt die Preisdifferenz beim Einkaufspreis zwischen dem Verbrenner und den beiden Elektroauto-Varianten bei 1530 € bzw. 5965 €. Bei der alleinigen Betrachtung des Einkaufspreises schneidet der Verbrenner demnach im Vergleich besser ab als die beiden Elektroautos. Unter Berücksichtigung der direkten Energieverbrauchskosten, der Wertminderung und der Kfz-Steuern über die Gesamtlebensdauer ist das Elektroauto C mit einer Differenz von 756 € knapp günstiger als das Verbrennerfahrzeug, während das Elektroauto B 2270€ über den Kosten des Verbrennerfahrzeuges liegt.

Werden zusätzlich die externen Umweltkosten einbezogen, so zeigt sich, dass die Gesamtkosten der beiden Elektrofahrzeuge mit einer Preisdifferenz von bis zu 3.646 € (Elektroauto C) unter den Gesamtkosten des Verbrenners liegen. Im Falle des Elektro-Auto B ist der Preisunterschied zum Verbrenner mit 627 € eher gering.

Das Ergebnis zeigt, dass ein Schattenpreis bei relativ geringen Preisunterschieden und unter Einbezug von Scope 3 Emissionen zu einem eindeutigen Gesamtkostenvorteil der Elektroautos führen kann. Das Elektroauto C setzt sich also sowohl ohne Internalisierung als auch unter Berücksichtigung der externen Umweltkosten mit einem Schattenpreis von 300 €/t CO_{2e} gegen das Verbrenner-Auto A durch.

Der Vergleich beider Elektroautos (B und C) verdeutlicht darüber hinaus, dass die Schadenskosten beim Vergleich von Elektroautos untereinander nicht so stark ins Gewicht fallen wie im Vergleich von Verbrenner und Elektroauto.

Exkurs: Anwohnerparken

Das folgende Beispiel illustriert, wie eine Internalisierung durch Gebühren für das Anwohnerparken realisiert werden könnte und greift somit ein Beispiel auf, welches Kommunen adressiert.

Nach der Rechtsprechung haben Kommunen bei der Festsetzung von Gebühren für Anwohnerparken Gestaltungsspielräume, die über die Verwaltungskosten zur Ausstellung des Bewohnerparkausweises hinausgehen. Mit einer Spreizung der Gebühr nach den CO₂-Emissionen des jeweiligen Fahrzeugs würde eine verursachergerechte Bepreisung erfolgen und es würden Anreize gesetzt, emissionsarme Fahrzeuge zu beschaffen.

Bei einer unterstellten Jahresfahrleistung von 12.400 km und einem Emissionsfaktor von 150 gr/km emittiert ein Verbrennerfahrzeug 1.860 kg CO₂ in einem Jahr. Wenn pro Tonne CO₂ der vom UBA aktuell empfohlene CO₂-Preis von 300 €/t CO_{2e} angesetzt würde, entstünden jährliche Kosten von insgesamt 558 €. Werden die auf der Grundlage des BEHG entrichteten CO₂-Kosten beim Tanken abgezogen (Grundlage 2025: 55 €/t CO₂, Vermeidung einer Doppelbelastung), so reduzieren sich in diesem Beispiel die über das Anwohnerparken zu entrichtenden Kosten um 102 € auf 456 €/a.

In deutschen Großstädten variieren die jährlichen Gebühren für Anwohnerparkausweise aktuell zwischen 30 € und 120 €, in einzelnen Städten auch nach Größe der Fahrzeuge gespreizt bis zu 200 €/Jahr. Die hier fiktiv ermittelte Gebühr für ein Durchschnittsfahrzeug läge deutlich höher. Bei zusätzlichen Stellplatzkosten in der genannten Höhe kann von Verhaltensänderungen bei einem Teil der Fahrzeughalter ausgegangen werden. Reaktionsalternativen könnten Verzicht auf das Fahrzeug, mittelfristig der Erwerb emissionsärmerer Fahrzeuge oder die Abstellung des Fahrzeugs an Orten ohne Anwohnerparken sein.

