

TREIBHAUSGAS-PROJEKTIONEN FÜR DEUTSCHLAND

Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland: Daten- und Modelldokumentation



TREIBHAUSGAS-PROJEKTIONEN FÜR DEUTSCHLAND

REFOPLAN des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 37K2 44 201 0

FB002057

Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland: Daten- und Modelldokumentation

von

Hannah Förster, Christian Winger, Lukas Emele, Franziska
Flachsbarth, Wolf Kristian Görz, Markus Haller, Wolfram
Jörß, Matthias Koch, Sylvie Ludig, Margarethe Scheffler
Öko-Institut e.V., Freiburg

Malte Bei der Wieden
Öko-Institut Consult GmbH, Berlin

Michael Krail, Luna Lütz, Tim Mandel, Weiya Yan
Fraunhofer ISI, Karlsruhe

Julian Emmerich, Wolfgang Schade, Marcel Streif,
Christoph Walther
M-Five, Karlsruhe

Jana Deurer, Jan Steinbach
IREES, Karlsruhe

Mohammad Alkasabreh, Andreas Kemmler, Sven
Kreidelmeyer, Jan Limbers, Sebastian Lübbers, Fabian
Muralter
Prognos, Basel, Berlin

Roland Fuß, Jörg Rieger, Joachim Rock, Wolfgang Stümer,
Cora Vos, Alexander Gocht, Davit Stepanyan
Thünen-Institut, Braunschweig, Eberswalde

Sebastian Wunderlich, Lukas Albrecht
Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Öko-Institut e.V.
Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg

Abschlussdatum:

April 2025

Redaktion:

Fachgebiet V 1.2 Strategien und Szenarien zu Klimaschutz und Energie
Sebastian Wunderlich, Kerstin Berger (Layout)

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-8283>

Dessau-Roßlau, März 2026

Creative Commons Attribution 4.0 International

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen*Autoren.

Kurzbeschreibung: Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland: Daten- und Modelldokumentation

Die Bundesregierung ist gemäß der Governance-Verordnung der EU (Verordnung (EU) 2018/1999) und des Bundes-Klimaschutzgesetzes verpflichtet, Treibhausgas-Projektionen zu erstellen. Die Treibhausgas-Projektionen projizieren die mögliche zukünftige Entwicklung der Emission von Treibhausgasen in Deutschland auf der Basis der möglichen Wirkung klimaschutzrelevanter Politiken und Maßnahmen. In § 5a des KSG weist die Bundesregierung das Umweltbundesamt an, Daten zu den Treibhausgas-Projektionen (Projektionsdaten) zu erstellen und dafür ein Forschungskonsortium zu beauftragen.

Das beauftragte Forschungskonsortium und das Thünen-Institut projizieren die Szenarien mit Hilfe von Computermodellen. Computermodelle können reale Gegebenheiten nicht vollständig abbilden. Zum einen ist die Realität sehr vielschichtig und zukünftige Entwicklungen sind unsicher. Zum anderen können die Modellierenden nicht alle Daten berücksichtigen, um reale Gegebenheiten 1:1 zu abbilden, da nicht alle relevanten Daten zugänglich sind bzw. im Rahmen der vorgegebenen Fristen und Kapazitäten analysiert werden können.

Die Anforderungen, Relevanz und Eigenschaften der Projektionen machen deutlich, dass es für deren Verständnis sehr relevant ist, verwendete Daten und Modelle transparent und nachvollziehbar zu dokumentieren. Dies hat auch der Expertenrat für Klimafragen in seinem Gutachten zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024 unterstützt.

Die Transparenz und Dokumentation der Daten und Modelle sind daher ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens (FKZ: 37K2442010) zur Erstellung der Treibhausgas-Projektionen 2025, 2026 und 2027. Der vorliegende Bericht erläutert das inhaltlich-methodische Vorgehen zur Erstellung der Daten- und Modelldokumentation der Projektionen 2025 und bildet eine Dokumentation der verwendeten Modelle ab.

Abstract: 2025 greenhouse gas projections for Germany – data and model documentation

The German government is required to produce greenhouse gas projections in accordance with the EU Governance Regulation (Regulation (EU) 2018/1999) and the Federal Climate Action Act. The greenhouse gas (GHG) projections forecast the possible future development of greenhouse gas emissions in Germany based on the possible impact of climate policies and measures. In Section 5a of the Climate Action Act, the German government instructs the German Environment Agency to compile data on greenhouse gas projections (projection data) and to commission a research consortium for this purpose.

The commissioned research consortium and the Thünen Institute project the scenarios using computer models. Computer models cannot fully reflect real-world conditions. On the one hand, reality is very complex and future developments are uncertain. On the other hand, modellers cannot take all data into account to perfectly reflect real-world conditions, as not all relevant data is accessible or can be analysed within the scope of the given time frames and capacities.

The requirements, relevance and characteristics of the projections make it clear that documenting the data and models used in a transparent and comprehensible manner is very important for understanding them. This was also supported by the Council of Experts on Climate Change in its report on the review of the 2024 GHG projection data.

The transparency and documentation of the data and models are therefore an essential part of the research project (FKZ: 37K2442010) to produce the 2025, 2026, and 2027 GHG projections. This report explains the content-related and methodological approach used to create the data and model documentation for the 2025 projections and documents the models used.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	8
Tabellenverzeichnis	8
Abkürzungsverzeichnis	9
1 Einleitung und Konzeption	12
1.1 Dokumentation der Daten	13
1.2 Dokumentation der Modelle	14
1.3 Formulierungsleitfaden für die Faktenblätter zu den Modellen	15
1.3.1 Präzise Benennen und präzise Referenzieren	15
1.3.2 Deskriptive Erläuterung	16
1.3.3 Begründen und Reflektieren.....	16
2 Datenschema.....	17
2.1 Modell	17
2.2 Datensatz	19
2.3 Distribution	23
3 Faktenblätter zu den Modellen.....	25
3.1 ASTRA-M	25
3.2 CAPRI.....	39
3.3 ENUSEM	43
3.4 FORECAST-Industry	54
3.5 FORECAST-Residential.....	61
3.6 FORECAST-Tertiary.....	68
3.7 Invert/EE-Lab.....	71
3.8 IPCC Waste Model.....	77
3.9 LaWiEnMod.....	81
3.10 LULUCFmod.....	86
3.11 Matrix.....	89
3.12 PowerFlex.....	91
3.13 ProFi	99
3.14 Py-GAS-EM	103
3.15 TEMPS	107
3.16 VIEW.....	113
3.17 WInfra	117
3.18 WoodCarbonMonitor.....	124

4	Faktenblätter zu den Daten.....	128
5	Zugang zu zentralen Daten der Treibhausgas-Projektionen 2025	129
6	Data Cube des Umweltbundesamtes	130
7	Quellenverzeichnis	131

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Visualisierung des ASTRA-M Modells und dessen Funktionsweisen.....	36
Abbildung 2:	Visualisierung des CAPRI Modells und dessen Funktionsweisen	43
Abbildung 3:	VBA Implementierung der oben dargestellten Emissionsformel für ENUSEM	46
Abbildung 4:	Visualisierung des ENUSEM-Modells und dessen Funktionsweisen.....	53
Abbildung 5:	Visualisierung des FORECAST-Industry Modells und dessen Funktionsweisen	61
Abbildung 6:	Visualisierung des FORECAST-Residential Modells und dessen Funktionsweisen.....	68
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumenten im Modell Invert/EE-Lab.....	75
Abbildung 8:	Visualisierung des Modells Invert/EE-Lab und dessen Funktionsweisen	77
Abbildung 9:	Visualisierung des LaWiEnMod Modells und dessen Funktionsweisen.....	86
Abbildung 10:	Visualisierung des PowerFlex Modells und dessen Funktionsweisen.....	99
Abbildung 11:	Visualisierung des TEMPS Modells und dessen Funktionsweisen	111
Abbildung 12:	Visualisierung des VIEW Modells und dessen Funktionsweisen	116
Abbildung 13:	Räumliche Darstellung der Wärmebedarfe in Deutschland auf Basis eines 100 m × 100 m Rasters.....	119
Abbildung 14:	Übersicht der Inputdaten und der Datenaggregation im WInfra-Modell	121
Abbildung 15:	Modellierungsprozess in WInfra	122

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Subsektoren des Energiesystems in ENUSEM	50
Tabelle 2:	Andere Sektoren in ENUSEM.....	51
Tabelle 3:	Sub-Sektoren in LaWiEnMod.....	84

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AGEB	Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen
AGEE-Stat	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik
BECCS	Bioenergy carbon capture and storage (Bioenergie mit CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
BEHG	Brennstoffemissionshandelsgesetz
BHKW	Blockheizkraftwerk
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BNetzA	Bundesnetzagentur
BWI	Bundeswaldinventur
CAPEX	Capital expenditure (Investitionsausgaben)
CCS	Carbon Capture and Storage (CO ₂ -Abscheidung und -Speicherung)
CH ₄	Methan
CNG	Compressed Natural Gas (komprimiertes Erdgas)
CO ₂	Kohlendioxid
CRF	Common Reporting Format
CRT	Common Reporting Table
DOC	Dissolved organic carbon (gelöster organischer Kohlenstoff)
EE	Erneuerbare Energie
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EEV	Endenergieverbrauch
EH	Effizienzhaus
ERK	Expertenrat für Klimafragen
ESR	Effort Sharing Regulation (Lastenteilungsverordnung)
ESS	Europäisches Statistisches System
EU-ETS	EU Emissions Trading System (EU Emissionshandelssystem)
FKW	Perfluorierte Kohlenwasserstoffe
GAMS	General Algebraic Modeling System
GEG	Gebäudeenergiegesetz
GHD	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen
GHG	Greenhouse gas (Treibhausgas)
H ₂	Wasserstoff
HBEFA	Handbuch für Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs

