

Ermittlung des Treibhausgasminderungspotentials - Rahmenwerk in der Förderlinie EnEff.Gebäude.2050

Autoren

Karl Walther

Bergische Universität Wuppertal
Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen
Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung
kwalth@uni-wuppertal.de

Robert Meyer

Fraunhofer ISE
Gebäudesystemtechnik - Abteilung Energieeffiziente Gebäude
robert.meyer@ise.fraunhofer.de

Mathias Schmid

Universität Freiburg
Institut für Nachhaltige Technische Systeme INATECH
Professur für Solare Energiesysteme
mathias.schmid@inatech.uni-freiburg.de

www.energiewendebauen.info

Inhalt

Inhalt	1
Hintergrund und Ziele	2
1 Vorgehen zur Potentialermittlung.....	3
1.1 Emissionsbilanz und Bilanzrahmen	3
1.2 Bottom-Up-Berechnung.....	5
1.3 Top-Down-Einordnung.....	6
Hintergrund: Potentialtypen	7
2 Quantifizierung des Endenergieeinsparpotentials	8
3 THG-Emissionsfaktoren	9
3.1 Energieträger	10
3.2 Zeitliche Dynamik.....	10
3.3 Politische Emissionsfaktoren mit Lenkungswirkung	11
4 Skalierung und Gebäudedatenbanken	11
5 Dynamische Einflussfaktoren.....	12
5.1 Sanierungsraten und Neubauraten.....	12
5.2 Kostenentwicklung von Rohstoffen und Technologien	13
5.3 Verbreitungspotential.....	13
6 Nationaler Endenergiebedarf nach Sektoren und Anwendungen.....	14
7 Beispielhafte Anwendung.....	15
8 Quellenverzeichnis.....	18
Anhang A Sanierungs- und Neubauraten bzw. -flächen.....	21
Anhang B Strukturen und Merkmale des Gebäudebestands.....	23
Anhang C Aktuelle und zukünftige THG-Emissionsfaktoren	26
Anhang D Endenergiebedarf national	28
Abkürzungen	31

Hintergrund und Ziele

Das Jahr 2020 stellt eine erste Standortbestimmung bei der Erreichung langfristiger Klimaziele dar. Die EU-Mitgliedsstaaten haben für die Sektoren, die nicht unter das EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) fallen, d.h. Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft und Abfall bis 2020 eine Reduktion von Treibhausgasen (THG) um 10 % und bis 2030 um 30 % gegenüber dem Stand von 2005 verbindlich festgeschrieben [1]. Aktuelle Zahlen zeigen, dass Deutschland die gemachten Zusagen seit Oktober 2018 nicht einhält und in der Folge zu Ausgleichszahlungen verpflichtet werden kann [2]. Dies verdeutlicht, dass bereits entwickelte Strategien im Gebäudesektor [3] konsequent umgesetzt werden müssen.

Die Förderinitiative EnEff.Gebäude.2050 zielt vor diesem Hintergrund auf eine höhere Marktdurchdringung bereits heute verfügbarer Technologien, um im Jahr 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Formuliert Fragestellung in EnEff.Gebäude.2050 ist u.a. die Ermittlung von THG-Minderungspotentialen in den Projekten der Förderlinie. Das vorliegende Rahmenwerk legt hierfür die erforderlichen Grundlagen.

Im Mittelpunkt der vorgestellten Methodik steht ein kombinierter Ansatz, vgl. Abbildung 1-1: Zum einen erfolgt eine Bottom-Up-Berechnung des THG-Minderungspotentials ausgehend vom Einzelvorhaben (vgl. Kapitel 1.2) und zum anderen eine Top-Down-Einordnung auf Basis sektoraler Endenergiebedarfe (vgl. Kapitel 1.3). Ziel ist ein umfassendes und bewertetes Bild der im Forschungsfokus stehenden Technologie oder Methode.

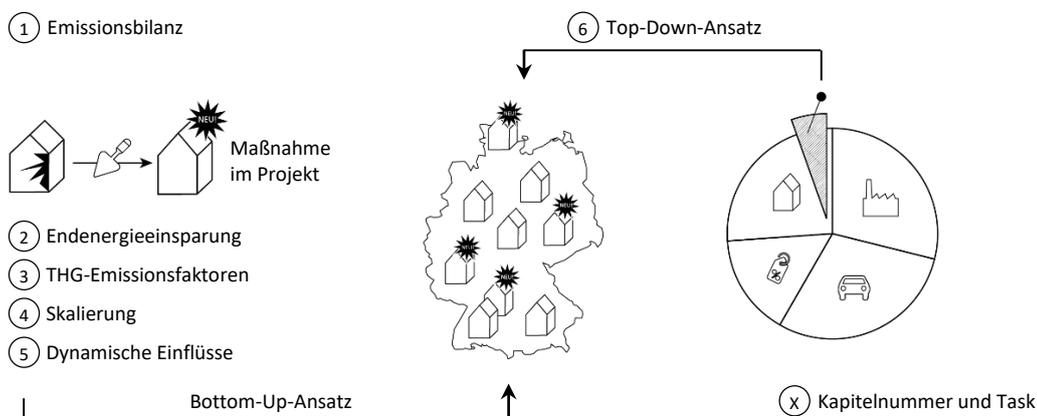


Abbildung 1-1 Ermittlung und Einordnung des THG-Minderungspotentials (Eigene Darstellung)

Projektcharakteristik und Forschungsfokus der verschiedenen in EnEff.Gebäude.2050 geförderten Projekte sind sehr heterogen. So reicht die Bandbreite von Produktentwicklungen auf Bauteilebene über innovative Konzepte für Neubauten und Sanierungen bis hin zur Analyse von Strom- und Wärmenetzen sowie Industrieanwendungen. Das vorliegende Rahmenwerk ist daher methoden- und technologieoffen und richtet sich an diverse Projekttypologien.

Ausgehend vom grundlegenden Vorgehen bei der Potentialermittlung (Kapitel 1) fasst es die aktuell verfügbaren Daten und Methoden in Wissenschaft und Forschung zusammen (Kapitel 2 bis 6). Die einzelnen Schritte, die in den Projekten der Förderlinie durchzuführen sind, werden jeweils am Kapitelende kompakt in „Tasks“ zusammengefasst. Ein abschließendes Beispiel (Kapitel 7) demonstriert die Berechnungsschritte und deren Dokumentation.

1 Vorgehen zur Potentialermittlung

Die Belastbarkeit von errechneten Einsparpotentials in nationalem Maßstab auf Basis von Einzelvorhaben bzw. Demonstrationsobjekten ist stark von der Modellqualität im Einzelprojekt und den bei der Skalierung verwendeten Daten abhängig. Anzustreben ist die Ermittlung eines realisierbaren THG-Minderungspotentials bei erfolgreicher Verbreitung der Projekttechnologie (vgl. „Hintergrund Potentialtypen“, S. 7). Die Ermittlung von nur physikalisch oder theoretisch erzielbaren Potentials ist zu vermeiden.

Die Summe von THG-Emissionen wird in CO₂-Äquivalenten für die Treibhauswirkung von Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Distickstoffoxid (N₂O) ausgedrückt, da diese mit 98,7% den Großteil der freigesetzten THG in Deutschland bilden [4]. Das CO₂-Äquivalent eines THGs ist das Produkt aus seiner Masse und seinem Treibhauspotential.

1.1 Emissionsbilanz und Bilanzrahmen

Die Ermittlung des projektspezifischen Treibhausgasminderungspotentials ΔE erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 14064-2 [5] durch Differenzbildung eines Referenzwertes E_{ref} (Referenztechnologie) und eines verbesserten Wertes E_{Projekt} (Projekttechnologie):

$$\Delta E = E_{\text{ref}} - E_{\text{Projekt}} \quad \text{Gl. 1}$$

mit

ΔE	Projektspezifisches Einsparpotential THG-Emissionen [t _{CO₂äq} /a]
E_{ref}	Referenzwert THG-Emissionen mit Referenztechnologie [t _{CO₂äq} /a]
E_{Projekt}	Verbesserter Wert THG-Emissionen mit Projekttechnologie [t _{CO₂äq} /a]

Das Einsparpotential ist entweder

- als jährlicher statischer Wert [t_{CO₂äq}/a] für ein genanntes Jahr innerhalb eines Betrachtungszeitraumes oder
- kumuliert bis zu einem dokumentierten Datum, z.B. dem Lebenszyklusende einer Maßnahme,

anzugeben (vgl. Abbildung 1-1).

Emissionsbilanzierung bzw. „Carbon Accounting“, d.h. die Festlegung zu berücksichtigender Stoffströme, unterscheidet zwischen direkten und indirekten Emissionen [6–8]. Während direkte Emissionen unmittelbar bei der Nutzenergieerzeugung im Gebäudebetrieb anfallen, sind indirekte Emissionen externen Prozessen außerhalb des Gebäudes zuzuordnen. Die THG-Bilanz ergibt sich als Summe direkter Emissionen für die fossile Energiebereitstellung, indirekter Emissionen aus importierter Energie und Emissionen für die Produktion eingebauter Materialien abzüglich Gutschriften für vermiedene THG-Emissionen durch exportierte Energie, Recycling oder THG-Senken. In Anlehnung an DIN EN ISO 14064-1 [7] lautet die allgemeine THG-Bilanz nach Gl. 2:

$$E = E_{\text{direkt}} + E_{\text{indirekt,Energieimport}} - E_{\text{Energieexport}} + E_{\text{indirekt,Bau}} - E_{\text{indirekt,Recycling}} \pm E_{\text{Sonstige}} \quad \text{Gl. 2}$$

mit

E_{direkt}	Direkte THG-Emissionen der fossilen Energiebereitstellung vor Ort
$E_{\text{indirekt,Energieimport}}$	Indirekte THG-Emissionen aus importierter Energie an die Systemgrenze, z.B. Bezug von Netzstrom eines Gebäudes
$E_{\text{Energieexport}}$	Vermiedene THG-Emissionen durch exportierte thermische oder elektrische Energie
$E_{\text{indirekt,Bau}}$	Indirekte THG-Emissionen aus Produktion eingebauter Materialien
$E_{\text{indirekt,Recycling}}$	Eingebundene THG-Emissionen der Materialien beim Rückbau unter Berücksichtigung von Nachnutzung und Recyclingquoten
E_{Sonstige}	Zusätzliche THG-Quellen oder -Senken

Anmerkungen

- Die Emissionen E_{direkt} und $E_{\text{indirekt,Energieimport}}$ beziehen, über den Energiebedarf für den Gebäudebetrieb inkl. Hilfsenergien hinaus, den Energiebedarf für Nutzeranwendungen bzw. Produktionsprozesse in der Industrie mit ein.
- Während die Stromerzeugung auf nationaler Ebene in der Regel dem energiewirtschaftlichen Sektor zugeordnet wird, gehen diese hier über $E_{\text{indirekt,Energieimport}}$ in die Bilanz ein.
- Die primärenergetische Bewertung in DIN V 18599 [23] wendet unterschiedliche Primärenergiefaktoren für den Strommix (Strombezug) und den Verdrängungsstrommix (Stromerzeugung). Asymmetrische THG-Emissionsfaktoren werden in der vorliegenden Methodik nicht vorgeschlagen. Der Umfang von exportierter Energie im Zusammenhang mit dem übergeordneten Netz ist zu bewerten.
- „Graue Emissionen“ für Herstellung, Instandhaltung, Rückbau und Recycling sind über $E_{\text{indirekt,Bau}}$ und $E_{\text{indirekt,Recycling}}$ enthalten. Entsprechende Kennwerte sind Datenbanken wie z.B. Ökobaudat [9] zu entnehmen.
- Emissionen für Transportprozesse sind in den Modulen der ökobau.dat enthalten und fließen über $E_{\text{indirekt,Bau}}$ und $E_{\text{indirekt,Recycling}}$ in die Bilanz mit ein.