5 Zusammenfassung, Fazit und Empfehlung für Hessen

5.1 Fazit aus den Analysen

Die Internalisierung klimabedingter externer Kosten ist notwendig, damit die tatsächlichen Umwelt- und Folgekosten von Treibhausgasemissionen nicht länger von der Allgemeinheit oder künftigen Generationen getragen werden, sondern in heutigen Investitions- und Konsumentscheidungen wirksam berücksichtigt werden. Diese Internalisierung kann mit regulatorischen Instrumenten (z. B. Gesetze, technische Anforderungen), informatorischen Instrumenten (z. B. CO₂-Kennzeichnungen) oder marktbasierten Instrumenten (Fokus der Studie) erfolgen. Es können unterschiedliche externe Kosten, die mit THG-Emissionen in Verbindung stehen, internalisiert werden (vgl. Kapitel 2.1):

- Klimafolgeschadenskosten, die beispielsweise auch Anpassungskosten beinhalten oder
- CO₂-Vermeidungskosten.

Diese werden mit unterschiedlichen Instrumenten einerseits auf nationaler oder supranationaler Ebene internalisiert (vgl. Kapitel 2.2):

- Im EU-ETS 1 wie auch im BEHG (in Zukunft EU-ETS 2 ab 2027) werden indirekt Vermeidungskosten internalisiert, da sich die CO₂-Preise an THG-Minderungszielen und somit Kosten der Emissionsvermeidung orientieren.
- Bei der CO₂-Steuer oder Abgabe werden definierte und festgelegte CO₂-Preise erhoben.

Auf regionaler und lokaler / institutioneller Ebene werden in der Regel folgende Internalisierungsinstrumente angewandt (vgl. Kapitel 2.2):

- Schattenpreis ohne direkte monetäre Wirksamkeit (fiktiver Preis) oder
- CO₂-Umlage mit direkter monetärer Wirksamkeit und der Möglichkeit, die über die CO₂-Umlage generierten Einnahmen in Klimaschutzprojekte zu investieren.

Die Analyse zeigte, dass bereits Internalisierungsinstrumente existieren, die direkt (Nationaler Emissionshandel und damit verbundene CO₂-Preise) oder indirekt (durch höhere Produkt- oder Materialkosten bei Beschaffungen oder Investitionen durch den EU-ETS 1) dazu führen, dass externalisierte Kosten in Prozessen des Landes Hessen berücksichtigt werden. Die dadurch verursachte Verteuerung dieser Produkte und Dienstleistungen schlägt sich – betrachtet man die Aktivitäten der Landesverwaltung – entweder in höheren Anschaffungs-

oder Investitionskosten oder in höheren verbrauchsgebundenen Kosten (fossiler Energieverbrauch fürs Heizen oder Tanken) nieder. Die einzelnen Sektoren sind durch die bereits bestehenden Instrumente bereits grundsätzlich adressiert. Die in den Instrumenten bestehenden Preisanzeige entsprechen jedoch aktuell nicht den tatsächlichen gesellschaftlichen Schadenskosten.

Zur Vertiefung der Erkenntnisse aus bereits bestehenden Anwendungen von marktbasierten Internalisierungen wurden mit verschiedenen Institutionen Interviews geführt, die bereits einzelne Erfahrungen mit diesen Instrumenten gemacht haben. Diese in Kapitel 3 dargestellten Beispiele und Interviews brachten folgende Erkenntnisse:

- Bei den betrachteten Anwendungsfeldern konnten Daten zu den THG-Emissionen zum Teil gut recherchiert werden. Teilweise stehen auch Tools zur Verfügung, die die Berechnungen vereinfachen. Jedoch sind die Anwendungsfelder zur Internalisierung vielfältig. Aus den Interviews wurde daher deutlich, dass die erforderlichen Daten zu den CO₂-Emissionen noch nicht oder allenfalls teilweise vorliegen. Die Expertinnen und Experten erwähnten, dass bei einzelnen Produktkategorien keine Daten zu THG-Emissionen verfügbar sind.

Zur weiteren Illustration der Anwendung eines Schattenpreises wurde für einzelne Fallbeispiele aus dem Spektrum der Landesverwaltung eine Internalisierung berechnet. Diese sind in Kapitel 4 dargestellt und brachten die folgenden wesentlichen Ergebnisse:

- Die Auswirkungen der Internalisierung (angewandt wurde der UBA-Schadenskostensatz von 300 €/t CO_{2e}) sind von Fallbeispiel zu Fallbeispiel unterschiedlich.
 - Insbesondere bei großen Investitionsvorhaben (Verkehrsinfrastruktur) wird eine Internalisierung das Ergebnis oft nicht beeinflussen. Dies liegt am Verhältnis von Investitionskosten zu den ermittelten Schadenskosten.
 - Das Gebäudebeispiel zeigt, dass die Internalisierung von Schadenkosten die Wirtschaftlichkeit der Sanierung verbessert und entscheidungsrelevant werden kann. Der Unterschied ist jedoch beim skizzierten Beispiel nur knapp und kann leicht von anderen Faktoren überlagert werden.
 - Bei den Beschaffungsgegenständen (hier Monitore und Notebooks) führt der CO₂-Preis nur zum Teil zu einer ökonomischen Verbesserung der klimafreundlichen Variante.
 - Das Beispiel zum Pkw-Vergleich zeigt, dass unter Einbeziehung eines CO₂-Preises von 300 €/t CO_{2e} in die Lebenszyklusbetrachtung das E-Fahrzeug, allerdings abhängig vom Anschaffungspreis, vorteilhafter wird.
- Werden gesamtgesellschaftliche Kosten höher eingestuft, beispielsweise indem zukünftige Generationen gleichwertig zur heutigen bewertet werden, nimmt der Einfluss der klimabedingten Kosten auf die Entscheidungsfindung von Investitions- oder Beschaffungsmaßnahmen naturgemäß zu.
- Die konkrete Ausgestaltung eines CO₂-(Schatten-)Preises stellt laut Interviews eine Herausforderung dar. Abzuwägen sind dabei einfache Umsetzung und eine hohe Akzeptanz

gegenüber einer wirksamen Steuerung. Die UBA-Methodenkonvention stellt eine wissenschaftlich fundierte, weitgehend anerkannte Grundlage zur Festlegung von CO₂-Preisen dar.

- Bagatellgrenzen können den Verwaltungsaufwand reduzieren.

5.2 Empfehlung zur weiteren Ausgestaltung einer Internalisierung in Hessen

Welche Rahmenbedingungen bestehen bereits?

Im HKlimaG wird in § 7 (Paragrafen zur Vorbildwirkung des Landes) festgelegt, dass das Land Hessen für Planungsvorgänge, Auswahlprozesse oder Investitionsentscheidungen sowie bei Beschaffungsvorgängen ein CO₂-Preis für die Vermeidung oder Verursachung von THG-Emissionen zugrunde zu legen ist. Damit ist gesetzlich festgelegt, dass das Land THG-Emissionen als Kostenfaktor berücksichtigt. In der Gesetzesbegründung wird definiert, dass der CO₂-Preis den aktuellen Kostensatz der Methodenkonvention von Umweltkosten des UBA entsprechen soll. Im Gesetzentwurf zum erstes Bürokratieabbaugesetz des Landes Hessen ist allerdings eine Streichung dieser Vorgabe vorgesehen.

Mit der Neufassung der Landeshaushaltsordnung im Jahr 2023 wurde in den § 7 Landeshaushaltsordnung (LHO) Abs. 2 die Verpflichtung aufgenommen, in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen ökologische und soziale Folgekosten zu berücksichtigen. In der Verwaltungsvereinbarung zur LHO wird ebenfalls auf die "Methodenkonvention zur Ermittlung von Umweltkosten" des UBA inklusive der zugehörigen "Kostensätze" in der jeweils aktuellen Fassung hingewiesen.

Im HKlimaG wird somit offengelassen, ob Schadens- oder Vermeidungskosten zum Einsatz kommen sollen. Offen bleibt zudem, mit welchem Instrument die Internalisierung umgesetzt werden soll. Wie im HKlimaG der CO₂-Preis für die Vermeidung zu berücksichtigen ist, wird in der Gesetzesbegründung nicht näher erläutert. In der LHO hingegen ist definiert, dass (ökologische wie soziale) Klimawandelfolgekosten in Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zu berücksichtigen sind. Hier wird somit implizit der **Schattenpreis** als Instrument in Wirtschaftlichkeitsanalysen angesprochen.

Warum ein Schattenpreis?

Auf Basis der Analyseergebnisse ist ein Schattenpreis als ergänzendes Instrument für die Landesverwaltung aus verschiedenen Gründen gegenüber einem CO₂-Preis vorzuziehen:

1. Es existiert in vielen Anwendungsbereichen bereits ein auf (inter-)nationaler Ebene etabliertes Internalisierungsinstrument (Emissionshandelssysteme). Allerdings entsprechen die darin zu Grunde gelegten Preise für CO₂ nicht den wissenschaftlich ermittelten Schadenskosten des UBA. Es besteht also bei der Internalisierung der externen Kosten eine Deckungslücke.
2. Der Schattenpreis kann genau diese Lücke schließen. Er bildet somit ein komplementäres Instrument zur Anlastung der klimabedingten externen Effekte.