Abkürzung	Erläuterung
HFKW	Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen / Weltklimarat)
KBA	Kraftfahrt-Bundesamt
KEP	Kurier-Express-Paket (-Dienst)
KiD	Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungs-Gesetz
Lkw	Lastkraftwagen
LNF	Leichte Nutzfahrzeuge
LNG	Liquefied natural gas (Flüssigerdgas)
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft)
MiD	Mobilität in Deutschland
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MNL	Multinomiales Logit-Modell
MOP	Deutsches Mobilitätspanel
MWMS	Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario
N₂O	Distickstoffoxid/Lachgas
NID	National Inventory Document (Nationaler Inventarbericht)
nEHS	Nationales Emissionshandelssystem
NF₃	Stickstofftrifluorid
NUTS	Nomenclature des unités territoriales statistiques
OPEX	Operational expenditure (Betriebskosten)
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
PID	Persistent Identifier (Dauerhafter Identifikator)
Pkm	Personenkilometer
Pkw	Personenkraftwagen
PMP	Positive Mathematical Programming
PtL	Power-to-Liquid (strombasierter/synthetischer Flüssigkraftstoff)
PV	Photovoltaik
SDMX	Statistical Data and Metadata Exchange

Abkürzung	Erläuterung
SF6	Schwefelhexafluorid
SIS-CC	Statistical Information System Collaboration Community
SNF	Schwere Nutzfahrzeuge
SPFV	Schienenpersonenfernverkehr
SPNV	Schienenpersonennahverkehr
SSU	Straßen-, Stadt- und U-Bahnen
TCO	Total Cost of Ownership
THG	Treibhausgas
Tkm	Tonnenkilometer
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VBA	Visual Basic for Applications
ZSE	Zentrales System Emissionen

Der Inhalt der vorliegenden Veröffentlichung entspricht dem Inhalt der Internetseite zur Daten- und Modelldokumentation der Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland:

Förster, H.; Winger, C.; Emele, L.; Flachsbarth, F.; Görz, W.K; Haller, M.; Jörß, W.; Koch, M.; Ludig, S.; Scheffler, M.; bei der Wieden, M.; Krail, M.; Lütz, L.; Mandel, T.; Yan, W.; Emmerich, J.; Schade, W.; Streif, M.; Walther, C.; Deurer, J.; Steinbach, J.; Alksabreh, M.; Kemmler, A.; Kreidelmeyer, S.; Limbers, J.; Lübbers, S.; Muralter, F.; Gocht, A.; Fuß, R.; Rieger, J.; Rock, J.; Stepanyan, D.; Stümer, W.; Vos, C.; Wunderlich, S.; Albrecht, L. (2025): Daten- und Modelldokumentation der Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Herausgeber: Umweltbundesamt. URL: <https://thg-projektionen2025-daten-modell-dokumentation-788cd5.usercontent.opencode.de/>.

Aus technischen Gründen konnten die Faktenblätter zu den Daten und die Graphen zu den Datenflüssen nicht in die vorliegende Veröffentlichung übernommen werden. An den Texten sind lediglich redaktionelle Änderungen vorgenommen worden.

1 Einleitung und Konzeption

Die Treibhausgas-Projektionen (kurz THG-Projektionen oder Projektionen) projizieren die mögliche zukünftige Entwicklung der Emission von Treibhausgasen in Deutschland. Die Projektionen umfassen ein "Mit-Maßnahmen-Szenario" und ein "Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario". Beide projizierten Szenarien zeigen, auf welche mögliche Wirkung klimaschutzrelevante Politiken und Maßnahmen auf die Emission von Treibhausgasen haben (siehe Harthan et al. (2024), Kapitel 2.4). Gemäß Governance Verordnung (Verordnung (EU) 2018/1999, 2018) sowie den dazugehörigen Durchführungsverordnungen (Durchführungsverordnung (EU) 2022/2299, 2022; Durchführungsverordnung (EU) 2020/1208, 2020) sind die Projektionen eine zweijährige Berichterstattungspflicht an die Europäische Kommission und die Europäische Umweltagentur. Die Novelle des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG, 2024) ergänzt in § 5a die europäische Berichterstattung um eine jährliche nationale Berichtspflicht zu den Treibhausgas-Projektionen. In § 5a des KSG weist die Bundesregierung das Umweltbundesamt an, Daten zu den Treibhausgas-Projektionen (Projektionsdaten) zu erstellen und dafür ein Forschungskonsortium zu beauftragen. Die an die Bundesregierung zu berichtenden Projektionsdaten umfassen die Ergebnisse des „Mit-Maßnahmen-Szenarios“. Am 15. März leitet das Umweltbundesamt die Projektionsdaten dem Expertenrat für Klimafragen (ERK) und dem Deutschen Bundestag zu. Dies geschieht parallel zur Veröffentlichung der Emissionsdaten nach § 5 KSG. Grundlage für die Prüfung des ERK sind also die Ergebnisdaten des "Mit-Maßnahmen-Szenarios". Für den Fall, dass der ERK feststellt, dass Deutschland seine Klimaschutzziele nicht einhält, muss die Bundesregierung Maßnahmen ergreifen, um die Ziele wieder zu erreichen (vgl. § 8 KSG).

Das beauftragte Forschungskonsortium und das Thünen-Institut projizieren die Szenarien mit Hilfe von Computermodellen. Computermodelle können reale Gegebenheiten (zum Beispiel die deutsche Volkswirtschaft oder die deutschen Stromnetze) nicht vollständig abbilden. Zum einen ist die Realität sehr vielschichtig und zukünftige Entwicklungen sind unsicher. Zum anderen können die Modellierenden nicht alle Daten berücksichtigen, um reale Gegebenheiten 1:1 zu abbilden. Grund hierfür ist, dass nicht alle relevanten Daten zugänglich sind bzw. im Rahmen der vorgegebenen Fristen und Kapazitäten analysiert werden können. Folglich gibt es nicht eine Möglichkeit, reale Gegebenheiten zu modellieren und Computermodellen liegen außerdem unterschiedliche Theorien, Annahmen und Sichtweisen zu Grunde. Unter Beachtung der rechtlichen Vorgaben der Berichterstattung treffen das beauftragte Forschungskonsortium, das Thünen-Institut und das Umweltbundesamt Annahmen für die Modellierung der Projektionsszenarien und müssen mit Informationslücken umgehen (vgl. Leistungsbeschreibung (Forschungskennziffer (FKZ): 37K2442010), S. 4; vgl. Ellenbeck & Lilliestam, 2019; Dieckhoff et al., 2014; Grunwald, 2011; acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften et al., 2015; Thompson, 2022).

Die Anforderungen, Relevanz und Eigenschaften der Projektionen machen deutlich, dass es für deren Verständnis sehr relevant ist, verwendete Daten und Modelle transparent und nachvollziehbar zu dokumentieren (vgl. Leistungsbeschreibung (FKZ: 37K2442010), S. 4-5). Auch der Expertenrat für Klimafragen ist in seinem Gutachten zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024 zu der Einschätzung gekommen, dass

"[e]ine hohe Transparenz des Prozesses zur Erstellung der Projektionsdaten sowie hinsichtlich der verwendeten Daten und Annahmen [...] ein wesentliches Element für die Schaffung einer hohen Glaubwürdigkeit [ist]. Im Hinblick auf die Modellierung, die eingehenden Rahmendaten, die implementierten Maßnahmen und die Ergebnisdaten bedeutet dies, dass eine möglichst übersichtliche, vollständige, nachvollziehbare und der Öffentlichkeit zugängliche Dokumentation notwendig ist" (Expertenrat für Klimafragen [ERK], 2024, RN 166).

Die Transparenz und Dokumentation der Daten und Modelle ist ein wesentlicher Bestandteil des Forschungsvorhabens (FKZ: 37K2442010) zur Erstellung der Treibhausgas-Projektionen 2025, 2026 und 2027. Das Arbeitspaket 1 (Literatur, Transparenz und Dokumentation von Daten und Modellen) des Forschungsvorhabens gibt für diese Arbeiten den Rahmen vor. Die folgenden Abschnitte erläutern das inhaltlich-methodische Vorgehen zur Erstellung der Daten- und Modelldokumentation der Projektionen 2025.