Die Ermittlung des THG-Minderungspotentials sollte den räumlichen und zeitlichen Einflussbereich der Projekttechnologie umfassend abbilden. Detaillierte Kenntnis der relevanten Stoffströme ist Voraussetzung zur angemessenen Festlegung der Bilanzgrenzen. Die Eingrenzung des räumlichen und zeitlichen Bilanzrahmens orientiert sich an den Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15978 [10].

Task 1 – Emissionsbilanz

Aufstellung der Emissionsbilanz (DIN EN ISO 14064-1 und DIN EN ISO 14064-2).

Eingrenzung berücksichtigter Stoffströme und Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15978.

1.2 Bottom-Up-Berechnung

Nahezu alle Förderprojekte schließen Demonstrationsobjekte ein. Dies ermöglicht die Berechnung einer Endenergieeinsparung gegenüber einem Vergleichsobjekt oder einer Vergleichstechnologie, (vgl. Gl. 3). Über die Anwendung von THG-Emissionsfaktoren (vgl. Kapitel 3) und eine Skalierung über Gebäudedatenbanken (vgl. Kapitel 4) ergibt sich das nationale THG-Minderungspotential:

$$\Delta E_{\text{BottomUp}} = \Delta Q_f \cdot f_{\text{THG}} \cdot n_{\text{anw}} \quad \text{Gl. 3}$$

mit

$\Delta E_{\text{BottomUp}}$	THG-Minderungspotential direkter und indirekter Emissionen aus Endenergieeinsparung nach Bottom-Up-Berechnung [$\text{tCO}_2\text{äq}$], ggf. [$\text{tCO}_2\text{äq/a}$]
ΔQ_f	Endenergieeinsparung [kWh/a] (Kapitel 2)
f_{THG}	THG-Emissionsfaktor [$\text{gCO}_2\text{äq/kWh}$] (Kapitel 3)
n_{anw}	Anzahl von Anwendungen der Projekttechnologie (Kapitel 4) bei erfolgreicher Verbreitung unter Berücksichtigung dynamischer Einflussfaktoren (Kapitel 5)

Die Emissionen aus Bau, Recycling und sonstige Emissionen (vgl. Gl. 2) sind analog zu ermitteln.

Dieser Bottom-Up-Ansatz bietet die Vorteile einer projektscharfen Berechnung. Demgegenüber stehen Unsicherheiten bei der mengen- und flächenmäßigen Skalierung sowie dynamische Einflüsse wie Sanierungsraten, Kostenentwicklung, Nachahmereffekte oder Hemmnisse, sich ändernde Primärenergie- und THG-Emissionsfaktoren oder Klimaszenarien (vgl. Kapitel 5). Aufgrund der zu treffenden Annahmen nehmen die Unsicherheiten im Verlauf der Berechnung erheblich zu. Eine Plausibilisierung innerhalb der Förderlinie ist nicht möglich, weil in EnEff.Gebäude.2050 keine Projekte mit unmittelbar vergleichbarer Technologie vorhanden sind.

1.3 Top-Down-Einordnung

Auf nationaler Ebene liegen Daten über die zeitliche Entwicklung von Energieverbräuchen bzw. THG-Emissionen und deren sektorale Aufteilung nach Anwendungen vor [11–15]. Diese bilden beispielsweise die Grundlage zur politischen Entscheidungsfindung (z.B. NAPE, ESG [3, 16] etc.) und zur Überprüfung erreichter Einsparungen. In Kapitel 6 wird der aktuelle Datenstand zusammengestellt. Die Daten ermöglichen eine Einordnung und vergleichende Bewertung der im Bottom-Up-Ansatz errechneten Ergebnisse. Für diesen Top-Down-Check sind die im Förderprojekt adressierten Endenergieverbräuche aus dem vorliegenden Datenbestand zu identifizieren und mit dem im Projekt ermittelten THG-Minderungspotential nachvollziehbar zu plausibilisieren.

$$\Delta E_{\text{TopDown}} = Q_{f,\text{nat,Sekt,Anw}} \cdot \frac{\Delta Q_f}{Q_{f,\text{ref}}} \cdot f_{\text{THG}} \cdot \frac{n_{\text{anw}}}{n_{\text{max}}} \quad \text{Gl. 4}$$

mit

$\Delta E_{\text{TopDown}}$	THG-Emissions-Minderungspotential aus Endenergieeinsparung nach Top-Down-Einordnung [tCO _{2äq}], ggf. [tCO _{2äq} /a]
$Q_{f,\text{nat,Sekt,Anw}}$	Endenergieverbrauch national nach Sektor und Anwendung [kWh/a] (Kapitel 6)
ΔQ_f	Endenergieeinsparung [kWh/a] (Kapitel 2)
$Q_{f,\text{ref}}$	Endenergiebedarf im Referenzfall [kWh/a] (Kapitel 2)
f_{THG}	THG-Emissionsfaktor [gCO _{2äq} /kWh] (Kapitel 3)
n_{anw}	Anzahl von Anwendungen der Projekttechnologie (Kapitel 4) bei erfolgreicher Verbreitung unter Berücksichtigung dynamischer Einflussfaktoren (Kapitel 5)
n_{max}	Anzahl maximal möglicher Anwendungsfälle der Projekttechnologie

Hintergrund: Potentialtypen

Potentiale lassen sich in vier verschiedene Typen unterscheiden [17]:

Das **theoretische Potential** markiert die physikalische Obergrenze des Energieeinsparpotentials, wenn die Projektergebnisse innerhalb der zeitlichen und räumlichen Bilanzgrenzen in allen vorhandenen Anwendungen umgesetzt werden ($n_{anw} \approx n_{max}$).

Das **technische Potential** beschreibt den Teil des theoretischen Potentials, der unter technischen Rahmenbedingungen erzielbar ist. Für den Gebäudebereich bedeutet dies z.B. die Einbeziehung von Neubau- und Sanierungsraten (vgl. Kapitel 5.1). Liegen keine Angaben über ökonomische Effekte vor, beschränkt sich die Potentialermittlung auf das technische Potential.

Das **wirtschaftliche Potential** bezieht ökonomische Gegebenheiten und Entwicklungen ein und betrachtet die Wirtschaftlichkeit einer Technologie bzw. Energiedienstleistung gegenüber einer Referenz über die gesamte Lebensdauer. Das wirtschaftliche Potential kann aus gesamtwirtschaftlicher, gesellschaftlicher, Endabnehmer- oder Anbieter-Sicht betrachtet werden. Dabei kommen dynamische, ökonomische Einflussfaktoren (vgl. Kapitel 5.2) zum Einsatz, anhand derer Rentabilität und Gewinnschwelle berechnet werden ($n_{anw} > 0$).

Das **Erwartungspotential** bzw. **realisierbare Potential** bezeichnet das Potential, das innerhalb einer definierten Zeitspanne unter Beachtung weiterer Faktoren (z.B. Hemmnisse, Markteinführung, vgl. Kapitel 5.3), ausschöpfbar erscheint.

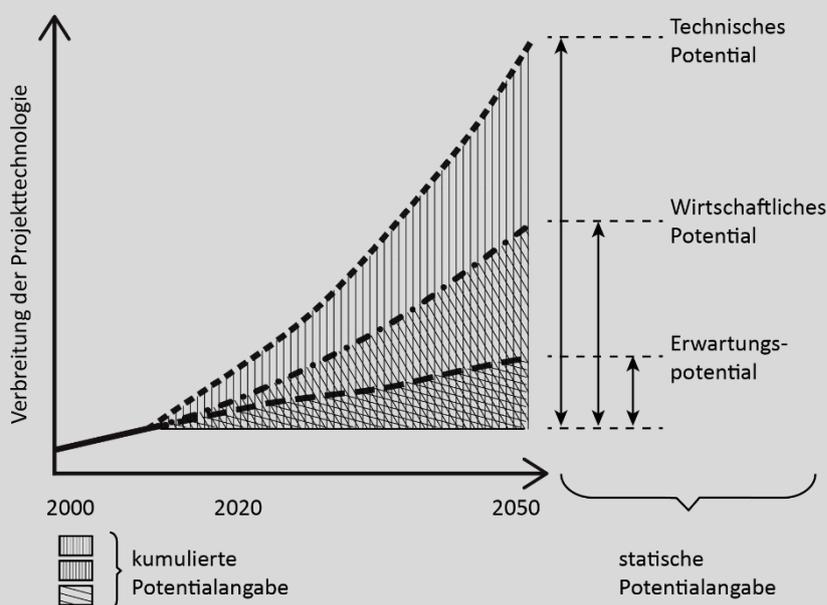


Abbildung 1-1: Veranschaulichung der verschiedenen Potentialtypen und deren Zeitbezug (vgl. Beschreibung Gl. 1). Eigene Darstellung in Anlehnung an [18].

2 Quantifizierung des Endenergieeinsparpotentials

Die Ermittlung der projektspezifischen Endenergieeinsparung ΔQ_f ist Ausgangspunkt der Berechnung des THG-Minderungspotentials und findet innerhalb des definierten Bilanzrahmens statt. In der Regel erfolgt die Berechnung des Einsparpotentials durch Differenzbildung eines Referenzwertes $Q_{f,ref}$ (Referenztechnologie) und eines verbesserten Wertes $Q_{f,Projekt}$ (Projekttechnologie).

$$\Delta Q_f = Q_{f,ref} - Q_{f,Projekt} \quad \text{Gl. 5}$$

mit

ΔQ_f	Projektspezifisches Einsparpotential Endenergie/Jahr/ggfs. Bezugsgröße Fläche [kWh] oder [kWh/a] oder [kWh/m ² a]
$Q_{f,ref}$	Referenzwert Endenergie mit Referenztechnologie [kWh] oder [kWh/a] oder [kWh/m ² a]
$Q_{f,Projekt}$	Verbesserter Wert Endenergie mit Projekttechnologie [kWh] oder [kWh/a] oder [kWh/m ² a]

Die Definition des Referenzszenarios kann auf unterschiedlichen Modellen basieren:

- Dokumentierter Stand der Technik auf Datenbasis
- Referenz-Simulation
- Referenz-Messung

Die Ermittlung des verbesserten Projektwertes erfolgt in der Regel auf Basis mathematisch-physikalischer Modelle und/oder durch Monitoring und/oder Messungen im Versuchsstand.