3. Der Schattenpreis entfaltet seine Wirkung, wenn Entscheidungen für Technologien, Produkte etc. getroffen werden müssen.
4. Erfahrungsberichte zeigen, dass der Schattenpreis tendenziell leichter zu operationalisieren ist. Durch die rechnerische Berücksichtigung in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, wirkt dieses Internalisierungsinstrument zudem weniger „schmerzhaft“ auf betroffene Akteursgruppen, verglichen mit einem explizit erhobenen CO₂-Preis.
5. Ein Variantenvergleich ohne CO₂-Schattenpreis ist systematisch verzerrt, weil bei klimafreundlichen Lösungen die CO₂-Vermeidungskosten explizit eingepreist sind (z. B. durch teurere Materialien, Prozesse oder Techniken), während bei konventionellen Varianten die verursachten Klimaschäden externalisiert blieben. Erst durch die Berücksichtigung eines CO₂-Schattenpreises werden beide Optionen vergleichbar: Die tatsächlichen gesellschaftlichen Kosten werden sichtbar gemacht, was eine vollständige, faire und rationale Entscheidungsgrundlage schafft.

Wie hoch sollte der Schattenpreis angesetzt werden?

Die LHO definiert, dass sich die CO₂-Bepreisung an den Klimawandelfolgekosten orientieren soll. Als wissenschaftlich fundierte Grundlage kann die UBA-Methodenkonvention dienen, die auch einen dynamischen Preis angibt. Die Folgekosten werden bei der Variantenanalyse bzw. beim Vergleich von Produkten einbezogen.

Bei welchen Anwendungsbereichen ist der Schattenpreis sinnvoll?

Eine Internalisierung mittels Schattenpreis ist entsprechend der Analyseergebnisse in folgenden Prozessen des Landes sinnvoll:

- Bereiche, in denen hohe THG-Minderungspotenziale bestehen,
- In denen bestehende Internalisierungen (z. B. durch bestehende marktwirtschaftliche oder regulatorische Instrumente) nur schwach oder mäßig ausgeprägt sind und
- wo die Umsetzung verhältnismäßig und unbürokratisch ist (geringer Datenbereitstellungsaufwand).

Entlang der skizzierten Beispiele in Kapitel 4 sind das insbesondere die Themen Baustoffe bei Hochbau und Infrastruktur und Beschaffung von IT-Geräten. Darüber hinaus gibt es gegebenenfalls weitere Anwendungsfälle wie z. B. die Beschaffung von Nahrungsmitteln und Catering-Dienstleistungen.

Was vereinfacht die Prozesse?

Fortlaufend sollte nach der Umsetzung des Schattenpreises eine Prüfung der Wirksamkeit stattfinden. Dabei sollte auf Basis eines Austauschs mit betroffenen Akteursgruppen geprüft werden, welche Unterstützungsangebote für eine langfristige Umsetzung erarbeitet werden müssen. Für die identifizierten Handlungsfelder sind beispielsweise auf einer konzeptionellen Ebene die erforderlichen Datengrundlagen (insbesondere die Ermittlung der CO₂-Emissionen nach Anwendungsfall) und einfach zu handhabende Rechentools zu erstellen.

Ein kontinuierlicher Austausch mit Landesverwaltungen und Aufgabenträgern in anderen Bundesländern wird empfohlen.

6 Annex Interviewleitfaden

	#	Frage
Topic A: Person	1	Datum
	2	Name
	3	Organisation
	4	Rolle
Topic B: Instrument	1	Welche Internalisierungsmethode wird oder wurde angewandt?
	2	Wie ist die Funktionsweise genau?
	3	Was ist das Ziel des Instruments?
	4	Wer ist verantwortlich für die Umsetzung?
	5	Welche Bereiche/Sektoren umfasst das Instrument? Welche schließt es evtl. aus? Warum?
	6	Bezieht sich das Instrument nur auf CO ₂ ? Oder auch andere THG? Warum?
	7	Gibt es eine Preisspanne? Wo liegt diese? Wie kommt sie zustande?
	8	Wie stark ist die Lenkungswirkung? Scheint Instrument generell wirkungsvoll?
	9	In welchen Bereichen kann das Instrument die größte Wirkung entfalten? Warum?
	10	Wie kompatibel ist das Instrument zu verschiedenen bereits laufenden Instrumenten (z.B. CBAM)?
Topic C: Implementierung	1	Seit wann ist das Instrument im Einsatz?
	2	Was war der ursprüngliche Anstoß/Auslöser? Wie lief der Implementierungsprozess ab?
	3	Wer war die implementierende Organisation? Waren noch weitere relevante Akteurinnen und Akteure beteiligt?
	4	Was waren Hemmnisse der Einführung? Wie wurden sie überwunden?
	5	Was waren Treiber? Wie wurden sie aktiviert?
	6	Welche Schulungsmaßnahmen waren notwendig zur Implementierung?