1.1 Dokumentation der Daten

Für die Projektionen unterteilen Forschungskonsortium, Thünen-Institut und Umweltbundesamt die verwendeten und erzeugten Daten in

- ▶ Rohdaten
- ▶ Modell-Inputdaten
- ▶ Modell-Outputdaten
- ▶ veröffentlichte Ergebnisdaten

(vgl. Leistungsbeschreibung (FKZ: 37K2442010), S. 11; Morrison, 2018; Pfenninger et al., 2018). Die Rohdaten sind Daten, die zumeist aus externen Quellen stammen. Hierzu gehören zum Beispiel Daten der amtlichen Statistik (Eurostat, Destatis) und Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB). Eine Ausnahme sind die vom Thünen-Institut erstellten Daten (u. a. Emissionsfaktoren, Inventurergebnisse zu Flächen und Wald), die es nutzt, um die Projektionen in den Sektoren Land- und Forstwirtschaft zu modellieren. Die aktuellen Daten der Treibhausgas-Emissionen und der Erneuerbaren Energien-Statistik stellt das Umweltbundesamt bzw. die Geschäftsstelle der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik am Umweltbundesamt zur Verfügung. Zumeist müssen die Modellierenden die Rohdaten weiterverarbeiten (sogenanntes Pre-Processing), um sie für die Modellierung nutzen zu können. Diese verarbeiteten Daten sind die Modell-Inputdaten. Die unbearbeiteten Ergebnisdaten der Modelle sind die Modell-Outputdaten, die Thünen-Institut und Forschungskonsortium ebenfalls weiterbearbeiten, damit das Umweltbundesamt sie als Ergebnisdaten veröffentlichen kann.

Unter Rückgriff auf etablierte Standards hat das Umweltbundesamt (Fachgebiet V 1.2) eine Auswahl an Dokumentationskategorien für die Dokumentation der Daten zusammengestellt. Jede Kategorie wird durch eine Beschreibung, die die zu dokumentierenden Inhalte erläutert, ergänzt. Die Beschreibungen hat das Umweltbundesamt den verwendeten Standards entnommen bzw. diese entsprechend der Erfordernisse der Treibhausgas-Projektionen ergänzt und konkretisiert. Die Dokumentationskategorien hat das Umweltbundesamt zu Beginn des Berichtszyklus der Treibhausgas-Projektionen 2025 mit dem Öko-Institut als Projektleitung des Forschungskonsortiums und dem Thünen-Institut erörtert.

Der zentrale Standard zur Dokumentation struktureller Metadaten (unter anderem Informationen zu verantwortlichen Personen und Organisationen, Datum der Erstellung und Aktualisierung, Ort der Veröffentlichung, vgl. auch Eurostat, o.J.) von Daten ist das DCAT-AP.de Metadatenmodell. Gemäß der Entscheidung des IT-Planungsrates von Juni 2018 ist DCAT-AP.de der Standard für den Austausch von Metadaten zwischen deutschen Open Data Portalen. Das Umweltbundesamt hat zentral entschieden, welche Kategorien des DCAT-AP.de Metadatenmodells für vom Umweltbundesamt veröffentlichte Datensätze verpflichtend und optional sind. An dieser Entscheidung hat sich das Fachgebiet V 1.2 für die Treibhausgas-Projektionen orientiert. Bei den optionalen Kategorien des DCAT-AP.de Metadatenmodells hat das Fachgebiet V 1.2 eine eigenständige Auswahl mit Blick auf die Relevanz für die Treibhausgas-Projektionen getroffen. Für die Treibhausgas-Projektionen 2025 ist die Version 2.0 des DCAT-

AP.de Metadatenmodells verwendet worden. Am 12. Dezember 2024 haben die für DCAT-AP.de verantwortlichen Stellen die Version 3.0 veröffentlicht. Das Fachgebiet V 1.2 konnte die Dokumentationskategorien im laufenden Berichtszyklus nicht aktualisieren, da am 12. Dezember 2024 das Thünen-Institut und das Forschungskonsortium mit der Modellierung und den Dokumentationsarbeiten bereits begonnen haben.

Für die Dokumentation der referenziellen Metadaten (unter anderem Informationen zu verwendeten Konzepten, Methoden und Qualität, vgl. auch Eurostat, o.J.) der verwendeten und erzeugten Daten für die Treibhausgas-Projektionen 2025 hat das Fachgebiet V 1.2 unterschiedliche Quellen konsultiert, die es in den Beschreibungen zu den referenziellen Metadaten aufführt. Bei den Quellen handelt es sich insbesondere um ausgewählte wissenschaftliche Literatur, Qualitätsberichte von Destatis zu statistischen Daten, das Qualitätsglossar des Europäischen Statistischen Systems (ESS), die Energiestatistikverordnung (Verordnung (EG) 1099/2008, 2008) und das Glossar der IPCC Guidelines.

Eine Übersicht über die Dokumentationskategorien (=Datenschema), deren Beschreibung und Links zu den verwendeten Quellen befinden sich in Abschnitt 2. Die Faktenblätter mit den strukturellen Metadaten der dokumentierten Datensätze befinden sich unter:

<https://projektionen2025-ea08d1.usercontent.opencode.de/Datensatz/>.

1.2 Dokumentation der Modelle

Die Dokumentation der Modelle umfasst die Modelle, die das Thünen-Institut und das Forschungskonsortium verwendet haben, um das "Mit-Maßnahmen-Szenario" und das "Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario" zu erstellen. Im Gegensatz zur Dokumentation der Daten kann hier nicht auf offene und definierte Standards zurückgegriffen werden. Die Dokumentation der Modelle orientierte sich zunächst an den Vorgaben und Leitfäden für die Berichterstattung (Durchführungsverordnung (EU) 2020/1208, 2020: Artikel 38 Abs. 2d; Schmid et al., 2024). Auf Basis ausgewählter wissenschaftlicher Quellen hat das Umweltbundesamt (Fachgebiet V 1.2) die Vorgaben der Berichterstattung um weitere Dokumentationskategorien ergänzt (Cao et al., 2016, Grimm et al., 2020, Hall & Buckley, 2016, Model Factsheets der Open Energy Platform). Vergleichbar mit den Dokumentationskategorien der Daten umfassen auch die Kategorien zur Dokumentation der Modelle Beschreibungen, die die festzuhaltenden Inhalte erläutern. Neben den hier genannten Quellen hat das Umweltbundesamt (V 1.2) für die Formulierung der Beschreibung der Kategorien auf weitere Quellen zurückgegriffen, die in den Beschreibungen referenziert werden. Die Modellierenden haben für jedes Modell ein Faktenblatt (Englisch: Factsheet) angelegt, das das jeweilige Modell anhand der Dokumentationskategorien beschreibt und erläutert. In dieser Dokumentation sind Factsheets zu folgenden Modellen (alphabetische Reihenfolge) enthalten:

- ▶ ASTRA-M (M-Five, Fraunhofer ISI)
- ▶ CAPRI (Thünen-Institut)
- ▶ ENUSEM (Öko-Institut)
- ▶ FORECAST-Residential (Fraunhofer ISI)
- ▶ FORECAST-Industry (Fraunhofer ISI)
- ▶ FORECAST-Tertiary (Fraunhofer ISI)
- ▶ Invert/EE-Lab (IREES)
- ▶ IPCC Waste Model (Öko-Institut)

- ▶ LaWiEnMod (Öko-Institut)
- ▶ LULUCFMod (Thünen-Institut)
- ▶ Matrix (Thünen-Institut)
- ▶ PowerFlex (Öko-Institut)
- ▶ ProFI (Öko-Institut)
- ▶ Py-GAS-EM (Thünen-Institut)
- ▶ TEMPS (Öko-Institut)
- ▶ VIEW (Prognos)
- ▶ Winfra (Prognos)
- ▶ WoodCarbonMonitor (Thünen-Institut)

1.3 Formulierungsleitfaden für die Faktenblätter zu den Modellen

Die Factsheets informieren über die grundlegende Konzeption der Modelle, die das Thünen-Institut und das Forschungskonsortium für die Treibhausgas-Projektionen verwendet haben. Die Faktenblätter haben nicht den Charakter und Umfang einer Modelldokumentation, die die methodischen und inhaltlichen Details der Modelle und deren Anwendung erläutert, sondern sind als zentrales Referenzdokument zu verstehen. Mit Rückgriff auf die Dokumentationskategorien beinhalten sie all die Informationen und Quellenangaben, um ein grundlegendes Verständnis, grundlegende Transparenz und ein vergleichbares Dokumentationsniveau der Modelle zu ermöglichen. Die Quellenangaben ermöglichen es den Lesenden, sich weiterführend über die Modelle zu informieren.

Die ergänzenden Beschreibungen der Dokumentationskategorien erläutern, auf welche Inhalte und Aspekte der Modelle sie sich beziehen. Diese kurzen Beschreibungen bieten jedoch nur eine eingeschränkte Orientierung für die konkrete Formulierung der Inhalte. Deshalb hat das Umweltbundesamt (Fachgebiet V 1.2) den Modellierenden einen kompakten Formulierungsleitfaden bereitgestellt, der folgende Aspekte umfasst.

1.3.1 Präzise Benennen und präzise Referenzieren

Die Modellierenden nutzen präzise und einheitliche Begriffe, die das Modell insgesamt, dessen Aufbau und Funktionsweise erläutern. Sie definieren die Begriffe in den Faktenblättern oder beziehen sich auf Definitionen in anderen Quellen. Die Definitionen können die Modellierenden aus relevanten Gesetzen, Richtlinien und Verordnungen für die Treibhausgas-Berichterstattung entnehmen. Andere mögliche Quellen, die die Modellierenden nutzen können, sind unter anderem relevante Leitlinien, Klassifikationen und Glossare. Die Begriffe müssen selbsterklärend bzw. mit Hilfe der Faktenblätter verständlich sein. Zur präzisen Benennung gehört auch, dass die Modellierenden (eine Auswahl) von unter anderem Variablen, Parametern, mathematischen Funktionen und Gleichungen sowie Komponenten des Modellcodes benennen und erläutern.