Aus vergangenen und laufenden Forschungsvorhaben liegen zahlreiche Erfahrungen zur Ermittlung von Einsparpotentialen vor. Berechnete Einsparpotentiale haben sich in der Vergangenheit unter realen Bedingungen, z.B. wegen ungeeigneter Nutzungsrandbedingungen, Rebound-Effekten etc., häufig als nicht erreichbar herausgestellt. Der daraus resultierende Performance Gap ist Gegenstand abgeschlossener und laufender Forschungsvorhaben [19] und neben der Ermittlung von THG-Minderungspotentialen ein zentraler Aspekt in der Begleitforschung der Förderlinie EnEff.Gebäude.2050. Diese Erkenntnisse sind bei der Ermittlung von THG-Minderungspotentialen zu berücksichtigen.

Es ist daher besondere Aufmerksamkeit auf die Verwendung kalibrierter Modelle in Simulation und Messung zu legen. Dies beinhaltet z.B.

- Die Annahme realistischer Randbedingungen wie z.B. der Innentemperatur, dem Nutzerverhalten und der Einbeziehung von Nutzerstrom
- Die Anwendung von standortgenauen Klimadatensätzen im Gegensatz zu einem Referenzklima und die Einbeziehung von Klimaszenarien

Weitere dynamische Einflussfaktoren sind in Kapitel 5 beschrieben.

Es wird die Anwendung von in Forschung und Praxis etablierter Software wie dem TEK-Tool und EnerCalc empfohlen [20, 21]. Beide basieren auf der Bewertungsmethodik der DIN V 18599. Alternativ stehen je nach Technologie komplexere dynamische Simulationsverfahren zur Verfügung, um auch neuartige technologische Ansätze abbilden zu können (MatLab, Modelica, TRNSYS, IDA ICE etc.).

Die Einsparungen oder Zunahmen aus Bau, Recycling und sonstigen Quellen oder Senken (vgl. Gl. 2) sind analog zu ermitteln.

Task 2 – Referenzszenario und Modell

Beschreibung der verwendeten Methoden bei Referenzszenario und Modellbildung mit dem Ziel eines kalibrierten Modells zur Ermittlung von ΔQ_f .

3 THG-Emissionsfaktoren

Die Umrechnung der Endenergieeinsparung zu THG-Einsparung erfolgt über THG-Emissionsfaktoren.

Die Hauptdatenquelle dieser Faktoren ist das Globale Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) [22], das 1989 erstmals vom Öko-Institut veröffentlicht wurde. Es handelt sich um ein Modell mit integrierter Datenbank und Bilanzierungsmöglichkeiten für ökologische Lebenszyklusanalysen. GEMIS umfasst Daten zu Prozessketten- und Brennstoffdaten von Energieträgern und verschiedener Technologien zur Umwandlung in Endenergie in Form von Wärme- und Strom. Für die Betreuung und Weiterentwicklung ist aktuell das Internationale Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS) zuständig.

DIN 18599 [23] enthält in der Fassung von September 2018 erstmals Angaben zu THG-Emissionsfaktoren. Diese Werte finden sich im Anhang C und basieren ebenfalls auf GEMIS. In [24] wird die Bewertung von Gebäuden und Quartieren mit diesen THG-Emissionsfaktoren mit den Faktoren aus anderen Quellen (Ökobaudat) verglichen und diskutiert.

Neben der offensichtlichen Abhängigkeit vom Energieträger unterliegen Emissionsfaktoren weiteren Einflussgrößen. Spezifische THG-Emissionen für Strom und Fernwärme unterliegen in mehrfacher Sicht einer zeitlichen Dynamik, außerdem sind regionale Besonderheiten und politische Faktoren zu berücksichtigen. Eine Übersicht samt Quellenverweisen findet sich in Abbildung 3-1.

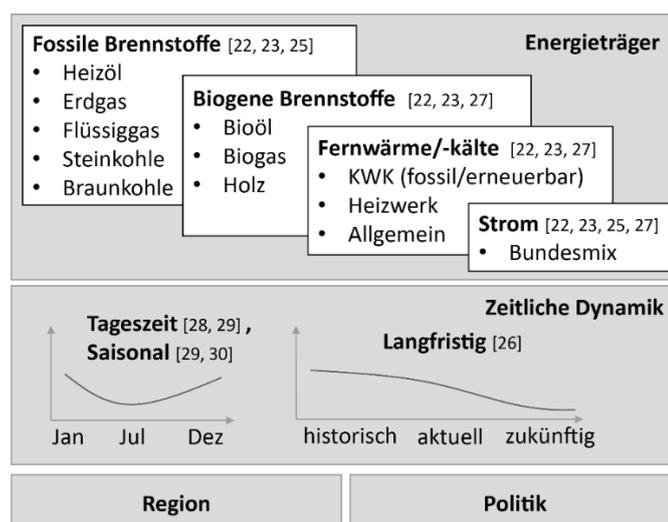


Abbildung 3-1: Einflussgrößen bei der Berechnung von THG-Emissionsfaktoren. Eigene Darstellung.

3.1 Energieträger

THG-Emissionsfaktoren sind in Abhängigkeit vom Energieträger zu ermitteln. Sie sollten alle THG-Emissionen innerhalb des festgelegten Bilanzrahmens berücksichtigen, um eine realistische Abschätzung der Klimawirkung zu ermöglichen. Diese Prozessketten lassen sich z.B. in GEMIS [22] modellieren.

Bei fossilen Brennstoffen ist zu beachten, dass die entsprechenden THG-Emissionsfaktoren auf den Heizwert oder Brennwert bezogen werden können [25]. Die heizwertbezogene Endenergiemenge wird aus dem volumenbezogenen bzw. massebezogenen unteren Heizwert H_u und der entsprechenden Verbrauchsmenge mit

$$E_{Br} = H_u \cdot V_{Br} \text{ bzw. } E_{Br} = H_u \cdot m_{Br}$$

bestimmt. In [25] sind die Heizwerte typischer Brennstoffe als gemittelte Werte dargestellt. Die tatsächlichen Werte sind von der Qualität und Beschaffenheit des Brennstoffs, des Verbrennungsprozesses und damit des Zustands des Wärmeerzeugers abhängig und sollten nach Möglichkeit berücksichtigt werden.

Regionale Unterschiede bestehen bei den spezifischen Emissionen des bereitgestellten Stroms und insbesondere der Fernwärme [23]. Hier wird empfohlen, Daten der lokalen Energieversorger zu nutzen.

3.2 Zeitliche Dynamik

THG-Emissionen unterliegen einer langfristigen zeitlichen Dynamik. So sind die THG-Emissionsfaktoren insbesondere beim Strom durch den erhöhten Anteil erneuerbarer Energien in der Vergangenheit gesunken [26]. Eine vergleichsweise geringe relative Abnahme im Bereich der Fernwärme war ebenfalls zu verzeichnen.

Durch diese Dynamik sind Prognosen über die zukünftige Entwicklung der Emissionsfaktoren wichtig. Insbesondere beim Strom-Mix hängt diese von der Zusammensetzung der Primärenergieträger ab. Bei den Prognosen müssen daher Annahmen zum Ausbau erneuerbarer Energieträger getroffen werden, der laut [27] voraussichtlich anhalten wird. Das gilt sowohl für den „business as usual“-Fall als auch ambitionierte Klimaschutzszenarien, aus denen sich eine entsprechend stärkere Absenkung ergibt. Zahlreichen Studien liegen die Klimaschutz-Szenarien des Projektes „Klimaschutzszenario 2050“ [18] zugrunde.

THG-Emissionsfaktoren schwanken außerdem im Tages- und Jahresverlauf. Diese sind beim Strom zu einem großen Teil auf den erhöhten Anteil an fluktuierenden erneuerbaren Energien zurückzuführen. Insbesondere die Einspeisung durch Photovoltaik führt zu einer Senkung der THG-Emissionsfaktoren im Sommer und zur Mittagszeit. Zeitliche Schwankungen können außerdem, in etwa bei der Fernwärme, auf die Einspeisung aus Industrieprozessen zurückzuführen sein. [28], [29] und [30] untersuchen, welche zeitliche Auflösung der THG-Faktoren für eine akkurate Berechnung der Emissionen sinnvoll ist.

Dabei zeigt sich, dass für konventionelle Verbraucher und Prozesse – auch bei zeitlichen Schwankungen im Verbrauch – eine saisonale bzw. tageszeitliche Auflösung der THG-Emissionsfaktoren nicht zu relevanten Abweichungen bei der Berechnung führt, da sich im Allgemeinen die unterschiedlichen Effekte in der Jahresbetrachtung ausgleichen. Dagegen ist für emissionsoptimierte Verbraucher, die abhängig vom Anteil erneuerbarer Energien im Netz flexibel gesteuert werden, die zeitliche Auflösung zu berücksichtigen. Durch eine entsprechende Optimierung kann eine Senkung der THG-Emissionen erreicht werden [28]. Weiterhin ist

die Verwendung zeitlich aufgelöster THG-Emissionsfaktoren zu prüfen, falls bei der Berechnung des Potentials auf nationaler Ebene davon ausgegangen wird, dass der Anteil an Verbrauchern mit starken tageszeitlichen oder saisonalen Abhängigkeiten (z.B. Wärmepumpen) deutlich steigt [30].

3.3 Politische Emissionsfaktoren mit Lenkungswirkung

Bei der Ermittlung von THG-Minderungspotentialen ist über den Ansatz der THG-Emissionsfaktoren eine möglichst realitätsnahe und verursachergerechte Berechnung anzustreben. Normative Vorgaben für die Auswahl oder Bestimmung von THG-Emissionsfaktoren existieren zurzeit nicht. Sollten diese künftig im Rahmen einer Lenkungssteuer, z.B. einer allgemeinen Abgabe auf THG-Emissionen, genutzt werden, dürfte der Druck durch Politik und Stakeholder bei der Bestimmung der Faktoren zunehmen [24].

Task 3 – Emissionsfaktoren

Benennung der verwendeten THG-Emissionsfaktoren und Endenergiemengen inklusive der verwendeten Datenquellen, betrachteten Anwendungszeiträume und weiterer Annahmen.

4 Skalierung und Gebäudedatenbanken

Nach der Ermittlung des projektspezifischen THG-Minderungspotentials ist die Skalierung auf nationalen Maßstab erforderlich. Dazu ist eine geeignete nationale Größe wie z.B. die Anzahl der potentiell anwendbaren Objekte, eine Bauteilfläche, installierte Leistung o.ä. heranzuziehen.

Für den deutschen Gebäudesektor steht mit der Tabula-Datenbank eine etablierte Grundlage für den Wohngebäudebestand zur Verfügung [31, 32]. Hintergrund dafür war die IWU-Gebäudetypologie und – Datenbank [33].

Die Struktur des Nichtwohngebäudebestandes ist gegenüber dem Wohngebäudesektor deutlich inhomogener. Vorhandene Erhebungen in der Vergangenheit stützten sich auf Sekundärdaten und nicht repräsentative Befragungen und wurden überwiegend für Teilspektoren ermittelt. Erwartungstreue Hochrechnungen auf die Gesamtheit aller Nichtwohngebäude sind daher auf dieser Basis mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Das Projekt „Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude, Primärdatenerhebung zur Erfassung der Struktur und der energetischen Qualität des Nichtwohngebäudebestandes in Deutschland“ (EnOB:dataNWG) setzt sich zum Ziel diese Wissenslücke durch Geodatenanalysen, Gebäudescreenings, Interviews und Begehungen zu schließen. Die Erhebung und Analyse des Gebäudebestandes erfolgen laufend [34]. Die Art der Aufbereitung der Daten und ihre Zugänglichkeit sind Gegenstand aktueller Arbeitspakete. Erste Ergebnisse werden ab Mitte 2019 erwartet.