Topic D: Erfahrung	1	Welche Vorteile bringt das Instrument mit sich?
	2	Gab es unvorhersehbare Nebeneffekte (positiv/negativ)?
	3	Welche Erkenntnisse konnten aus der Umsetzungsphase gewonnen werden?
	4	Inwiefern kann die Implementierung des Instruments in anderen Bundesländern repliziert werden? Wie sehen Sie die Übertragbarkeit in andere Anwendungsbereiche
Topic E: Akteure	1	Welche Akteursgruppen betrifft das Instrument?
	2	Welche Akteursgruppen profitieren wie vom Instrument? / ...befürworten das Instrument?
	3	Welche Akteursgruppen erleben Schwierigkeiten durch das Instrument und sind ihm gegenüber kritisch?
Topic F: Folgen	1	Was sind mögliche Folgen des Instruments aus Sicht des Staates?
	2	Was sind mögliche Folgen des Instruments aus Sicht des Steuerzahlers?
	3	Was sind mögliche Folgen des Instruments aus Sicht der Auftragnehmer?
	4	Was sind mögliche Folgen des Instruments aus Sicht der zukünftigen Generationen?
	5	Was sind mögliche Folgen des Instruments aus Sicht anderer Länder?
	6	Was sind mögliche Folgen des Instruments aus Sicht der sozialen Gerechtigkeit der Bepreisungsansätze?

Literaturverzeichnis

Abnett, Kate (2025): EU Parliament backs exempting 90% of companies from carbon border levy. Hg. v. Reuters. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/eu-parliament-backs-exempting-90-companies-carbon-border-levy-2025-05-22/>, zuletzt aktualisiert am 22.05.2025, zuletzt geprüft am 25.07.2025.

agora Industrie, ifeu, RISE und Ramboll (2024): Reduktion und Regulierung von Embodied-Carbon-Emissionen im deutschen Gebäudesektor. Hg. v. Agora Industrie. Online verfügbar unter https://www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-10_IND_Embodied_Carbon/A-IN_341_Embodied_Carbon_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2025.

Bayer, P.; Schaffer, L. M. (2024): Distributional consequences shape public support for the EU carbon border adjustment mechanism: evidence from four European countries. In: Environ. Res. Lett. 19 (8), S. 84040. DOI: 10.1088/1748-9326/ad5743.

Becker, Gerrit; Bennici, Luca; Bhargava, Anamika; Del Miglio, Andrea; Lewis, Jeffrey; Sachdeva, Pankaj (2022): The green IT revolution: A blueprint for CIOs to combat climate change. In: McKinsey & Company, 15.09.2022. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/the-green-it-revolution-a-blueprint-for-cios-to-combat-climate-change>, zuletzt geprüft am 27.03.2025.

BEUC (2016): Low carbon cars in the 2020s: Consumer impacts and EU policy implications. Online verfügbar unter https://www.beuc.eu/sites/default/files/publications/beuc-x-2016-121_low_carbon_cars_in_the_2020s-report.pdf, zuletzt geprüft am 29.07.2025.

Bundesamt für Umwelt (2023): CO₂-Abgabe. Hg. v. Schweizerische Eidgenossenschaft. Online verfügbar unter <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/verminderungsmassnahmen/co2-abgabe.html>.

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2024): Verkehr in Zahlen 2024/2025. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR) und Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung Berlin e. V. (DIW Berlin). Online verfügbar unter https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehr-in-zahlen24-25-pdf.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 29.07.2025.

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2024): „Leitfaden kompakt“: Einordnung und Zusammenfassung des Leitfadens Wärmeplanung. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Online verfügbar unter https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/leitfaden-waermeplanung-kompakt.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 25.06.2025.

Bundesumweltministerium (2010): Vermeidung externer Kosten durch Erneuerbare Energien - Methodischer Ansatz und Schätzung für 2009 (MEEEEK).

Bundeswirtschaftsministerium (2020): Allgemeine Verwaltungsvorschrift der Bundesregierung. Online verfügbar unter https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/A/allgemeine-verwaltungsvorschrift-zur-beschaffung-klimafreundlicher-leistungen-avv-klima.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 24.07.2025.