Sofern die Modellierenden über das Modell, dessen Aufbau und Funktionsweise bereits in anderen Dokumenten informieren bzw. dokumentieren, binden die Modellierenden Quellenangaben in die Faktenblätter ein. Die Quellenangaben ermöglichen es den Lesenden, die referenzierten Dokumente und Stellen innerhalb der Quellen gut aufzufinden. Ergänzend zu den Quellenangaben im Text der Faktenblätter umfassen diese auch ein Quellenverzeichnis mit

Permanentlinks, damit die Lesenden einen unkomplizierten Überblick und Zugang zu den Quellen erhalten.

Außerdem hat das Umweltbundesamt (Fachgebiet V 1.2) die Modellierenden gebeten zu erläutern, wie sie die Modelle für die Erstellung der Treibhausgas-Projektionen anwenden, und hierfür auf die anderen Dokumente und Datenquellen der Projektionsberichterstattung in den Faktenblättern zu verweisen.

1.3.2 Deskriptive Erläuterung

Die Modellierenden ergänzen deskriptive Erläuterungen zu Aufbau und Funktionsweise der Modelle, so dass die Lesenden das Modell insgesamt und dessen Teile grundlegend verstehen können.

1.3.3 Begründen und Reflektieren

Zweck, Aufbau und Funktionsweise eines Modells können die Lesenden insbesondere dann nachvollziehen, wenn deutlich wird, zu welchem Grad das Modell reale Gegebenheiten abbilden und simulieren kann bzw. soll. Folglich hat das Umweltbundesamt (V 1.2) die Modellierenden gebeten, diese Zusammenhänge in den Faktenblättern zu verdeutlichen und Entscheidungen unter anderem hinsichtlich ihrer Annahmen und Grad der Verallgemeinerung der Modelle zu begründen und zu reflektieren.

2 Datenschema

Im Folgenden befindet sich die Liste der Dokumentationskategorien (=Datenschema) der Daten- und Modelldokumentation der Treibhausgas-Projektionen 2025. Nicht alle Kategorien sind auf alle Datensätze bzw. Modelle anwendbar; sie sollen jedoch so weit wie möglich ausgefüllt werden.

2.1 Modell

- ▶ **Name:** Angabe des vollständigen Namens und des Akronyms des Modells, das Sie zur Erstellung der Projektionen anwenden.
- ▶ **Version des Modells:** Angabe der Version des Modells, das Sie zur Erstellung der Projektionen anwenden.
- ▶ **Betreibende Organisation:** Geben Sie den vollständigen Namen der Organisation an, die das Modell zur Erstellung der Projektionen anwendet.
- ▶ **Zweck des Modells:** Die Kategorie liefert Information darüber, mit welcher Zielstellung und für welchen Anwendungsbereich Sie das Modell entwickelt haben. Welche Forschungsfragen können Sie mit dem Modell beantworten und welche nicht? Welche Art von Szenarien können Sie mit dem Modell erstellen und welche nicht (vgl. z. B. Börjeson et al., 2006)?
- ▶ **Akteure:** Nach der Definition der Open Energy Ontology ist ein Agent die Rolle einer Person bzw. Organisation, die deren Handlung auf die Erreichung von Zielen richtet. Die Kategorie liefert somit Informationen darüber, wie das Modell Agenten/Akteure unterteilt. Benennen und definieren Sie die modellierten Agenten/Akteure sowie referenzieren Sie die konkret verwendeten Klassifizierungsschemas für die einzelnen Agenten/Akteure. Geben Sie an, wie das Modell die Interaktionen der Agenten/Akteure simuliert. Inwiefern unterhalten Sie eine (offen zugängliche) Datenbank, die die Daten zu den Agenten/Akteure speichert? Inwiefern kann das Modell Entscheidungskalkül, Lernen, Informationsverfügbarkeit und Voraussicht der Agenten/Akteure simulieren?
- ▶ **Dokumentation:** Angabe von Quellen, in denen das Modell über das hier vorhandene Maß dokumentiert ist, z. B. PID/URL zur Benutzerdokumentation, PID/URL zu Git-Repositorien, PID/URL zu Artikeln, in denen das Modell kritisch geprüft bzw. validiert wird.
- ▶ **Räumliche Abdeckung** (DCAT-AP.de¹): Diese Eigenschaft bezieht sich auf den abgedeckten geographischen Bereich (u. a. Staat, Staatengemeinschaft, Kontinent).
- ▶ **Zeithorizont:** Angabe des im Modell implementierten Zeithorizonts sowie des Start- und Endzeitpunkts der Modellierung.
- ▶ **Zeitliche Auflösung:** Angabe der im Modell implementierten zeitlichen Auflösung (z. B. Minuten, Stunden, Tage, Wochen). Sofern implementiert, Angabe des Verhältnisses zwischen modelltechnischen und realen Zeiteinheiten.
- ▶ **Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien:** Die Kategorie liefert Informationen darüber, auf welchen wissenschaftlichen Theorien, empirischen Erkenntnissen und Annahmen das Modell insgesamt aufbaut sowie Konzepte, Strukturen und Wechselwirkungen, die das Modell insgesamt charakterisieren, die es endogen abbildet, und welche das Modell nicht berücksichtigt und die folglich exogen sind (Savvidis et al., 2019; Wiese et al., 2018).

¹ <https://www.dcat-ap.de/def/dcatde/2.0/spec/>

Inwiefern kann das Modell Wirkungen und Wechselwirkungen von Politiken und Maßnahmen abbilden?

- ▶ **Methodischer Ansatz:** Geben Sie den im Modell implementierten methodischen Ansatz (vgl. z. B. Hall & Buckley, 2016, Absatz 4.3.2: u. a. Ökonometrisches Modell, Makroökonomisches Modell, Ökonomisches Gleichgewichtsmodell, Optimierungsmodell, Simulationsmodell, Accounting Modell, agentenbasiertes Modell) an.
- ▶ **Methodischer/mathematischer Ansatz:** Geben Sie den mathematischen Ansatz, der das Modell charakterisiert, sowie wesentliche Funktionen, Gleichungen etc an.
- ▶ **Modellkonsistenz:** In Anlehnung an die Kategorie Daten_Konsistenz liefert die Kategorie Modell_Konsistenz Informationen darüber, inwiefern ein Modell in sich und bzgl. der weiteren Modelle, mit denen Sie die Projektionen erstellen, logisch und numerisch widerspruchsfrei ist.
- ▶ **Open Source:** Geben Sie an, ob das Modell Open Source ist. Bei Open Source-Modellen geben Sie den Namen der freien und offenen Lizenz (ausgeschrieben und Abkürzung) an. Bei geschlossenen Modellen erläutern Sie kurz die Gründe, die gegen eine Veröffentlichung sprechen.
- ▶ **Parameter:** Geben Sie einen Überblick hinsichtlich der Parameter, die das Modell insgesamt charakterisieren und wie Sie die Parameter mit welchen Methoden und Prozessen herleiten. Hierzu können Sie die Parameter auch clustern und die Cluster erläutern. Sie können sich u. a. auf Ihre Ausführungen in den Kategorien Modell_KonzeptionelleGestaltungsprinzipien, Modell_ProgrammtechnischeGestaltungsprinzipien, Modell_MathematischerAnsatz, Modell_Techniken_Technologien, Modell_Agent, Daten_Modell_Unsicherheit und Modell_Dokumentation beziehen bzw. Literatur- und Datenquellen referenzieren. Auch ein Bezug zu den anderen zu veröffentlichenden Dokumenten und Datenquellen der Projektionsberichterstattung ist hilfreich für das Verständnis.
- ▶ **Programmiersprache:** Angabe der Programmiersprachen, die Sie für die Kategorie Daten_Methoden sowie Entwicklung, Wartung und Anwendung der Modelle nutzen.
- ▶ **Programmtechnische Gestaltungsprinzipien:** Die Kategorie liefert Informationen darüber, wie die konzeptionellen Gestaltungsprinzipien in ein konkretes ComputermodeLL übersetzt sind. Hierzu gehören u. a. die eingesetzten Algorithmen, Struktur und Wechselwirkung der Modellkomponenten, Überprüfungsmechanismen, die das korrekte Funktionieren des Modellcodes verifizieren bzw. Fehler identifizieren, Datenschnittstellen, Schnittstellen zu bzw. Kopplung mit anderen Modellen und was die primären Ergebnisse des Modells (Modell-Output) sind.
- ▶ **Räumliche Auflösung:** Angabe der räumlichen Auflösung, mit der das Modell operiert entsprechend Nomenclature des unités territoriales statistiques (NUTS).
- ▶ **Sektoren:** Die Kategorie Sektor liefert Informationen darüber, wie das Modell ein Wirtschaftssystem in Sektoren unterteilt. Benennen und definieren Sie die modellierten Sektoren sowie referenzieren Sie die konkret verwendeten Klassifizierungsschemas für die einzelnen Sektoren (z. B. CRF 1.A.3). Geben Sie an, wie das Modell die Wechselwirkungen der Sektoren simuliert.
- ▶ **Software:** Geben Sie an, welche Software Sie für die Kategorie Daten_Methoden sowie Entwicklung, Wartung und Anwendung der Modelle nutzen.