Bis aus dataNWG verwertbare Daten vorliegen, ist in den NWG-Teilspektoren auf Daten aus dem thematischen Umfeld der Förderprojekte zurückzugreifen. Eine Übersicht und Zusammenfassung vorliegender Daten aus dem NWG-Sektor ist in [35] (Kapitel 4) zu finden.

In Anhang B findet sich eine Zusammenfassung des aktuellen Gebäudebestandes (Wohngebäude und Nichtwohngebäude) aus [35].

Task 4 – Skalierung

Beschreibung und Bewertung der verwendeten Daten zur Skalierung

5 Dynamische Einflussfaktoren

Nach Berechnung des projektspezifischen Einsparpotentials, Anwendung von THG-Faktoren und Skalierung auf den nationalen Maßstab liegt ein THG-Minderungspotential auf technischer Ebene vor, vgl. Gleichung 3 Kapitel 1.2.

$$\Delta E_{\text{BottomUp}} = \Delta Q_f \cdot f_{\text{THG}} \cdot n_{\text{anw}} \quad \text{Gl. 3}$$

Zur Eingrenzung dieses Ergebnisses unter Berücksichtigung einer realistischen Verbreitung sind Annahmen dynamischer Einflüsse und Trendabschätzungen zukünftiger Entwicklungen anzuwenden. Bei der Bewertung und Dokumentation sind Einflussgrößen zu identifizieren und zu benennen. Mindestens ist eine qualifizierte Bewertung, wenn möglich eine quantifizierte Bewertung vorzunehmen.

5.1 Sanierungsraten und Neubauraten

Sanierungs- und Neubauraten sind eine zentrale Größe, um die Diffusion neuer Technologien im Gebäudebereich zu bewerten. Sie spielen dabei sowohl bei der Berechnung des technischen als auch des wirtschaftlichen Potentials eine entscheidende Rolle, da viele neue Systeme, Technologien und Komponenten aus technischen und ökonomischen Gründen oftmals nur im Rahmen umfassender Sanierungen oder Neubauten ersetzt werden können. Zusätzlich wirken weitere externe Einflüsse wie z.B. Fachkräftemangel. Sanierungs- und Neubauraten werden daher bei der Berechnung von Szenarien meistens als externe Größen vorgegeben [36].

Dabei erfolgt die Angabe in den Quellen meist in Vollsanierungsäquivalenten oder Gesamtmodernisierungsraten (ausgedrückt in Prozent des Gebäudebestands). Das Vollsanierungsäquivalent ergibt sich dabei als eine gewichtete Mittelung über verschiedene Sanierungsarten, die auch Teilsanierungen im Bereich Gebäudehülle, wie z.B. Außenwand, Dach, Keller und Fenster, auf Basis der Flächenanteile berücksichtigen. Der Austausch der Anlagentechnik wird für historische Werte gesondert von der Sanierung der Gebäudehülle in [37] ausgewiesen. Mit Hilfe der Angaben aus den Gebäudedatenbanken (Kapitel 4), können so Annahmen zur jährlich sanierten Grundfläche, Anzahl sanierter Gebäude oder Wohnungen getroffen werden. Teilweise finden sich in Szenarienrechnungen –insbesondere für Neubauten- auch direkt Zahlen zur erwarteten Entwicklung der Netto-Grundfläche. Im Anhang A befindet sich eine Zusammenstellung von Sanierungs- und Neubauraten, sowie -flächen aus drei verschiedenen Studien. Angegeben sind jeweils die Werte für die Szenarien zur Erreichung des Ziels der ESG 2050. Der Detaillierungsgrad ist dabei sehr verschieden. Teilweise finden sich Angaben für bestimmte Gebäudetypen und bestimmte Zeitabschnitte wieder.

Sanierungs- und Neubauraten können berücksichtigt werden, wenn keine anderen Informationen zur Diffusion der Projekttechnologien/-ansätze vorliegen. In der Regel können die Raten als externe Größen angenommen werden. Dabei sollten möglichst projektspezifische Raten verwendet werden (z.B. lieber Teil- statt Vollsanierungsäquivalente, wenn nur ein Teil des Gebäudes betroffen). In Einzelfällen können die Projektansätze aber auch Auswirkungen auf die Raten haben, sodass diese nicht als externe Größe angenommen werden können.

5.2 Kostenentwicklung von Rohstoffen und Technologien

Die zukünftige Entwicklung der Kosten von Technologien und Rohstoffen hat entscheidenden Einfluss auf die tatsächliche Verbreitung der im Projekt betrachteten Technologien. Gleichzeitig sind Kostenprognosen mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Literatur zu den Grundlagen ist nachfolgend zusammengefasst. Sofern aus dem Umfeld des Forschungsprojektes konkrete Angaben vorliegen, sind diese mit einzubinden.

Für die ökonomische Methodik bei der Bewertung von Technologien zur Minderung der THG-Emissionen wird beispielhaft auf den Bericht [38] verwiesen. Die Preis- bzw. Kostenvorhersage – insbesondere bei Rohstoffen – ist im Allgemeinen aufgrund zahlreicher technischer und politischer Einflussfaktoren mit hohen Unsicherheiten behaftet, die durch Anwendung verschiedener Preisentwicklungsszenarien bei der Kostenkalkulation zu berücksichtigen sind. [39] bietet Anhaltspunkte bei der Berechnung.

Eine Analyse der Kostensenkungspotentiale von Gebäudetechnologien ist im EU-Projekt CRAVEzero unter Mitarbeit des Fraunhofer ISE entstanden [40]. Darin enthalten sind Prognosen zur Kostenentwicklung von Technologien der Heizung, Lüftung, Klimatechnik, elektrischen und thermischen Energiespeichern sowie PV und Solarthermie. Zusätzlich werden auch passive Konzepte und Betriebsstrategien analysiert, dazu gehören die Gebäudehülle, die Beeinflussung der Lichtverhältnisse und Nachtkühlung. Die Prognosen basieren im Wesentlichen auf der Anwendung technologischer Lernkurven.

5.3 Verbreitungspotential

Das Verbreitungspotential der Projekte soll auf Grundlage der Veröffentlichung der Projektergebnisse und des Verwertungsplans abgeschätzt werden. Eine einheitliche Methodik zur Bestimmung des Verbreitungspotentials ist nicht zielführend. Auf Grundlage des technischen oder wirtschaftlichen THG-Minderungspotentials soll ein realistisches THG-Minderungspotential ermittelt werden, das Nachahmungs- und Lerneffekte mit einbezieht.

Folgende Fragen sollen adressiert werden:

- Welche Maßnahmen werden durch Projektbeteiligte ergriffen, um eine über das Demonstrationsprojekt hinausgehende Verbreitung und Umsetzung zu erreichen?
- Welche (möglichen) Wirkungen haben diese Maßnahmen?
- Ist eine quantitative Abschätzung dieser Wirkung möglich?

Es sollen außerdem zentrale Hemmnisse ermittelt werden, die die Ausschöpfung des errechneten THG-Minderungspotentials negativ beeinflussen können. Für den Fall, dass eine grobe Schätzung nicht möglich ist, ist eine qualitative Beschreibung der Hemmnisse ausreichend. Als Grundlage kann sich hierbei die Risikobewertung des Projektes eignen.

Zu möglichen Hemmnissen zählen unter anderem [41]:

- Informationsdefizite bei Akteuren
- Präferenzen von Akteuren
- Nutzerverhalten
- Finanzielle Hemmnisse
- Rechtliche Hemmnisse
- Technische Hemmnisse

Ziel hierbei ist es, die Hemmnisse (analog zur Wirkungsanalyse) qualitativ zu beschreiben und anschließend quantitativ abzuschätzen, welche Einbußen im THG-Minderungspotential durch die jeweiligen Hemmnisse auftreten können.

Task 5 – Bottom-Up-Berechnung und Potentialtyp

Angabe und Erläuterung zusätzlich berücksichtigter Effekte. Qualifizierte oder quantifizierte Bewertung. Angabe nicht berücksichtigter Effekte und Begründung mit dem Ziel einer Unsicherheitsbewertung. Einordnung des errechneten THG-Minderungspotentials in einen Potentialtyp (siehe Hintergrund Potentialtypen S. 7).

6 Nationaler Endenergiebedarf nach Sektoren und Anwendungen

Auf nationaler Ebene liegen Angaben über die zeitliche Entwicklung von Energieverbräuchen bzw. THG-Emissionen und deren sektorale Aufteilung vor. Eine detaillierte Datengrundlage auf Basis der von der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen AGEB erhobenen Daten ist über Veröffentlichungen des BMWi [12–14], des BMU [42] und der dena [43] zugänglich, siehe Abbildung 6-1 und Anhang D.

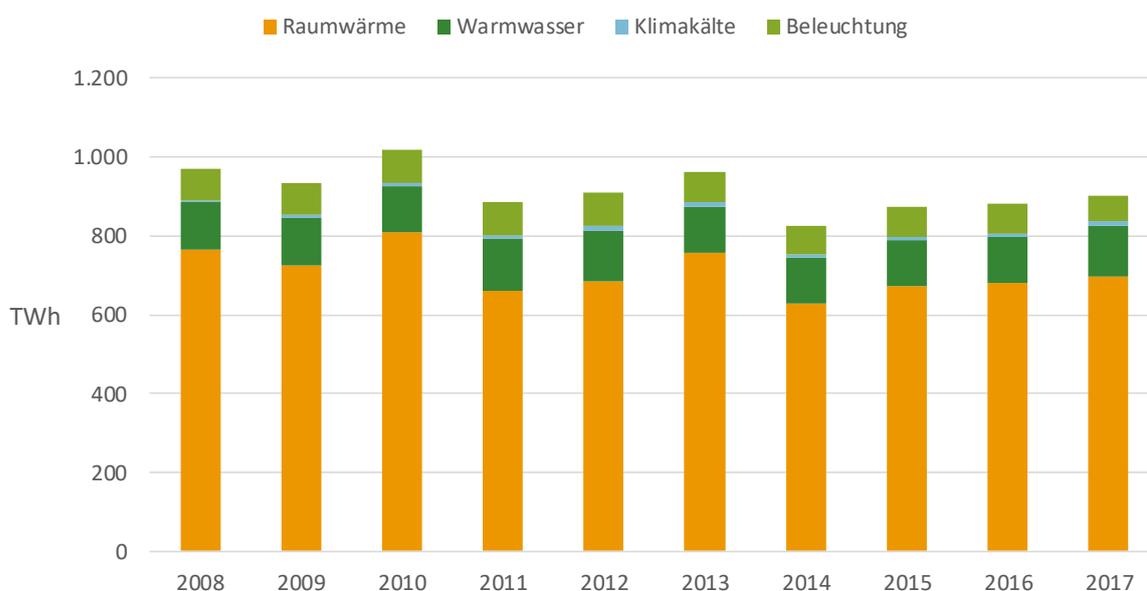


Abbildung 6-1: Verlauf des gebäuderelevanten Endenergieverbrauchs [44]

Diese Daten ermöglichen, das im Bottom-Up-Verfahren ermittelte THG-Minderungspotential in einen nationalen Zusammenhang einzuordnen.