Bünge, Björn; Matthey, Astrid (2018): Methodenkonvention 3.0 zur Ermittlung von Umweltkosten. Methodische Grundlagen. Dessau-Roßlau: German Environment Agency (UBA).

Dechezleprêtre, Antoine; Haramboure, Antton; Kögel, Clara; Lalanne, Guy; Yamano, Norihiko (2025): OECD Science, Technology and Industry Working Papers. Hg. v. OECD. Online verfügbar unter https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/01/carbon-border-adjustments_b9049067/e8c3d060-en.pdf, zuletzt geprüft am 25.07.2025.

DEHSt (2024): Steigerung der Klimaschutzambition. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.dehst.de/DE/Themen/EU-ETS-1/EU-ETS-1-Informationen/Reform-Perspektiven/Steigerung-Klimaschutzambition/steigerung-klimaschutzambition_node.html, zuletzt aktualisiert am 24.07.2025, zuletzt geprüft am 24.07.2025.

DEHSt (2025a): EU-Emissionshandel verstehen. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.dehst.de/DE/Themen/EU-ETS-1/EU-ETS-1-Informationen/EU-ETS-1-verstehen/eu-ets-1-verstehen_artikel.html, zuletzt aktualisiert am 07.08.2025, zuletzt geprüft am 07.08.2025.

DEHSt (2025b): Factsheet: Auktionierung im EU-ETS 1. Online verfügbar unter https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/DE/publikationen/factsheets/factsheet_Auktionierung.pdf?__blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 24.07.2025.

DEHSt (2025c): Nationalen Emissionshandel verstehen. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.dehst.de/DE/Themen/nEHS/nEHS-verstehen/nehs-verstehen_node.html#doc284546bodyText3, zuletzt aktualisiert am 24.04.2025, zuletzt geprüft am 24.04.2025.

Dzhurko, Daria; Haacke, Ben; Haberbosch, Asta; Köhne, Linde; König, Nora; Lode, Frida et al. (2024): Wälder, Städte und ihr Kohlenstoffkreislauf – Quantifizierung der Auswirkungen verschiedener Arten der Baukonstruktion auf den Kohlenstoffhaushalt im Schumacher Quartier, Berlin. Online verfügbar unter <https://depositonce.tu-berlin.de/items/e733a407-3f84-4b72-8d78-34f28cbec607>.

Eiserbeck, Lukas; Lühr, Oliver; Norpoth, Robert (2024): Wirtschaftliche Aspekte der Klimafolgenanpassung in der Metropole Ruhr. Kurzstudie der Prognos AG im Auftrag des Regionalverbands Ruhr. Online verfügbar unter https://www.rvr.ruhr/fileadmin/user_upload/01_RVR_Home/02_Themen/Umwelt_Oekologie/Klima/Dokumente/Wirtschaftliche_Aspekte_der_Klimafolgenanpassung_in_der_Metropole_Ruhr.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2025.

Erzbistum Freiburg (2025): Klimaschutz-Fonds, Online verfügbar unter <https://umwelt.ebfr.de/themen/klimaschutz/klimaschutz-fonds/>, zuletzt geprüft am 04.09.2025.

Essers, Lars; Werth, Alexander (2025): Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM). Hg. v. Deloitte. Online verfügbar unter <https://www.deloitte.com/de/de/services/tax/services/cbam-carbon-border-adjustment-mechanism.html>, zuletzt aktualisiert am 25.07.2025, zuletzt geprüft am 25.07.2025.

European Commission (2025): rules for the application of Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council as regards the conditions and procedures related to the status of authorised CBAM declarant. Online verfügbar unter [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=PI_COM:Ares\(2024\)7706795](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=PI_COM:Ares(2024)7706795), zuletzt geprüft am 25.07.2025.

Fan, Jessica; Rehm, Werner; Siccario, Giulia (2021): The state of internal carbon pricing. In: McKinsey & Company, 10.02.2021. Online verfügbar unter https://www.mckinsey.com/capabilities/strategy-and-corporate-finance/our-insights/the-state-of-internal-carbon-pricing#/, zuletzt geprüft am 28.11.2024.

Fanelli, Tullio; Ortis, Alessandro (2020): Climate Change: A New European Union Approach Is Needed. In: Capitalism, Global Change and Sustainable Development, S. 141–147. DOI: 10.1007/978-3-030-46143-0_9.

Friedman, Lisa (2025): What's the Cost to Society of Pollution? Trump Says Zero. Hg. v. The Institute for Climate and Sustainable Growth. Online verfügbar unter <https://climate.uchicago.edu/news/whats-the-cost-to-society-of-pollution-trump-says-zero>, zuletzt aktualisiert am 13.05.2025, zuletzt geprüft am 25.07.2025.