- ▶ **Techniken:** Die Kategorie liefert Informationen darüber, wie das Modell Techniken/Technologien unterteilt. Benennen und definieren Sie die modellierten Techniken/Technologien sowie referenzieren Sie die konkret verwendeten Klassifizierungsschemas für die einzelnen Techniken/Technologien (z. B. aus Marktstammdatenregister, European Product Registry for Energy Labelling). Geben Sie an, wie das Modell die Wechselwirkungen der Techniken/Technologien simuliert. Inwiefern unterhalten Sie eine (offen zugängliche) Datenbank, die die Daten zu den Techniken/Technologien speichert?
- ▶ **Treibhausgasemissionen:** Angabe der Treibhausgase nach Verordnung (EU) 2018/1999 Anhang V Teil 2, deren Emissionen das Modell abbildet.
- ▶ **Unsicherheit:** Die Kategorie liefert Informationen darüber, wie Sie Unsicherheit bzgl. des Modells konzeptioniert haben und wie Sie bei der Modellierung mit Unsicherheiten, die sich aus dem realen System selbst, den verwendeten Daten und Methoden ergeben, umgehen. Welche Annahmen und Restriktionen ergeben sich aus dem Umgang mit Unsicherheiten? Sofern zutreffend, geben Sie verwendete Definitionen, Klassifizierungen und Methoden an (vgl. u. a. 2006 IPCC Guidelines Chapter 3 Uncertainties (Frey et al., 2006); Walker et al., 2003). Falls Sie Unsicherheiten nicht explizit im Modell berücksichtigen, wie können Sie Unsicherheiten anderweitig im Verlauf der Modellierung begegnen?
- ▶ **Validierung:** Die Kategorie liefert im Sinne von Graebner (2018, S. 13–14) Informationen zur Validierung (validation) von Modellen und den damit einhergehenden Herausforderungen. Unter die Validierung von Modellen fassen wir "input validation", inwiefern ein Modell ein reales System und dessen Attribute abbilden kann, "process validation", inwiefern ein Modell Wechselwirkungen und Dynamiken eines realen Systems abbilden kann, "descriptive output validation", inwiefern ein Modell bestehende Daten replizieren kann (auftretendes Problem u. a. overfitting) und "predictive output validation", inwiefern das Modell zukünftige Entwicklungen eines Systems prognostizieren kann.
- ▶ **Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen:** Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen
- ▶ **Wesentliche endogene und exogene Strukturen/Variablen:** Angabe und Beschreibung der wesentlichen Variablen, die modellendogen berechnet werden. Angabe der wesentlichen exogen vorgegebenen Parameter.
- ▶ **Wesentliche Konzepte und Annahmen:** Wesentliche Konzepte und Annahmen
- ▶ **Zielsystem:** Die Kategorie Zielsystem liefert Informationen darüber, welches reale System das Modell repräsentiert und wie die System- und Bilanzgrenzen des Systems im Modell definiert sind.

2.2 Datensatz

- ▶ **Titel** (DCAT-AP.de): Bezeichnet den einer Datenstruktur zugewiesenen Titel und kann für parallele Sprachversionen des Datenstrukturtitels wiederholt werden.
- ▶ **Autor** (DCAT-AP.de): Verweist auf Stellen oder Personen, die die Daten erstellt haben. Die Autorenschaft umfasst für gewöhnlich das Recht am geistigen Eigentum.
- ▶ **Bearbeiter** (DCAT-AP.de): Verweist auf Stellen oder Personen, die die Daten bearbeitet haben.

- ▶ **Verwalter** (DCAT-AP.de): Verweist auf die Stellen oder Personen, die Verantwortung und Rechenschaftspflicht für die Daten und ihre angemessene Pflege übernehmen.
- ▶ **Herausgeber** (DCAT-AP.de): Verweist auf die Stelle oder Person, die für die Bereitstellung der Datenstruktur verantwortlich ist. Es ist zugleich die Stelle oder Person, die über die Einräumung von Zugang und Nutzungsrechten für Dritte entschieden hat.
- ▶ **Beschreibung** (DCAT-AP.de): Enthält eine Beschreibung der Datenstruktur als Freitext. Diese Eigenschaft kann für parallel existierende Sprachversionen der Datenstrukturbeschreibung wiederholt werden. Spezifikation für Projektionen: Die Kategorie umfasst eine inhaltliche Beschreibung des Datensatzes im Sinne eines Abstracts von 300 bis 700 Zeichen (inkl. Leerzeichen).
- ▶ **Input in Modell**: Gibt an, in welches Modell / welche Modelle der Datensatz fließt und linkt zu den entsprechenden Modellfaktenblättern.
- ▶ **Output aus Modell**: Gibt an, von welchem Modell / welchen Modellen dieser Datensatz ausgegeben wird und linkt zu entsprechenden Modellfaktenblättern.
- ▶ **Benutzt Datensatz**: Gibt an, welcher Datensatz / welche Datensätze genutzt wird/werden um den angezeigten Datensatz zu erzeugen. Verlinkt auf die Datenfaktenblätter des/der genutzten Datensatzes/Datensätze.
- ▶ **Aktualisierungsdatum** (DCAT-AP.de): Erfasst das Datum der letzten Aktualisierung bzw. Modifikation der Datenstruktur.
- ▶ **Aktualisierungsfrequenz** (DCAT-AP.de): Beschreibt die Aktualisierungsfrequenz der Datenstruktur.
- ▶ **Grad der Zugänglichkeit** (DCAT-AP.de): Verweist auf Informationen, die darlegen, ob die Datenstruktur öffentlich zugänglich ist, Zugriffseinschränkungen existieren oder sie nicht-öffentlich ist.
- ▶ **Zugänglichkeit**: "'Zugänglichkeit' und ‚Klarheit‘ beziehen sich auf die Bedingungen und Modalitäten, unter denen die Nutzer Daten erhalten, verwenden und interpretieren können" (Verordnung (EG) Nr. 1099/2008, Artikel 6.3.e).
- ▶ **Veröffentlichungsdatum** (DCAT-AP.de): Enthält das Datum der Herausgabe/Emission (z. B. in Form einer Veröffentlichung) der Datenstruktur.
- ▶ **Versionsbezeichnung** (DCAT-AP.de): Diese Eigenschaft enthält eine Versionsnummer oder anderweitige Versionskennzeichnung des Datensatzes. Die Verwendung wird im Konventionenhandbuch genauer beschrieben.
- ▶ **Ursprüngliche Webseite** (DCAT-AP.de): Verweist auf eine Webseite, welche Zugriff auf die Datenstruktur, ihre Distributionen und/oder weitere Informationen ermöglicht. Es ist beabsichtigt, auf die Webseite des originären Datenbereitstellers zu verweisen und nicht auf zwischengeschaltete Intermediäre.
- ▶ **Aktualität**: "'Aktualität' bezieht sich auf die Zeitspanne zwischen dem Vorliegen der Informationen und dem von ihr beschriebenen Ereignis und Phänomen" (Verordnung (EG) Nr. 1099/2008, Artikel 6.3.c).

- ▶ **Schlagwort** (DCAT-AP.de): Enthält ein Schlagwort oder einen Schlüsselbegriff zur Beschreibung der Datenstruktur und kann für parallel existierende Sprachversionen von Schlagworten wiederholt werden.
- ▶ **Sprache** (DCAT-AP.de): Bezieht sich auf die innerhalb der Datenstruktur verwendete Sprache und kann wiederholt werden, falls mehrere Sprachen in der Datenstruktur Verwendung finden.
- ▶ **Andere ID** (DCAT-AP.de): Verweist auf sekundäre IDs der Datenstruktur.
- ▶ **Annahmen**: Die Kategorie Annahmen liefert Informationen darüber, welche (expliziten) Annahmen Sie bei Datenerhebung (Konzept, Vorbereitung und Durchführung), Datenaufbereitung (u. a. Bereinigungs-/Normalisierungsmethoden) und Datenanalyse (u. a. statistische Methoden) treffen und was die Gründe hierfür sind. Reflektieren Sie auch über implizite Annahmen und versuchen Sie diese mitaufzuführen (siehe Qualitätsberichte von Destatis zu Beschreibung von Datenerhebung, Datenaufbereitung und Datenanalyse).
- ▶ **Attribute**: Die Kategorie Daten_Attribute liefert Informationen über Anzahl, Bezeichnung und Bedeutung der Attribute (z. B. Attribute für ein Gebäude: u. a. Typ, Heizungssystem, Dämmmaterial, Grundstücksgröße), die den Datensatz charakterisieren. Außerdem liefert die Kategorie eine Einschätzung darüber, inwiefern die Datenattribute ausreichend differenziert für die Erstellung der Projektionen (Modellierung) sind. Bei einer hohen Anzahl an Attributen sollten Sie hinsichtlich der Relevanz für die Erstellung der Projektionen priorisieren.
- ▶ **Begründung Auswahl**: Die Kategorie liefert Informationen darüber, inwiefern die ausgewählten Datensätze die Anforderung von Berichterstattung und Modellierung erfüllen und weshalb Sie sie ausgewählt haben.
- ▶ **Datenkonsistenz**: Die Kategorie Konsistenz liefert Informationen darüber, inwiefern die Daten logisch und numerisch widerspruchsfrei sind (siehe Definitionen insbesondere in 2006 IPCC Guidelines Glossary (IPCC o.J.) , ESS Quality Glossary (Eurostat, 2023)).
- ▶ **Distribution** (DCAT-AP.de): Eine physische Verkörperung/Repräsentanz des Datensatzes in einem spezifischen Format.
- ▶ **Genauigkeit**: Die Kategorie Genauigkeit liefert im statistischen Sinne Informationen darüber, wie exakt die Daten (Schätzwerte) sind und inwiefern sie die wahren Werte weder systematisch über- bzw. unterschätzen, soweit dies unter Berücksichtigung der Unsicherheiten beurteilt werden kann (siehe Definitionen insbesondere in 2006 IPCC Guidelines Glossary (IPCC o.J.), ESS Quality Glossary (Eurostat, 2023)).
- ▶ **Herkunft**: Herausgeber (dcat:publisher), Verwalter (dcatde:maintainer), Bearbeiter (dct:contributor), Autor (dct:creator) und/oder Urheber (dctade:originator) informieren darüber, wer die Daten erhoben, modelliert, verarbeitet und veröffentlicht hat. Ergänzend liefert die Kategorie Herkunft Informationen zur Vertrauenswürdigkeit der Personen und/oder Organisationen, die verantwortlich für die Daten sind, sowie deren Datenverarbeitungsprozesse.
- ▶ **Kategorie** (DCAT-AP.de): Bezieht sich auf die der Datenstruktur zugewiesene Kategorie. Mit einer Datenstruktur können mehrere Kategorien assoziiert sein.