Dafür sind zunächst aus den vorliegenden Daten die vom Förderprojekt adressierten sektoralen Endenergieverbräuche $Q_{f,nat,Sekt,Anw}$ einzugrenzen und mit den mengen- bzw. flächenmäßigen Angaben aus Gebäudedatenbanken in Bezug zu setzen, vgl. Formel 4 Kapitel 1.3.

$$\Delta E_{TopDown} = Q_{f,nat,Sekt,Anw} \cdot \frac{\Delta Q_f}{Q_{f,ref}} \cdot f_{THG} \cdot \frac{n_{anw}}{n_{max}} \quad \text{Gl. 4}$$

Task 6 – Top-Down-Einordnung

Eingrenzung der vom Förderprojekt adressierten THG-Emissionen auf nationaler Ebene
Plausibilisierung des THG-Minderungspotentials aus dem Bottom-Up-Ansatz

7 Beispielhafte Anwendung

Die vorgestellte Methodik wird beispielhaft an einem Forschungsprojekt dargestellt. Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer kennlinienbasierten Detektion von Verschmutzungsrückständen auf Rohrbündelwärmetauschern in Verdunstungskühltürmen, wie sie in Industrieprozessen und Kälteanlagen zum Abführen von Abwärme an die Umgebungsluft häufig eingesetzt werden. Die Verschmutzungen führen zu einem ineffizienten Anlagenbetrieb und somit zu einem erhöhten Stromverbrauch. Durch eine erfolgreiche Umsetzung des Forschungsprojekts können folglich der Stromverbrauch in Nasskühltürmen und somit die THG-Emissionen reduziert werden. Im Folgenden wird auf Basis der im Rahmenwerk beschriebenen Methodik gezeigt, wie eine Abschätzung der erzielbaren THG-Emissionseinsparungen erfolgen kann:

Task 1 – Emissionsbilanz

Aufstellung der Emissionsbilanz (DIN EN ISO 14064-1 und DIN EN ISO 14064-2)

Eingrenzung berücksichtigter Stoffströme und Lebenszyklusphasen nach DIN EN 15978

Ausgangsbasis der Berechnung des THG-Minderungspotentials ist Gl. 1, vgl. Kapitel 1.1:

$$\Delta E = E_{\text{ref}} - E_{\text{Projekt}}$$

die in Anlehnung an DIN EN ISO 14064-1 für die gesamte THG-Bilanz der Technologie aufzustellen ist nach Gl. 2:

$$E = E_{\text{direkt}} + E_{\text{indirekt,Energieimport}} - E_{\text{Energieexport}} + E_{\text{indirekt,Bau}} - E_{\text{indirekt,Recycling}} \pm E_{\text{Sonstige}}$$

Der Fokus des Beispiels liegt auf der Betriebsoptimierung. Lediglich der geringere Strombezug der Rückkühlwerke gegenüber dem Referenzszenario bewirkt eine THG-Minderung.

Entsprechend sind nur die indirekten THG-Emissionen des gelieferten Stroms für die Kälteerzeugung zu berücksichtigen (d.h. $\Delta E_{\text{indirekt,Energieimport}} \neq 0$). Somit vereinfacht sich die Emissionsbilanz aus Gl. 1 und Gl. 2 zu:

$$\Delta E = E_{\text{ref,indirekt,Energieimport}} - E_{\text{Projekt,indirekt,Energieimport}}$$

Task 2 – Referenzszenario und Modell

Beschreibung der verwendeten Methoden bei Referenzszenario und Modellbildung mit dem Ziel eines kalibrierten Modells zur Ermittlung von ΔQ_f .

In der Auslegung von Rückkühlwerken werden nach Normbedingungen (DIN 18599) typischerweise spezifische Leistungen von 30 bis 65 $\text{kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{el}}$ angenommen. Monitoringergebnisse zeigen, dass in der Realität häufig Werte von $< 15 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{el}}$ erreicht werden. Im Versuchsstand wird durch Überwachung und Anwendung geeigneter Reinigungsmaßnahmen eine Erhöhung der Leistung um 20 % festgestellt, d.h. es werden $15 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{el}} * 1,2 = 18 \text{ kW}_{\text{th}}/\text{kW}_{\text{el}}$ erreicht.

Für einen durchschnittlichen Nasskühlturm mit einer mittleren thermischen Leistung von 400 kW im Auslegungspunkt bei 2.000 Jahresbetriebsstunden ergibt sich eine Bereitstellung von 800 $\text{MWh}_{\text{th}}/\text{a}$. Im Referenzszenario entspricht dies einem Jahresstrombedarf von

$$Q_{f,\text{ref}} = 800 \frac{\text{MWh}_{\text{th}}}{\text{a}} / \frac{15 \text{ kW}_{\text{th}}}{\text{kW}_{\text{el}}} = 53,3 \frac{\text{MWh}_{\text{el}}}{\text{a-Anlage}}$$

Der verbesserte Projektwert beträgt

$$Q_{f,\text{projekt}} = 800 \frac{\text{MWh}_{th}}{a} / \frac{18 \text{ kW}_{th}}{\text{kW}_{el}} = 44,4 \frac{\text{MWh}_{el}}{a \cdot \text{Anlage}}$$

Somit ergibt sich nach Gl. 5 durch Einsatz der Projekttechnologie eine Stromeinsparung pro Anlage und Jahr von:

$$\Delta Q_f = Q_{f,\text{ref}} - Q_{f,\text{Projekt}} = 53,3 \frac{\text{MWh}_{el}}{a \cdot \text{Anlage}} - 44,4 \frac{\text{MWh}_{el}}{a \cdot \text{Anlage}} = 8,9 \frac{\text{MWh}_{el}}{a \cdot \text{Anlage}}$$

Task 3 – Emissionsfaktoren

Benennung der verwendeten THG-Emissionsfaktoren und Endenergiemengen inklusive der Datenquellen, betrachteten Anwendungszeiträume und weiterer Annahmen

Für den Strom wird aus [23] ein zeitlich konstanter Emissionsfaktor von $f_{\text{THG}} = 550 \frac{\text{gCO}_2\text{äq}}{\text{kWh}}$ für den deutschen Strom-Mix und das Referenzjahr 2018 entnommen.

Im Hinblick auf eine kumulierte Potentialermittlung von Kälteanlagen ist die zeitliche Entwicklung der THG-Emissionsfaktoren zu berücksichtigen. Auf die Darstellung wird in diesem Dokument verzichtet.

Task 4 – Skalierung

Beschreibung und Bewertung der verwendeten Daten zur Skalierung

Da Kühltürme in Deutschland bisher keiner Registrierungspflicht unterliegen, gibt es keine genauen Daten hinsichtlich ihrer Anzahl. Schätzungen gehen jedoch von ca. 40.000 Nasskühltürmen in Deutschland aus. Der Anteil von Nasskühltürmen mit Rohrbündeln, die den Schwerpunkt des angestrebten Forschungsprojekts bilden, wird von Branchenexperten auf ca. 40%, d.h. $n_{\text{anw,technPot}} = 16.000$ Anlagen, geschätzt.

Somit ergibt sich ein technisches Einsparpotential nach Gl. 3 von

$$\Delta E_{\text{BottomUp,technPot}} = \Delta Q_f \cdot f_{\text{THG}} \cdot n_{\text{anw}} = 8,9 \frac{\text{MWh}_{el}}{a \cdot \text{Anlage}} \cdot 550 \frac{\text{gCO}_2\text{äq}}{\text{kWh}} \cdot 16.000 \text{ Anlagen} = 78.320 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{äq}}/a$$

Task 5 – Bottom-Up-Berechnung und Potentialtyp

Angabe und Erläuterung zusätzlich berücksichtigter Effekte. Qualifizierte oder quantifizierte Bewertung. Angabe nicht berücksichtigter Effekte und Begründung. Einordnung des errechneten THG-Minderungspotentials in einen Potentialtyp (siehe Exkurs S.7).

Von einer Übertragbarkeit auf sämtliche existierende Nasskühltürme kann aufgrund von technischen und wirtschaftlichen Einschränkungen nicht ausgegangen werden. Vorherige Projekte haben gezeigt, dass lediglich 20 % der im Projekt untersuchten Maßnahmen wirtschaftlich sind, d.h. keine Mehrkosten während des erwarteten Lebenszyklus kältetechnischer Anlagen von 15 Jahren unter Berücksichtigung aktueller Energie- und Investitionskosten verursachen.

Somit ergibt sich ein nationales wirtschaftliches Einsparpotential von

$$\Delta E_{\text{BottomUp,wirtschaftlPot}} = \Delta E_{\text{BottomUp,technPot}} * 0,2 = 15.664 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{äq}}/\text{a}.$$

Der Kooperationspartner im Forschungsvorhaben strebt einen Marktanteil von 10 % an, d.h.

$n_{\text{anw,Erwartungspotential}} = 1.600$ Anlagen. Somit ergibt sich ein Einsparpotential von

$$\Delta E_{\text{BottomUp,realisierbPot}} = \Delta E_{\text{BottomUp,wirtschaftlPot}} * 0,1 = 1.566 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{äq}}/\text{a}.$$

Task 6 – Top-Down-Einordnung

Eingrenzung der vom Förderprojekt adressierten CO₂-Emissionen auf nationaler Ebene

Plausibilisierung des THG-Minderungspotentials aus dem Bottom-Up-Ansatz

Die Plausibilisierung des im Bottom-Up-Prinzip errechneten THG-Minderungspotentials erfolgt ausgehend vom deutschlandweiten Stromverbrauch zur Kälteerzeugung für Klima- und Prozesskälte gemäß [44] bzw. Anhang D. Dieser beträgt ohne den Verkehrssektor und Prozesskälte im privaten Sektor (Kühlschränke)

$$Q_{\text{f,nat,Kälte,Strom}} = 33.200 \text{ GWh}_{\text{el}}/\text{a}$$

Darin enthalten sind Anteile für Kältemittelkompressoren sowie der Betrieb von Rückkühlwerken und Pumpen.

Mit einem mittleren EER von 3 ergeben sich pro 1 kW_{el} Strom 4 kW_{th} abzuführende Wärme und für das Rückkühlwerk entsprechend 4 kW_{th} / 15 kW_{th}/kW_{el} = 0,266 kW_{el}.