Friedrich, Rainer, Bickel, Peter (Hrsg.) (2001): Environmental External Costs of Transport. Unter Mitarbeit von Peter Bickel. 1st edition, Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04329-5>

Generalzolldirektion (2024): CO₂-Grenzausgleichssystem (CBAM). Online verfügbar unter https://www.zoll.de/DE/Fachthemen/Verbote-Beschaenkungen/Schutz-der-Umwelt/CO2-Grenzausgleichssystem-CBAM/co2-grenzausgleichssystem-cbam_node.html#doc474352bodyText6, zuletzt geprüft am 06.12.2024.

Gniechwitz, Timo; Paare, Klaus; Schulze, Thorsten (2024): Wohnungsbau 2024 in Deutschland: Kosten - Bedarf - Standards. Die Krise als Einbahnstraße?: Studie zu den Bedarfen, Rahmenbedingungen und Potenzialen durch angemessene Standards für den Wohnungsbau in Deutschland. Hg. v. Dietmar Walberg. Kiel: Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V (Bauforschungsbericht, Nr. 88). Online verfügbar unter https://www.impulse-fuer-den-wohnungsbau.de/fileadmin/images/Studien/ARGE/ARGE-Studie_%E2%80%93_Wohnungsbau-Tag_2024.pdf, zuletzt geprüft am 17.04.2025.

Gröger, Jens (2020): Digitaler CO₂-Fußabdruck. Datensammlung zur Abschätzung von Herstellungsaufwand, Energieverbrauch und Nutzung digitaler Endgeräte und Dienste. Studie des Öko-Institut im Auftrag des Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. (BUND). Online verfügbar unter <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Digitaler-CO2-Fussabdruck.pdf>, zuletzt geprüft am 27.03.2025.

Harthan, Ralph O.; Förster, Hannah; Borkowski, Kerstin; Braungardt, Sibylle; Bürger, Veit; Cook, Vanessa et al. (2024): Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024). Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/projektionen_technischer_anhang_0.pdf, zuletzt geprüft am 25.06.2025.

Helms, Hinrich; Kämper, Claudia; Biemann, Kirsten; Lambrecht, Udo; Jöhrens, Julius; Mayer, Kerstin (2019): Klimabilanz von Elektroautos. Hg. v. Agora Energiewende. Online verfügbar unter https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2025.

Kalinowska, Dominika; Keser, Kerim; Kunert, Uwe (2009): CO₂-Besteuerung von Pkws in Europa auf dem Vormarsch. Hg. v. DIW. Online verfügbar unter https://www.diw.de/documents/publikationen/73/diw_01.c.99789.de/09-27-1.pdf, zuletzt geprüft am 28.04.2025.

Lin, Boqiang; Zhao, Hengsong (2024): Threatening the Poor? The economic impacts of carbon border adjustment mechanism on developing countries. In: Structural Change and Economic Dynamics 71, S. 582–593. DOI: 10.1016/j.strueco.2024.09.005.

Löschel, Andreas; Schulze, David (2022): Brauchen wir CO₂-Schattenpreise für öffentliche Ausgaben? In: Wirtschaftsdienst 102 (S1), S. 41–46. DOI: 10.1007/s10273-022-3172-x.

LUBW Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (Hg.) (2024): FAQ – Synergien von Klimaschutz und Klimaanpassung – Häufige Fragen zu Klimawandel und Klimaanpassung.

Matthey, Astrid; Bünger, Björn (2024): Methodological Convention 3.2 for the Assessment of Environmental Costs. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/methodological_convention_3_2_value_factors_bf.pdf, zuletzt geprüft am 24.06.2025.

Müller, Jasper (2024): Quantifizierung von Umweltkosten im Rahmen von Energieeffizienzmaßnahmen, Masterarbeit an der TU Darmstadt (unveröffentlicht), zuletzt geprüft am 12.11.2024.

Oberpriller, Quirin; Peter, Martin; Füssler, Jürg; Zimmer, Anne; Aboumahboub, Tina; Schleyen, Jessie et al. (2021): Climate cost modelling. analysis of damage and mitigation frameworks and guidance for political use. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/cc_68-2021_climate_cost_modelling_korr.pdf, zuletzt geprüft am 05.12.2024.

Overland, Indra; Sadaqat Huda, Mirza (2022): Climate clubs and carbon border adjustments: a review. In: Environ. Res. Lett. 17 (9), S. 93005. DOI: 10.1088/1748-9326/ac8da8.