- ▶ **Klarheit:** "'Zugänglichkeit' und 'Klarheit' beziehen sich auf die Bedingungen und Modalitäten, unter denen die Nutzer Daten erhalten, verwenden und interpretieren können" (Verordnung (EG) Nr. 1099/2008, Artikel 6.3.e).
- ▶ **Konform zu Standard** (DCAT-AP.de): Verweist auf eine Implementierungsregel oder eine andere Spezifikation, zu der die Datenstruktur konform ist.
- ▶ **Methoden:** Die Kategorie liefert Informationen zu den angewendeten Methoden für Datenerhebung (Konzept, Vorbereitung und Durchführung), Datenaufbereitung (u. a. Bereinigungs-/Normalisierungsmethoden) und Datenanalyse (u. a. statistische Methoden). Angegebene Referenzen gewährleisten, dass die Quellen und die exakten Stellen innerhalb der Quellen ohne Nachfragen direkt auffindbar sind (siehe Qualitätsberichte von Destatis zu Beschreibung von Datenerhebung, Datenaufbereitung und Datenanalyse).
- ▶ **Räumliche Abdeckung** (DCAT-AP.de): Diese Eigenschaft bezieht sich auf den abgedeckten geographischen Bereich (u. a. Staat, Staatengemeinschaft, Kontinent).
- ▶ **Rechtsgrundlagen:** Die Kategorie Rechtsgrundlagen führt die anzuwendenden Rechtsgrundlagen bezüglich Datenerhebung, -aufbereitung, -analyse und -veröffentlichung explizit auf. Angegebene Referenzen gewährleisten, dass der juristische Text und die exakten Stellen innerhalb des juristischen Texts ohne Nachfragen direkt auffindbar sind.
- ▶ **Relevanz:** "'Relevanz' bezieht sich auf den Umfang, in dem die Statistiken dem aktuellen und potenziellen Nutzerbedarf entsprechen" (Verordnung (EG) Nr. 1099/2008, Artikel 6.3.a). Im Kontext der Projektionen bezieht sich Relevanz nicht nur auf die (Modell-) Inputdaten, sondern auch auf die Projektionsdaten (Modell-Outputdaten, Ergebnisdaten). Die Kategorie Relevanz liefert Informationen, inwiefern Rückmeldungen und Kritik berücksichtigt sind. Falls Rückmeldungen und Kritik nicht berücksichtigt sind, erläutern bzw. begründen Sie bitte.
- ▶ **Reliabilität:** Die Kategorie Reliabilität liefert im Kontext der Projektionen Informationen darüber, inwiefern die verwendeten Daten den Untersuchungsgegenstand bzw. die Grundgesamtheit getreu, genau und konsistent abbilden und auf wissenschaftlichen Standards hinsichtlich Datenerhebung (Konzept, Vorbereitung und Durchführung), Datenaufbereitung (u. a. Bereinigungs-/Normalisierungsmethoden) und Datenanalyse (u. a. statistische Methoden) beruhen (siehe ESS Quality Glossary zu Reliability (Eurostat 2023), siehe auch Qualitätsberichte von Destatis zu Beschreibung von Datenerhebung, Datenaufbereitung und Datenanalyse [Statistisches Bundesamt [Destatis], o.J.]).
- ▶ **Repräsentativität:** Die Kategorie Repräsentativität liefert Informationen, inwiefern die Daten den Untersuchungsgegenstand bzw. die Grundgesamtheit repräsentieren. Nach Schnell et al. (2018, S. 277–278) ist dieser "Repräsentationsschluss" nur zulässig, "wenn der Auswahlmechanismus eine Zufallsauswahl ist".
- ▶ **Statistische Vertraulichkeit:** Die Kategorie statistische Vertraulichkeit liefert Informationen, inwiefern die Daten vertraulich sind, und über die (rechtlichen) Vertraulichkeitsvorschriften.
- ▶ **Urheber** (DCAT-AP.de): Verweist auf die Personen, die Urheberrechte an der Datenstruktur haben. Geschützt ist laut Urheberrecht ein Werk, das einer persönlichen geistigen Schöpfung seines Urhebers entspringt.
- ▶ **Validität:** Die Kategorie Validität (im statistischen Sinne) gibt grundlegend an, inwiefern die Daten die für die Modellierung benötigten Informationen, abgeleitet aus der

Modellkonzeption, abbilden (siehe für eine weitere Differenzierung McGregor, 2021, S. 74–75; Schnell et al., 2018, S. 135–138).

- ▶ **Vertraulichkeitsverfahren:** Die Kategorie liefert Informationen über die angewendeten Geheimhaltungsverfahren (u. a. Anonymisierung, Pseudonymisierung) (siehe Qualitätsberichte von Destatis (Destatis, o.J.)).
- ▶ **Vollständigkeit:** Die Vollständigkeit der Daten informiert über die Relation von verfügbaren Daten und der Menge der benötigten Daten und gibt Aufschluss darüber, inwiefern die vorliegenden Daten ausreichend für die Modellierung sind und wie der Umgang mit fehlenden Daten ist (siehe Definitionen zu Completeness insbesondere in 2006 IPCC Guidelines Glossary (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2024) und ESS Quality Glossary (Eurostat, 2023)).
- ▶ **Volumen:** Die Kategorie Datenvolumen liefert Informationen über Aggregation, Disaggregation und Anzahl der Datenpunkte der ausgewählten Datensätze. Ferner liefert die Kategorie eine Einschätzung, inwiefern das Datenvolumen ausreichend für die Erstellung der Projektionen (Modellierung) ist (vgl. McGregor, 2021, S. 83–84).
- ▶ **Zeitliche Abdeckung** (DCAT-AP.de): Ein Zeitintervall, welches durch Start- und Endzeitpunkt bezeichnet bzw. definiert ist.

2.3 Distribution

- ▶ **Titel** (DCAT-AP.de): Bezeichnet den einer Datenstruktur zugewiesenen Titel und kann für parallele Sprachversionen des Datenstrukturtitels wiederholt werden.
- ▶ **Beschreibung** (DCAT-AP.de): Enthält eine Beschreibung der Datenstruktur als Freitext. Diese Eigenschaft kann für parallel existierende Sprachversionen der Datenstrukturbeschreibung wiederholt werden. Spezifikation für Projektionen: Die Kategorie umfasst eine inhaltliche Beschreibung des Datensatzes im Sinne eines Abstracts von 300 bis 700 Zeichen (inkl. Leerzeichen).
- ▶ **Aktualisierungsdatum** (DCAT-AP.de): Erfasst das Datum der letzten Aktualisierung bzw. Modifikation der Datenstruktur.
- ▶ **Grad der Zugänglichkeit** (DCAT-AP.de): Verweist auf Informationen, die darlegen, ob die Datenstruktur öffentlich zugänglich ist, Zugriffseinschränkungen existieren oder sie nicht-öffentlich ist.
- ▶ **Download-URL** (DCAT-AP.de): Enthält eine URL-Adresse, welche einen direkten Zugriff/Link auf die herunterladbare Datei im beschriebenen Format liefert.
- ▶ **Zugangs-URL** (DCAT-AP.de): Enthält eine URL-Adresse, die Zugriff auf die Distribution einer Datenstruktur ermöglicht. Die mit der Zugangs-URL erreichbare Ressource kann Informationen zur Verfügung stellen, wie die Distribution erreicht werden kann oder direkt auf eine Datei verweisen, die die Daten im angegebenen Format beinhaltet.
- ▶ **Lizenz** (DCAT-AP.de): Bezieht sich auf die Lizenz, unter welcher die Distribution zur Verfügung gestellt wird. Es bestehen weitergehende Einschränkungen für die Kooperation GovData, welche im entsprechenden Konventionenhandbuch geklärt sind.
- ▶ **Veröffentlichungsdatum** (DCAT-AP.de): Enthält das Datum der Herausgabe/Emission (z. B. in Form einer Veröffentlichung) der Datenstruktur.