Unter Vernachlässigung des Pumpenstrombedarfs ergibt sich damit für den Anteil der Rückkühlwerke

$$Q_{\text{f,nat,RKW}} = 33.200 \frac{\text{GWh}_{\text{el}}}{\text{a}} \cdot \frac{0,266}{1+0,266} = 6.976 \frac{\text{GWh}_{\text{el}}}{\text{a}}$$

Die übrigen Werte können aus den vorherigen Berechnungen/Tasks übernommen werden. Für einen Anteil von Nasskühltürmen von 20 % ergibt sich das THG-Minderungspotential im Top-Down-Ansatz nach Gl. 4 mit

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{TopDown,technPot}} &= Q_{\text{f,nat,Sekt,Anw}} \cdot \frac{\Delta Q_f}{Q_{f,ref}} \cdot f_{\text{THG}} \cdot \frac{n_{\text{anw,technPot}}}{n_{\text{max}}} = 6.966 \frac{\text{GWh}_{\text{el}}}{\text{a}} \cdot 0,2 \cdot \frac{8,9 \frac{\text{MWh}_{\text{el}}}{\text{a-Anlage}}}{53,3 \frac{\text{MWh}_{\text{el}}}{\text{a-Anlage}}} \\ &= 550 \frac{\text{gCO}_2\text{äq}}{\text{kWh}} \cdot \frac{16.000 \text{ Anlagen}}{40.000 \text{ Anlagen}} = 51.180 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{äq}}/\text{a} \end{aligned}$$

Dieses liegt damit in der Größenordnung des technischen THG-Minderungspotentials aus dem Bottom-Up-Ansatz mit

$$\Delta E_{\text{BottomUp,technPot}} = 78.320 \text{ t}_{\text{CO}_2\text{äq}}/\text{a}$$

Fazit:

Sowohl im Bottom-Up- als auch im Top-Down-Ansatz sind mit der Anzahl der angestrebten bzw. der maximalen Anwendungsfälle sowie der Zuordnung des Endenergiebedarfes eine Reihe von Parametern enthalten, deren Veränderung sich stark auf das Ergebnis auswirken. Intensive Marktrecherchen und -kenntnisse sind daher unabdingbar. Gleichzeitig ermöglicht die Kombination der Ansätze eine Qualitätsprüfung der Berechnung.

8 Quellenverzeichnis

- [1] European Commission (2019): Effort sharing: Member States' emission targets. Im Internet: https://ec.europa.eu/clima/policies/effort_en; Stand: 04.06.2019
- [2] Frankfurter Allgemeine Zeitung (12.10.18): Deutschland erwartet Klimarechnung in Milliardenhöhe. Klimaziel in Verkehr und Landwirtschaft wird gerissen / Regierung muss Emissionsrechte anderswo zukaufen
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015): Energieeffizienzstrategie Gebäude 2050
- [4] Umweltbundesamt (2016): Die Treibhausgase (15.01.2016). Im Internet: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>; Stand: 31.05.2019
- [5] DIN EN ISO 14064-2: Treibhausgase - Teil 2: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung, Überwachung und Berichterstattung von Reduktionen der Treibhausgasemissionen oder Steigerungen des Entzugs von Treibhausgasen auf Projektebene (ISO 14064-2:2006). 2012. Aufl. Im Internet: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14064-2/150186384>; Stand: 30.05.2019
- [6] Braune A, Geiselmann D, Lemaitre C, Oehler S (2018): Rahmenwerk für "Klimaneutrale Gebäude und Standorte"
- [7] DIN EN ISO 14064-1: Treibhausgase - Teil 1: Spezifikation mit Anleitung zur quantitativen Bestimmung und Berichterstattung von Treibhausgasemissionen und Entzug von Treibhausgasen auf Organisationsebene (ISO 14064-1:2006). 2012. Aufl. Im Internet: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-iso-14064-1/150186403>; Stand: 30.05.2019
- [8] Ranganathan J, Corbier L, Bhatia, Pankja, Schmitz, Simmon, Gage P, Oren K (2004): The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Washington, DC
- [9] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2019): ÖKOBAUDAT. Informationsportal Nachhaltiges Bauen. Im Internet: <https://www.oekobaudat.de/>; Stand: 30.05.2019
- [10] DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode. 2012. Aufl. Im Internet: <https://www.beuth.de/de/norm/din-en-15978/164252701>; Stand: 30.05.2019
- [11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2017): Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik, Ausgabe 2017. Berlin
- [12] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi (Juni 2018): Die Energie der Zukunft. Sechster Monitoring-Bericht zur Energiewende [Berichtsjahr 2016]. Berlin
- [13] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi (August 2018): Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklungen und Trends in Deutschland 2018. Berlin
- [14] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BMWi (September 2018): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017. Berlin
- [15] Deutsche Energie-Agentur GmbH (2018): dena-GEBÄUDEREPORT KOMPAKT 2018. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Berlin

- [16] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2014): Mehr aus Energie machen - Nationaler Aktionsplan für Energieeffizienz
- [17] Pehnt M, Sterner M (2012): Fahrplan Energiewende
- [18] Öko-Institut e.V., Fraunhofer ISI (2014): Klimaschutzszenario 2050 – 1. Modellierungsrunde. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
- [19] Voss K, Wagner A, Maas A, Herkel S, Kalz D, Lützkendorf T, Hrsg. (2016): Performance von Gebäuden. Kriterien, Konzepte und Erfahrungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- [20] Lichtmeß M (2018): EnerCalc. Bergische Universität Wuppertal
- [21] TEK. Teilenergiekennwerte von Nichtwohngebäuden. IWU - Institut Wohnen und Umwelt
- [22] Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (2019): GEMIS Berichte & Dokumente. Im Internet: <http://iinas.org/gemis-dokumente.html>
- [23] DIN V 18599-1: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger. 2018. Aufl.
- [24] Lyslow L, Erhorn-Kluttig H, Erhorn H (2019): Tiefenbohrung. Energetische Gebäude- und Quartiersbilanzierung bei Anwendung von Primärenergiefaktoren und CO₂-Äquivalenten. Energiewendebauen - Wissenschaftliche Begleitforschung
- [25] Jurich K (2016): CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe. Climate Change
- [26] Icha P (2018): Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990-2017. Climate Change
- [27] Michael Memmler, Thomas Lauf, Katharina Wolf, Sven Schneider (2017): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger- Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016
- [28] Regett A, Heller C (2015): Relevanz zeitlich aufgelöster Emissionsfaktoren für die Bewertung tages- und jahreszeitlich schwankender Verbraucher. Energiewirtschaftliche Tagesfragen; 65 (7): 46–50
- [29] van Oehsen, Pehnt M, Jentsch M, et al. (2014): Benötigt man zeitlich aufgelöste Stromprimärenergiefaktoren in der Energieeinsparverordnung? Energiewirtschaftliche Tagesfragen; 64 (11): 67–72
- [30] Großklos M, Frank M (2013): Monatlicher Verlauf des kumulierten Energieverbrauchs und der Treibhausgas-Emissionen im deutschen Strommix. Energiewirtschaftliche Tagesfragen; 63 (9): 33–35
- [31] IWU - Institut Wohnen und Umwelt: TABULA-Analyses_DE. Im Internet: https://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/TABULA-Analyses_DE-Typology_DataTables.zip; Stand: 30.05.2019
- [32] IWU - Institut Wohnen und Umwelt: TABULA WebTool. Im Internet: <http://webtool.building-typology.eu>; Stand: 30.05.2019
- [33] IWU - Institut Wohnen und Umwelt (2012): TABULA - Typology Approach for Building Stock Energy Assessment. Scientific Report Germany - Further Development of the German Residential Building Typology. Darmstadt

- [34] IWU - Institut Wohnen und Umwelt, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung, Bergische Universität Wuppertal (2019): ENOB:dataNWG. Forschungsdatenbank Nichtwohngebäude [Stand der Erhebung] (15.03.2019). Im Internet: <https://www.datanwg.de/home/aktuelles/>; Stand: 04.06.2019
- [35] Dr. Veit Bürger, Dr. Tilman Hesse, Dietlinde Quack, Andreas Palzer, Benjamin Köhler, Sebastian Herkel, Dr. Peter Engelmann (2016): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050
- [36] Fraunhofer IWES/IBP (2017): Heat Transition 2030. Key technologies for reaching the intermediate and long-term climate targets in the building sector. Study commissioned by Agora Energiewende
- [37] Cischinsky H, Diefenbach N (2018): Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016
- [38] Beer M, Corradini R, Gobmaier T, Köll L, Podhajsky R, Vogler G, Zotz M (2009): CO₂-Verminderung in Deutschland. Teil 1 - Methodik und Zusammenfassung
- [39] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017. Berlin
- [40] Köhler B, Stobbe M, Garzia F (2018): CRAVEZERO - Guideline II: nZEB Technologies. Report on cost reduction potentials for technical NZEB solution sets
- [41] co2online gemeinnützige GmbH, Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (2015): Informationsbroschüre Klimaschutz und Energieeffizienz. Berlin
- [42] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit BMUB (April 2017): Klimaschutz in Zahlen. Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik [Ausgabe 2017]. Berlin
- [43] Deutsche Energie-Agentur GmbH (2018): Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. dena-GEBÄUDEREPORT KOMPAKT 2018
- [44] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019): Zahlen und Fakten Energiedaten. Nationale und Internationale Entwicklung (16.01.2019). Im Internet: Quelle https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Binaer/Energiedaten/energiedaten-gesamt.xls.xlsx?__blob=publicationFile&v=95; Stand: 30.05.2019
- [45] Fraunhofer ISI, Consentec GmbH, ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH (2017): Langfristszenarien für die Transformation des Energiesystems in Deutschland. Modul 1: Hintergrund, Szenarioarchitektur und übergeordnete Rahmenparameter Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. Karlsruhe, Aachen, Heidelberg
- [46] Boston Consulting Group, Prognos AG (2018): Klimapfade für Deutschland
- [47] BMVBS (2013): BMVBS-Online-Publikation, Nr. 27/2013. Systematische Datenanalyse im Bereich der Nichtwohngebäude – Erfassung und Quantifizierung von Energieeinspar- und CO₂-Minderungspotenzialen

Anhang A Sanierungs- und Neubauraten bzw. –flächen

Entwicklung des zukünftigen Gebäudebestands (beheizt) in Deutschland nach Basisszenario [45]

Gebäudetyp	2010 Mio. m ²	2030 Mio. m ²	2050 Mio. m ²
Entwicklung der beheizten Gebäudefläche			
EFH	1779	1895	1913
RH	687	761	789
KMFH	722	860	935
MMFH	398	434	444
GMFH	564	638	674
Mischnutzung	332	350	355
GHD	1077	1135	1150
Gesamt	5560	6073	6261

Gebäudetyp	2015-2020 % p.a.	2020-2030 % p.a.	2030-2040 % p.a.	2040-2050 % p.a.
Sanierungsrate				
EFH	1	1,5	1,9	2
RH	0,9	1,5	1,9	2,4
KMFH	1,3	1,6	1,9	2,5
MMFH	1,3	1,7	2	2,6
GMFH	1,1	1,7	2,1	2,7
NWG	1,3	2,2	2,7	3,4

Entwicklung des zukünftigen Gebäudebestands zur Zielerreichung eines nahezu klimaneutralen Gebäudebestands [35]. Annahme: Flächenentwicklung WG = +7 %, NWG = 0 % bis 2050

Gebäudetyp	2015 % p.a.	2013-2020 % p.a.	2021-2030 % p.a.	2031-2040 % p.a.	2041-2050 % p.a.	2050 % p.a.
Neubaurate						
WG	0,85	-	-	-	-	0,2
NWG	1,35	-	-	-	-	1,35
Sanierungsrate*						
WG&NWG	-	0,5 - 0,7	1,4 - 2,2	1,5 - 2,6	1,5 - 2,6	-

* Für die Sanierungsraten sind die Bereich zwischen den Zielbildern 40%, 50% und 70% angegeben. Die Prozentangaben spiegeln dabei die Reduktion des Endenergiebedarfs im Wohngebäudebereich in den verschiedenen Szenarien wieder.