Püstow, Moritz; Göhlert, Torsten; Gielen, Julia; Tenner, Jan; Pawelczyk, Erik (2023): Klimaverträglich bauen mit einem Schattenpreis für CO₂ Emissionen. Unter Mitarbeit von Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. Hg. v. KPMG Law. KPMG. Online verfügbar unter https://www.re-source.com/wp-content/uploads/2023/12/KPMG-2023-Impulspapier_Klimavertraeglich_Bauen_mit_CO2_Schattenpreis.pdf, zuletzt geprüft am 19.11.2024.

R + V Versicherung (2024): Wartung eines Elektroautos: Wirklich so einfach & günstig? Online verfügbar unter <https://www.ruv.de/kfz-versicherung/magazin/rund-ums-auto/e-auto-wartung>., zuletzt aktualisiert am 04.08.2025, zuletzt geprüft am 04.08.2025.

The Conference Board (2022): EU Carbon Border Adjustment Mechanism: A Primer for Stakeholders. Online verfügbar unter <https://www.conference-board.org/topics/climate-change/EU-carbon-border-adjustment-mechanism-primer-for-stakeholders>, zuletzt geprüft am 25.07.2025.

Trenczek, Jan; Lühr, Oliver; Eiserbeck, Lukas; Sandhövel, Myrna; Leuschner, Viktoria (2022): Übersicht vergangener Extremwetterschäden in Deutschland. Studie der Prognos AG im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz. Online verfügbar unter https://www.prognos.com/sites/default/files/2022-07/Prognos_Klimawandelfolgen-Deutschland_%C3%9Cbersicht%20vergangener%20Extremwetter-sch%C3%A4den_AP2_1.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2025.

Umweltbundesamt (2020): Methodenkonvention 3.1 - Kostensätze. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-12-21_methodenkonvention_3_1_kostensaetze.pdf, zuletzt geprüft am 11.11.2024.

Umweltbundesamt (2024a): CO₂-Grenzausgleichssystem CBAM sorgt für faire Wettbewerbsbedingungen bei der klimafreundlichen Grundstoffproduktion in der EU. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/co2-grenzausgleichssystem-cbam-sorgt-fuer-faire>, zuletzt geprüft am 04.12.2024.

Umweltbundesamt (2024b): Neue Rekordeinnahmen im Emissionshandel: Über 18 Milliarden Euro für den Klimaschutz. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/neue-rekordeinnahmen-im-emissionshandel-ueber-18>, zuletzt geprüft am 12.12.2024.

Umweltbundesamt (2025): Der Europäische Emissionshandel. Hg. v. DEHSt und Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/der-europaeische-emissionshandel#entwicklung-der-treibhausgas-emissionen-im-stationaren-eu-ets-1-eu-weit>, zuletzt geprüft am 25.07.2025.

Umweltbundesamt Österreich (2024): PACINAS analysiert Klimawandel-Anpassungskosten für die öffentliche Hand. Online verfügbar unter <https://www.klimawandelanpassung.at/newsletter/nl25/kwa-pacinas>, zuletzt geprüft am 04.12.2024.

Varsani, Hitendra D.; Gupta, Rohit (2025): Introducing the Carbon Market Age. Hg. v. MSCI. Blogbeitrag online verfügbar unter <https://www.msci.com/research-and-insights/blog-post/introducing-the-carbon-market-age>, zuletzt aktualisiert am 08.06.2022, zuletzt geprüft am 25.07.2025.

Walberg, Dietmar; Gniechwitz, Timo; Paare, Klaus; Schulze, Thorsten (Hg.) (2022): Wohnungsbau: Die Zukunft des Bestandes. Studie im Auftrag des Verbändebündnisses Wohnungsbau: Bundesverband Deutscher Baustoff-Fachhandel; Bundesverband Freier Immobilien- und Wohnungsunternehmen; Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau; Arbeitsgemeinschaft für Zeitgemäßes Bauen. Kiel: Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes

Bauen e.V (Bauforschungsbericht, Nr. 82). Online verfügbar unter <https://www.gdw.de/media/2022/02/studie-wohnungsbau-tag-2022-zukunft-des-bestandes.pdf>, zuletzt geprüft am 17.04.2025.

Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages (2024): Sachstand CO2-Emissionen: Preise und Kosten. Online verfügbar unter <https://www.bundestag.de/resource/blob/1021378/4edf15c87b75d74c51eb672f10703fcb/WD-5-104-24-pdf.pdf>, zuletzt geprüft am 25.11.2024.