- ▶ **Attribution** (DCAT-AP.de): Hilfskonstrukt zur Speicherung von verpflichtenden Namensnennungstexten aus Lizenzangaben, bis zur Lösung in DCAT-AP.de. Kann für parallele Sprachversionen des Namensnennungstextes wiederholt werden.
- ▶ **Sprache** (DCAT-AP.de): Bezieht sich auf die innerhalb der Datenstruktur verwendete Sprache und kann wiederholt werden, falls mehrere Sprachen in der Datenstruktur Verwendung finden.
- ▶ **Dokumentation** (DCAT-AP.de): Diese Eigenschaft verweist auf eine Seite oder ein Dokument für den jeweiligen Datensatz.
- ▶ **Format** (DCAT-AP.de): Verweist auf das Datenformat der Distribution.
- ▶ **Größe in Bytes** (DCAT-AP.de): Enthält die Größe der Distribution in Bytes.
- ▶ **Verfügbarkeit** (DCAT-AP.de): Verfügbarkeit der Distribution eines Datensatzes, als Auswahl aus einer festen Liste von Werten via DCAT-AP URLs.

3 Faktenblätter zu den Modellen

3.1 ASTRA-M

Name

Assessment of Transport Strategies (ASTRA)

Version des Modells

ASTRA wird kontinuierlich weiterentwickelt und mit Hilfe einer Versionskontrolle inkrementell versioniert. Im Rahmen des Projekts wurde das Modell von der Hauptentwicklungslinie abgekoppelt und mit eigener Versionierung unter dem Namen **ASTRA-PSz** weiterentwickelt. In diesem Schritt wurden exogene Inputs (v. a. Rahmendaten aus PB 2025) und weitere Annahmen im Kontext des Projekts überarbeitet bzw. ersetzt.

Betreibende Organisation

- ▶ Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)
- ▶ M-Five GmbH Mobility, Futures, Innovation, Economics (M-Five)

Zweck des Modells

ASTRA-M wurde entwickelt, um die Dynamik der Wechselwirkungen sowie die Kreislaufbeziehungen zwischen Wirtschaft, Gesellschaft und Verkehr innerhalb eines integrierten Modells abbilden zu können.

ASTRA-M repräsentiert primär das Verkehrssystem in Deutschland und seine Ankopplung an dessen Treiber aus Wirtschaft und Gesellschaft. Es spiegelt die Dynamiken zwischen wirtschaftlicher bzw. demografischer Entwicklung und der Entwicklung der Verkehrsnachfrage für Personen- und Güterverkehr in Wechselwirkung mit der Entwicklung von wichtigen technischen (alternative Antriebe bzw. der Automatisierung und Vernetzung) und sozialen bzw. Prozessinnovationen (Sharingdienste und neue Mobilitätsdienstleistungen) wider.

Das Modell kann vor allem die Wirkungen von politischen Instrumenten zur Beeinflussung der Verkehrsnachfrage sowie des Markthochlaufs von Innovationen quantifizieren und dessen Einfluss auf die Verkehrsnachfrage und die Minderung von Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen messbar machen. Als State-of-the-art-Verkehrsmodell kann ASTRA-M Instrumente mit Wirkungen auf Transportzeiten und -kosten sehr gut in den implementierten Verhaltensfunktionen nachbilden. Mit Hilfe von vorliegenden Befragungen (u. a. Nobis & Kuhnimhof, 2018, Ecke et al., 2023, sowie weiteren öffentlich zugänglichen Befragungen) können auch nicht monetarisierbare Bestandteile der Verhaltensfunktionen nachgebildet werden und somit verhaltensbeeinflussende Instrumente abgeschätzt werden.

Referenzen:

- ▶ Nobis, C. & Kuhnimhof, T. (2018). *Mobilität in Deutschland 2017 - MiD Ergebnisbericht: Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15)*. https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf [17.04.2024]
- ▶ Ecke, L., Vallée, J., Chlond, B. & Vortisch, P. (2023). *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2022/2023: Alltagsmobilität und Fahrleistung*. <https://doi.org/10.5445/IR/1000164704>

Akteure

ASTRA-M unterscheidet zwischen Personen- und Güterverkehr. Dementsprechend sind Akteure bei Fahrzeugflotten im Personenverkehr gewerbliche oder private Halter. Im Straßengüterverkehr werden Fahrzeughalter nach ihrem Verkehrsprofil unterschieden, welches über unterschiedliche Jahresfahrleistungen ausgedrückt wird. Außerdem werden unterschiedliche Güterarten unterschieden (z. B. Container, Stückgut). Darüber hinaus wird bei der Nachfrage im Personenverkehr nach den Wegezwecken unterschieden, welche sich teilweise einzelnen Personengruppen zuordnen lassen (z. B. Dienstreisen, Pendelwege).

Dokumentation

Auf der Website² befinden sich Links zu den Modellvarianten sowie zu Publikationen, in denen Modellstruktur und Aufbau detailliert beschrieben werden.

Da ASTRA-M vorwiegend für die Auftragsforschung entwickelt wurde, gibt es außer den von den Auftraggebern geprüften Publikationen keine peer-reviewed Publikationen. Eine ausführliche Beschreibung des Modells und der Ausgestaltung des Referenzszenarios ist nachlesbar unter Schade et al. (2023). Die Grundfunktionen von ASTRA-M sind jedoch unter anderem in den Dissertationen von Dr. Wolfgang Schade und Dr. Michael Krail anhand des zugrundeliegenden ASTRA-EC-Modells beschrieben.

Referenzen:

- Schade, W., Haug, I., Emmerich, J., Berthold, D., Oehme, R., Streif, M., Khanna, A., Emmerich, C., Krail, M., Anstett, P., Walther, C. & Waßmuth, V. (2023). *Gestaltung des MKS-Referenzszenarios für die Periode 2022 bis 2050 (REF-2050): Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)*. <https://m-five.de/publikationsartikel/gestaltung-des-mks-referenzszenarios-fuer-die-periode-2022-bis-2050-ref-2050> [17.04.2024]

Räumliche Abdeckung

- Alle Szenarien beziehen sich auf die nationale Ebene (Deutschland). Berücksichtigt wird die Verkehrsleistung nach dem Inlandsprinzip, der Fahrzeugbestand nach dem Inländerprinzip.
- Die Verkehrsnachfrage wird bottom-up nach NUTS-2-Regionen in Deutschland modelliert. Die Fahrzeugbestände werden für Gesamt-Deutschland modelliert, ebenso die Endenergieverbräuche und THG-Emissionen.

Zeithorizont

ASTRA-M rechnet alle Indikatoren im Zeitraum 1995-2050 auf Jahresebene. Startwerte werden üblicherweise für 1995 eingegeben, exogene Inputs soweit diese zeitlich verfügbar sind. Der Endzeitpunkt der Modellierung kann flexibel angepasst werden.

Zeitliche Auflösung

ASTRA-M rechnet intern mit Viertel-Jahres-Schritten, die Ergebnisse werden jedoch in 1-Jahres-Schritten dargestellt.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

Das Grundprinzip von ASTRA-M besteht darin, dass auf Basis von statistischen Startwerten aller Bestandsvariablen (vorrangig im Makroökonomischen und Fahrzeugflotten-Modul verwendet) für das Jahr 1995 die Entwicklung aller Indikatoren endogen bis zum Jahr 2050 aus der Dynamik der Beziehungen und der Rückkopplungen der Systeme (Bevölkerung, Verkehr, Umwelt,

² <http://www.astra-model.eu> sowie <https://m-five.de/methoden-und-tools/astra>

Ökonomie und Fahrzeugflotte) miteinander entstehen. Die dafür verwendeten Verhaltensgleichungen werden dabei unter Verwendung von Zeitreihendaten aus validen Datenquellen für den Zeitraum von 1995 bis 2023 (bzw. nach Verfügbarkeit) kalibriert und validiert. Dabei dient der Zeitraum 1995 bis 2005 zum Einschwingen des Modells und der Zeitraum 2006 bis 2023 (bzw. nach Verfügbarkeit) zur Kalibration an beobachtete Daten. Sowohl im Personenverkehr als auch im Güterverkehr sind die zentralen Indikatoren Aufkommen, Verkehrsleistung und Fahrleistung jedoch nicht als Bestandsvariablen definiert. Die Startwerte dieser Indikatoren ergeben sich aus der Berechnung mit Hilfe des Vier-Stufen-Ansatzes mit der Verkehrserzeugung (in der 1. Stufe), der Verkehrsverteilung auf Quelle und Ziel der Wege (2. Stufe), der Verkehrsmittelwahl (3. Stufe). Die 4. Stufe (Zuordnung auf Straßen- und Schienenwege) kann nur in einem Netzwerkmodell durchgeführt werden. ASTRA-M beschränkt sich damit auf die ersten drei Stufen und berechnet die 4. Stufe, aus der die Fahrleistung abgeleitet wird, anhand von empirischen Besetzungsgraden im Personenverkehr bzw. Beladungsfaktoren im Güterverkehr. Eine zentrale Quelle für die räumliche Verteilung des Verkehrs bildet die Verkehrsverflechtungsprognose 2030 aus der letzten Bundesverkehrswegeplanung (Schubert et al., 2014). Diese wurde für ASTRA-M für die Erstellung dynamischer Verkehrsentwicklungen bis 2050 fortgeschrieben und durch die Kopplung mit dem deutschlandweiten Netzmodell VALIDATE aktualisiert (Schade et al., 2023). Die für die Berechnungen verwendeten Verhaltensgleichungen (näher beschrieben unter „Methodischer/mathematischer Ansatz“) werden unter Verwendung von Zeitreihendaten aus validen Datenquellen für den Zeitraum von 1995 bis 2023 (soweit bis 2023 verfügbar) kalibriert und validiert. Mathematisch verwendet ASTRA die Grundprinzipien eines systemdynamischen Modells. Der systemdynamische Ansatz ist eine Methode, die entwickelt wurde, um komplexe dynamische Systeme zu analysieren, zu verstehen und zu simulieren. Diese Methode basiert auf der Idee, dass Systeme als Ganzes betrachtet werden sollten, anstatt ihre Einzelteile isoliert zu analysieren. Im Mittelpunkt steht das Zusammenspiel von Feedback-Schleifen, Bestandsgrößen und Flussgrößen sowie deren zeitliche Dynamik (siehe auch "Methodischer/mathematischer Ansatz").