Entwicklung des zukünftigen Gebäudebestands im Szenario 80%-Klimapfad [46]

<i>Gebäudetyp</i>	<i>2015</i> <i>Mio. m²</i>	<i>2050</i> <i>Mio. m²</i>
Flächenentwicklung		
EZFH	2227	896
MFH	1574	3589
GHD	2054	1632
Neubaufäche		
EZFH & MFH	693	693
GHD	204	203
Gesamt	897	896
Sanierte Fläche		
EZFH	-	1432
MFH	-	1049
GHD	-	869
Gesamt	-	3589
Mittlere Sanierungsrate		
EZFH	1,7	1,7
MFH	1,9	1,9
GHD	1,6	1,6

Anhang B Strukturen und Merkmale des Gebäudebestands

Struktur des Wohngebäudebestands in Deutschland [35]

<i>Baujahr</i>	<i>EFH</i>	<i>RH</i>	<i>KMH</i>	<i>MMH</i>	<i>GMH</i>
Anzahl Gebäude					
bis 1918	1.421.615	514.900	391.825	104.481	29.308
1919 - 1948	1.177.590	662.747	306.379	82.029	7.454
1949 - 1957	917.497	425.433	272.846	155.330	18.584
1958 - 1968	1.585.169	595.863	415.345	173.441	36.761
1969 - 1978	1.465.678	575.551	248.284	89.302	45.995
1979 - 1983	657.424	304.505	91.023	52.301	15.433
1984 - 1994	1.280.950	655.051	216.921	112.324	29.968
1995 - 2001	1.020.470	568.233	153.268	69.329	18.995
2002 - 2009	783.451	371.266	62.296	24.237	7.483
ab 2010	101.974	38.231	8.129	3.588	1.321

Wohngebäude, deren jeweilige Anzahl und zentrale geometrische Eigenschaften [35]

	<i>Anzahl Gebäude</i>	<i>Wohnfläche</i>	<i>Bruttovolumen</i>	<i>Nutzfläche A_N</i>	<i>Gebäudehüllfläch e</i>	<i>A/V-Verhältnis</i>
		<i>m²</i>	<i>m³</i>	<i>m²</i>	<i>m²</i>	<i>1/m</i>
Ein- und Zweifamilienhäuser (EFH, RH)						
Bis 1948	3.776.852	150,7	570,2	182,5	387,4	0,68
1949 - 1994	8.463.121					
Ab 1995	2.883.625					
Mehrfamilienhäuser (KMH, MMH)						
Bis 1948	884.714	394,4	1.435,5	459,4	746,6	0,52
1949 - 1994	1.827.117					
Ab 1995	320.846					
Große Mehrfamilienhäuser						
Bis 1948	36.762	1.801,6	6.531,8	2.090,2	2.467,3	0,38
1949 - 1994	146.741					
Ab 1995	27.798					

U-Werte, g-Werte und spezifischer Transmissionswärmeverlust der Gebäude-Hüllfläche bei den betrachteten Typgebäuden in deren Erbauungszustand ohne Berücksichtigung nachträglicher energetischer Sanierungsmaßnahmen auf Basis von Berechnungen [35]

	U_{AW} W/m ² K	U_{DA} W/m ² K	U_{FB} W/m ² K	U_w W/m ² K	g_w -	U_{door} W/m ² K	H'_T W/m ² K	
Ein- und Zweifamilienhäuser								
Bis 1948		1,77	1,57	1,47	3,39	0,75	3,00	1,77
1949 - 1994		1,13	0,81	1,24	3,50	0,75	3,00	1,27
Ab 1995		0,45	0,37	0,52	2,52	0,67	2,49	0,61
Mehrfamilienhäuser								
Bis 1948		1,92	1,78	1,10	3,28	0,75	3,00	1,86
1949 - 1994		1,15	1,00	1,68	3,32	0,75	3,25	1,43
Ab 1995		0,53	0,39	0,57	2,83	0,69	3,32	0,73
Große Mehrfamilienhäuser								
Bis 1948		1,59	0,96	1,15	3,50	0,75	3,00	1,68
1949 - 1994		1,15	0,77	1,34	3,29	0,75	3,45	1,40
Ab 1995		0,51	0,37	0,53	2,57	0,68	3,24	0,76

Nichtwohngebäude-Typologie: Einteilung in Nutzungsklassen erster und zweiter Ordnung, Gebäudeanzahl und Flächen [47]

<i>Nr.</i>	<i>Nutzungsklasse erster und zweiter Ordnung</i>	<i>Anzahl Gebäude</i>	<i>NGF [Mio. m²]</i>
1	Bildung	140.353	227,7
1.1	Allgemeinbildende Schule	66.593	163,8
1.2	Hochschulen und Forschung	21.800	45,6
1.3	Kindertagesstätten	51.961	18,3
2	Büro und Verwaltung	293.846	278,0
2.1	Regierungs- und Gerichtsgebäude	13.737	13,9
2.2	Verwaltungs-, Polizei- und Feuerwehrgebäude	253.830	234,6
2.3	Allgemeine Bürogebäude	26.279	29,5
3	Gewerbe und Industrie	1.778.006	602,4
3.1	Fabrikgebäude	77.045	163,9
3.2	Lagergebäude	62.711	49,9
3.3	Werkstattgebäude	276.227	64,6
3.4	Allgemeine Industrie- und Gewerbegebäude	1.362.023	323,9
4	Heilbehandlung	125.123	86,3
4.1	Krankenhäuser, Kliniken	12.244	59,3
4.2	Praxisgebäude und Gesundheitseinrichtungen	112.880	27,0
5	Handel und Dienstleistungen	304.298	182,0
5.1	Kaufhäuser	2.688	9,8
5.2	Einkaufszentren	10.750	35,4
5.3	Allgemeine Verkaufsgebäude	290.860	136,7
6	Sport	113.776	57,6
6.1	Sporthallen	24.786	24,6
6.2	Schwimmbädern	4.479	3,5
6.3	Allgemeine Sportbauten	84.511	29,7
7	Kultur	83.615	73,7
7.1	Museen, Bibliotheken und Ausstellungsgebäude	15.827	23,1
7.2	Oper, Theater und Veranstaltungshallen	23.293	22,2
7.3	Gebäude für kulturelle Zwecke	44.495	28,4
8	Beherbergung und Gastronomie	147.520	87,4
8.1	Hotels und Pensionen	37.627	39,0
8.2	Gaststätten und Restaurants	109.894	48,7
Summe		2.986.537	1.594,9

Anhang C Aktuelle und zukünftige THG-Emissionsfaktoren

THG-Emissionsfaktoren [23]

Energieträger ^a		Primärenergiefaktoren f_p		CO ₂ -Äquivalent x_{CO_2} g/kWh
		insgesamt	nicht erneuerbarer Anteil	nicht erneuerbarer Anteil
		A	B	C
dem Bilanzraum zugeführte Endenergien (Index „f.in“)				
Fossile Brennstoffe	Heizöl	1,1	1,1	310
	Erdgas	1,1	1,1	240
	Flüssiggas	1,1	1,1	270
	Steinkohle	1,1	1,1	400
	Braunkohle	1,2	1,2	430
Biogene Brennstoffe	Biogas	1,4	0,4	120
	Bioöl	1,4	0,4	190
	Holz	1,2	0,2	40
Nah-/Fernwärme	aus KWK ^b , fossiler Brennstoff bzw. Energieträger	0,7	0,7	c, e
	aus KWK ^b , erneuerbarer Brennstoff bzw. Energieträger	0,7	0,0	c, e
	aus Heizwerken, fossiler Brennstoff bzw. Energieträger	1,3	1,3	c, e
	allgemeiner Fall	c	c	c
Fernkälte	allgemeiner Fall	c	c	c
Strom	allgemeiner Strommix	2,8	1,8	550
innerhalb der Bilanzgrenzen nutzbar gemachte Endenergien (Index „f.prod“)				
Umweltenergie	Wärme (Erdwärme, Geothermie, Solarthermie, Umgebungswärme)	1,0	0,0	0
	Kälte (Erdkälte, Umgebungskälte)	1,0	0,0	0
	Strom (aus Photovoltaik, Windkraft)	1,0	0,0	0
Abwärme	aus Prozessen, siehe 3.1.32	1,0	0,0	40
aus dem Bilanzraum abgeführte Endenergien (Index „f.out“)				
Strom	Verdrängungsstrommix für KWK	2,8	2,8	860
	Verdrängungsstrommix für PV, WEA	2,8	1,8	550
thermische Energien	Wärme für andere Verbraucher	d	d	d
	Kälte für andere Verbraucher	d	d	d
Abwärme	aus Prozessen, siehe 3.1.32	1,0	0,0	40
^a Bezugsgröße Endenergie: Heizwert H_i . ^b Angaben sind typisch für durchschnittliche Nah-/Fernwärme mit einem Anteil der KWK von 70 %. ^c Individuelle Berechnung für das Netz, aus dem der Bezug erfolgt, siehe A.4. ^d Individuelle Berechnung für das Netz, in welches die Einspeisung erfolgt, siehe A.4. ^e Eine Angabe von Standardwerten ist aufgrund der unterschiedlichen Energieträgermixe nicht möglich.				

Prognosen zur künftigen Entwicklung von THG-Emissionsfaktoren aus [25, 35]

	<i>Strom (Bundesmix)</i>	<i>Fernwärme</i>	<i>Fossile Energieträger</i>			
	<i>kg_{CO2äq}/kWh</i>	<i>kg_{CO2äq}/kWh</i>	<i>Heizöl</i> <i>kg_{CO2äq}/kWh</i>	<i>Erdgas</i> <i>kg_{CO2äq}/kWh</i>	<i>Steinkohle</i> <i>kg_{CO2äq}/kWh</i>	<i>Braunkohle</i> <i>kg_{CO2äq}/kWh</i>
2019	0,537	0,280	0,294-0,266	0,202	0,337	0,381
2020	0,393	0,203	-	-	-	-
2030	0,274	0,195	-	-	-	-
2040	0,165	0,145	-	-	-	-
2050	0,078	0,090	-	-	-	-

Anhang D Endenergiebedarf national

Quelle [44]

<i>Jahr</i>		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
		<i>TWh</i>									
Endenergieverbrauch national		2.544,1	2.407,0	2.586,0	2.467,0	2.477,4	2.549,6	2.416,3	2.471,7	2.519,7	2.591,3
Industrie	Summe	718,5	636,4	720,1	731,7	718,6	708,5	707,1	707,7	724,8	750,1
Raumwärme	Summe	55,4	60,4	60,5	62,3	61,4	53,5	45,4	46,2	43,3	42,4
	Öl	6,6	7,8	7,2	6,0	6,5	4,5	3,2	2,8	2,3	2,5
	Gas	33,8	33,8	34,2	36,0	35,2	32,8	27,6	28,7	26,7	25,9
	Strom	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
	Fernwärme	6,6	8,3	7,8	8,3	10,3	7,8	6,1	5,9	5,1	5,0
	Kohle	2,1	2,3	2,3	2,5	2,5	2,0	1,8	1,8	2,5	2,4
	Erneuerbare	4,8	6,5	7,3	8,0	5,4	5,2	5,8	5,9	5,7	5,6
	Sonstige	0,5	0,8	0,7	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Warmwasser	Summe	6,4	6,6	6,6	6,6	6,5	4,4	4,5	4,5	4,5	4,6
Prozesswärme	Summe	462,8	408,6	470,2	475,0	462,4	458,7	461,8	466,4	483,1	504,1
	Öl	32,3	28,0	25,5	21,6	19,7	17,0	12,7	13,5	15,5	22,7
	Gas	218,0	181,5	213,8	213,4	207,8	213,2	211,9	209,7	217,9	227,2
	Strom	39,9	40,3	40,4	40,5	40,5	38,1	39,1	40,0	39,0	39,6
	Fernwärme	28,9	33,0	32,0	38,0	47,6	44,2	41,8	41,7	44,1	45,1
	Kohle	104,2	85,5	108,0	110,4	107,6	109,3	111,2	118,3	119,9	122,3
	Erneuerbare	22,1	20,1	30,8	24,3	17,0	20,0	25,2	24,0	26,0	27,0
	Sonstige	17,4	20,2	19,8	26,9	22,2	17,0	19,8	19,1	20,8	20,2
Klimakälte	Strom	4,9	4,6	4,6	4,7	4,8	4,7	4,8	4,8	4,8	4,9
Prozesskälte	Strom	5,2	5,0	5,3	5,3	5,3	4,8	4,9	4,9	10,3	10,6
Mech. Energie	Summe	163,3	132,6	153,3	157,7	158,0	163,1	166,6	162,4	160,6	165,1
	Öl	0,1	0,1	0,1	0,0	1,6	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4
	Gas	2,9	2,8	2,9	2,8	2,8	6,6	6,7	6,8	6,8	7,1
	Strom	160,3	129,7	150,4	154,8	153,6	156,2	159,7	155,5	153,3	157,6
IKT	Strom	9,4	8,2	9,1	9,3	9,3	9,1	9,3	9,2	9,1	9,3
Beleuchtung	Strom	11,1	10,4	10,4	10,8	11,0	10,1	9,8	9,4	9,0	9,1
Verkehr	Summe	714,2	705,8	710,9	713,3	710,7	725,4	726,5	728,0	747,1	765,4
Raumwärme	Summe	4,3	3,4	3,6	3,6	3,4	3,5	3,5	3,4	3,5	3,6
	Öl	3,3	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8	2,9
	Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Strom	0,8	0,8	0,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	Fernwärme	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kohle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Erneuerbare	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Warmwasser	Summe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Prozesswärme	Summe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Klimakälte	Summe	0,1	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8

<i>Jahr</i>		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
		<i>TWh</i>									
	Öl	0,0	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	Strom	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Erneuerbare	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Mech. Energie	Summe	700,8	695,5	700,1	702,5	700,6	715,0	716,2	717,7	736,5	754,6
	Öl	649,9	648,1	650,3	653,8	654,7	672,0	672,3	676,6	695,4	713,1
	Gas	2,0	2,3	2,4	2,4	2,4	2,0	2,1	2,0	1,6	1,4
	Strom	14,0	13,5	14,1	14,1	10,2	10,2	9,8	9,6	9,9	10,0
	Fernwärme	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Kohle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Erneuerbare	34,9	31,5	33,2	32,1	33,2	30,9	32,0	29,5	29,6	30,0
IKT	Summe	4,7	2,9	2,9	2,9	2,7	2,7	2,7	2,7	2,8	2,9
	Öl	3,8	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,1	2,1	2,2
	Strom	0,8	0,8	0,8	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Erneuerbare	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Beleuchtung	Summe	4,4	3,4	3,6	3,6	3,3	3,5	3,5	3,4	3,5	3,6
	Öl	3,3	2,5	2,6	2,6	2,6	2,7	2,7	2,7	2,8	2,9
	Strom	0,8	0,8	0,9	0,8	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
	Erneuerbare	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Gas	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
GHD	Summe	400,8	376,5	411,8	373,9	373,7	405,6	375,0	396,6	387,8	400,9
Raumwärme	Summe	201,5	175,9	198,0	166,8	163,0	199,0	176,2	187,7	178,6	192,6
	Öl	57,5	48,5	49,6	41,1	44,3	50,7	46,6	45,8	45,5	46,0
	Gas	95,2	93,9	100,9	89,1	84,6	99,8	91,1	96,1	94,7	108,3
	Strom	8,1	6,5	5,3	4,0	4,6	6,3	5,0	5,7	6,0	5,9
	Fernwärme	34,6	22,0	30,7	19,0	10,6	14,5	12,3	13,0	10,1	10,0
	Kohle	4,3	2,7	3,5	4,6	1,2	0,2	0,6	1,2	0,3	0,3
	Erneuerbare	1,7	2,4	8,0	8,9	17,8	27,5	20,6	26,0	22,1	22,2
Warmwasser	Summe	18,1	19,6	20,5	20,3	20,8	18,2	17,4	18,1	17,6	18,7
	Öl	5,6	4,4	4,6	3,9	4,2	3,9	3,7	3,5	3,5	3,6
	Gas	6,1	7,2	6,2	7,6	6,4	5,0	5,4	5,7	5,3	6,2
	Strom	3,3	5,4	6,0	5,8	6,0	5,8	5,6	5,8	5,9	6,0
	Fernwärme	2,2	1,6	2,3	1,4	0,8	1,2	0,9	0,8	0,7	0,7
	Erneuerbare	0,9	1,1	1,5	1,7	3,4	2,3	1,9	2,3	2,2	2,2
Prozesswärme	Summe	32,7	26,2	31,1	29,5	28,4	27,8	25,7	27,1	26,0	28,1
	Öl	9,9	9,2	9,3	7,9	8,3	8,4	3,7	3,6	3,6	3,7
	Gas	13,2	7,4	9,8	11,0	9,4	8,5	10,4	10,8	10,7	12,5
	Strom	6,8	5,2	5,5	5,4	5,6	7,1	6,8	7,3	7,4	7,5
	Fernwärme	2,6	4,0	5,0	3,5	1,9	1,2	2,2	2,4	1,9	1,9
	Erneuerbare	0,3	0,3	1,4	1,6	3,2	2,6	2,5	3,1	2,6	2,6
Klimakälte	Summe	2,3	3,6	3,9	3,8	3,9	3,7	3,6	3,7	3,7	3,9
	Gas	0,1	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8
	Strom	2,2	3,1	3,2	3,1	3,3	3,1	2,9	3,1	3,1	3,1

<i>Jahr</i>		2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
		<i>TWh</i>									
Prozesskälte	Summe	9,6	9,4	10,3	10,1	10,5	12,6	12,1	13,0	13,1	13,4
	Gas	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Strom	8,9	9,4	10,3	10,0	10,5	12,6	12,0	12,9	13,1	13,3
Mech. Energie	Summe	60,4	61,4	63,9	62,6	62,2	65,6	65,1	69,5	70,6	71,8
	Öl	29,8	31,0	30,6	30,9	29,1	28,0	29,3	31,7	32,7	32,7
	Gas	0,5	0,0	0,5	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3
	Strom	30,1	30,4	32,8	31,7	33,1	37,4	35,6	37,6	37,7	38,7
IKT	Strom	20,6	22,4	22,9	21,9	23,0	24,6	23,3	24,0	24,1	24,7
Beleuchtung	Strom	55,7	57,9	61,1	58,9	61,8	54,1	51,5	53,5	53,9	47,5
Priv. Haushalte	Summe	710,6	688,3	743,2	648,2	674,3	710,0	607,8	639,3	660,1	674,9
Raumwärme	Summe	509,0	489,3	549,4	433,1	460,0	504,6	409,1	440,1	459,5	464,2
	Öl	155,5	136,5	139,0	109,0	124,8	144,0	118,5	116,3	115,0	116,2
	Gas	222,6	215,6	243,3	189,5	203,9	218,9	172,5	194,0	205,7	212,2
	Strom	16,8	15,4	18,8	9,2	8,8	9,4	9,1	9,0	8,4	8,2
	Fernwärme	42,0	44,9	49,3	40,4	42,4	47,4	38,7	43,4	47,2	46,4
	Kohle	11,4	10,5	14,9	16,1	8,4	7,9	6,7	7,9	6,1	6,1
	Erneuerbare	60,8	66,4	84,1	69,0	71,7	77,0	63,5	69,5	77,0	75,2
Warmwasser	Summe	94,4	93,4	90,1	105,9	104,1	95,9	92,3	92,4	94,2	103,4
	Öl	24,1	18,5	17,3	22,5	23,8	17,8	18,9	17,5	16,9	19,1
	Gas	45,5	48,6	45,7	50,9	49,6	48,2	43,3	44,2	46,5	53,0
	Strom	17,2	18,9	20,0	19,3	19,0	18,4	15,2	15,2	15,4	15,6
	Fernwärme	3,6	4,1	3,3	5,2	5,1	3,9	3,9	4,0	4,2	4,4
	Kohle	1,1	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Erneuerbare	2,9	3,2	3,8	8,0	6,3	7,7	11,1	11,6	11,2	11,4
Prozesswärme	Summe	39,1	38,8	38,1	39,5	40,2	39,6	38,5	38,2	39,4	39,7
	Gas	0,9	0,7	0,7	1,0	1,0	1,2	1,0	1,1	0,9	1,1
	Strom	38,1	38,0	37,4	38,5	39,2	38,5	37,5	37,2	38,4	38,6
Klimakälte	Strom	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
Prozesskälte	Strom	27,8	27,6	27,1	29,0	29,2	29,9	29,1	28,9	28,5	28,6
Mech. Energie	Summe	4,0	3,3	3,3	3,4	3,4	4,7	4,6	5,8	5,7	5,7
	Öl	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	1,2	1,2
	Strom	3,3	3,3	3,3	3,4	3,4	4,7	4,6	4,6	4,5	4,5
IKT	Strom	24,1	23,8	23,4	24,6	24,7	22,8	22,2	22,0	21,4	21,5
Beleuchtung	Strom	12,2	12,1	11,8	12,7	12,7	11,2	10,9	10,7	10,2	10,4

Abkürzungen

EFH	Einfamilienhaus
EZFH	Ein- und Zweifamilienhäuser
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GMFH, GMH	Großes Mehrfamilienhaus
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
KMFH, KMH	Kleines Mehrfamilienhaus
MMFH, MMH	Mittleres Mehrfamilienhaus
NWG	Nichtwohngebäude
RH	Reihenhaus
THG	Treibhausgas
WG	Wohngebäude
NWG	Nichtwohngebäude