Mit ASTRA-M können prognostische sowie explorative Szenarien erstellt werden und mit Hilfe einfacher Schaltmechanismen verschiedene Instrumentenbündel zusammengestellt werden. Es lassen sich durch Zu- bzw. Abschalten Einzelwirkungen von Instrumenten in Szenarien *ceteris paribus*, also unter der Annahme, dass die Wirkung der anderen Instrumente konstant bleibt, quantifizieren. Beispiele für Forschungsfragen sind:

- ▶ Wie wirken sich politisch steuerbare Instrumente auf die Verkehrsnachfrage und die Zusammensetzung der Fahrzeugflotten aus und wie tragen diese zur Erreichung der Klimaschutz- und Energieeffizienzziele bei?
- ▶ Wie groß ist die verbleibende Lücke zu den jeweiligen Zielen?
- ▶ Wie wirkt sich das Bündeln von einzelnen Instrumenten auf die THG-Minderungspotenziale aus?
- ▶ Wie hoch sind die Wirkungen der Instrumente auf den Staatshaushalt (Steuereinnahmen, Subventionen, Infrastrukturausgaben, etc.)?

ASTRA-M rechnet in 1-Jahres-Schritten zwischen 1995 und 2050 Modellergebnisse in Szenarien für alle wichtigen Indikatoren im Sektor Verkehr. Diese umfassen:

- ▶ **Verkehrsaufkommen:** in Wegen (Personenverkehr) bzw. Tonnen (Güterverkehr).

- ▶ **Verkehrsleistung:** in Personenkilometern (pkm, Personenverkehr) bzw. Tonnenkilometern (tkm, Güterverkehr).
- ▶ **Fahrleistung** in Fahrzeug- bzw. Zug-Kilometern.

Diese Größen werden weiter differenziert nach Verkehrsmitteln, Wegezwecken bzw. Güterkategorien. Dabei werden folgende Verkehrsmittel differenziert:

- ▶ **Personenverkehr:** MIV, Schienenfernverkehr, Schiennahverkehr, nationaler Luftverkehr, Bus, Fahrrad, zu Fuß, Carsharing, Ridehailing/-pooling sowie Bike-/E-Scooter-Sharing.
- ▶ **Güterverkehr:** Straßengüterverkehr nach Nutzfahrzeuggröße (<3,5t, 3,5t bis <12t, 12t bis <20t, >20t sowie Sattelzugmaschinen), Schienengüterverkehr, Binnenschifffahrt, Luftverkehr national/international, Seeschifffahrt national/international.

Neben den klassischen Verkehrsindikatoren berechnet ASTRA-M die Entwicklung der Fahrzeug-Neuzulassungen und -Bestände für Pkw, Busse, leichte und schwere Nutzfahrzeuge detailliert nach Segmenten/Größenklassen und Antriebsarten in Anlehnung an die statistische Klassifizierung des Kraftfahrt-Bundesamtes (Kraftfahrt-Bundesamt [KBA], fortlaufend). Dabei differenziert ASTRA-M nach:

- ▶ **Pkw:** Antriebsart nach Benzin (Verbrenner), Diesel (Verbrenner), CNG (Verbrenner), LPG (Verbrenner), Mild-/Vollhybrid (Verbrenner), Plug-In Hybrid, Elektro, H₂-Brennstoffzelle sowie Segmente nach Kleinstfahrzeuge, Kleinfahrzeuge, Kompaktklasse, Mittelklasse, Oberklasse, Gelände & SUV, Vans.
- ▶ **Busse:** Antriebsart nach Diesel, Mild-/Voll-Hybrid, CNG, Elektro, H₂-Brennstoffzelle sowie Segmente nach Stadt- und Reisebus.
- ▶ **Leichte Nutzfahrzeuge:** Antriebsarten identisch zu Pkw sowie Segmente nach KEP, Gewerblich, Flottenbetreiber, Privat.
- ▶ **Schwere Nutzfahrzeuge:** Antriebsart nach Diesel, Diesel-Hybrid, CNG, LNG, Elektro, Oberleitungs-Hybrid, H₂-Brennstoffzelle sowie Größenklassen nach 3,5-7,5t, 7,5-12t, 12-20t, >20t, Sattelzugmaschinen.

Resultierend aus den spezifischen Energieverbräuchen der einzelnen Fahrzeugklassen und -antriebe berechnet das Modell den Endenergieverbrauch nach Energieträger sowie die Treibhausgasemissionen nach den Regeln des Bundes-Klimaschutzgesetzes.

Referenzen:

- ▶ Schubert, M., Kluth, T., Nebauer, G., Ratzenberger, R., Kotzagiorgis, S., Butz, B., Schneider, W. & Leible, M. (2014). *Verkehrsverflechtungsprognose 2030: Schlussbericht*. <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf> [06.11.2025]
- ▶ Schade, W., Haug, I., Emmerich, J., Berthold, D., Oehme, R., Streif, M., Khanna, A., Emmerich, C., Krail, M., Anstett, P., Walther, C. & Waßmuth, V. (2023). *Gestaltung des MKS-Referenzszenarios für die Periode 2022 bis 2050 (REF-2050): Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)*. <https://m-five.de/publikationsartikel/gestaltung-des-mks-referenzszenarios-fuer-die-periode-2022-bis-2050-ref-2050> [17.04.2024]
- ▶ Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (fortlaufend). *Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen*.

https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz13_b_uebersicht.html [06.11.2025]

Methodischer/mathematischer Ansatz

ASTRA-M ist ein integriertes, systemdynamisches Modell. Die Grundprinzipien von System Dynamics werden in Sterman (2000) erläutert. Es berechnet in den meisten Modulen die Outputs bottom-up. Durch die Verwendung der Dynamik aus Rückkopplungsschleifen zwischen sich beeinflussenden Variablen ist ASTRA-M mathematisch gesehen ein nicht-lineares Modell. In der Verkehrsmodellierung und der Fahrzeugflottenmodellierung kommen ökonomische Ansätze basierend auf der Methodik von diskreten Wahlentscheidungen (Logit-Modelle) zum Einsatz (Dios Ortúzar & Willumsen, 1990). Logit-Modelle verwenden Nutzenfunktionen, die im Fall der Verkehrsmittelwahl und der Antriebswahl negative Kosten (Fahrtkosten plus monetarisierte Fahrtzeiten beim Modal Split sowie Total Cost of Ownership (TCO) bei der Antriebswahl) verwenden und diese gewichtet mit einem Faktor Beta und einem additiven Widerstandsterm über eine Exponentialfunktion in den Vergleich mit den alternativen Optionen (Verkehrsmittel bzw. Antriebsart) eingehen lassen. Eine ausführliche Beschreibung der modellierten Wahlentscheidungen mittels Logit- sowie TCO-Ansatz findet sich in Schade et al. (2023).

Im Detail wird in der Verkehrsmodellierung der Vier-Stufen-Ansatz verwendet. Dieser umfasst:

1. Verkehrserzeugung
2. Zielwahl
3. Verkehrsmittelwahl
4. Routenwahl

Diese Grundstruktur gilt sowohl für den Personen- als auch den Güterverkehr. Dennoch unterscheiden sich die beiden im Detail, auf Unterschiede wird wenn notwendig eingegangen.

1. Verkehrserzeugung

Die Verkehrserzeugung legt das zugrundeliegende Mobilitätsbedürfnis anhand von Wegen fest. Im Personenverkehr hängt dies maßgeblich von der Bevölkerung ab und den Wegen pro Person und Tag. Das modell-interne Bevölkerungsmodell wurde an die Projektionen angepasst. Die Wege pro Person und Tag werden aus der MiD (Mobilität in Deutschland) gewonnen.

Im Güterverkehr sind die zentralen Größen Produktionswert, Außenhandel und Transitverkehre, wobei die Produktionswerte an die Rahmendaten der Projektionen 2025 angepasst wurden. Anhand von Wert-Gewicht-Umrechnungsfaktoren werden die Produktionswerte in Aufkommen (Tonnen) umgerechnet. Es findet auch eine Zuordnung der sektoralen Produktionswerte zu drei Gütergruppen statt (Container, Schüttgut und Stückgut). Zudem findet eine Zuordnung zu den Zonen (NUTS-2) statt.

Die verwendete Formel für die Verkehrserzeugung ist eine Regressionsgleichung:

$$T_i = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

- T_i : Anzahl der erzeugten Reisen in Zone i
- $X_1, X_2, \dots, X_n$: Einflussfaktoren

2. Zielwahl

Hier wird modelliert, wie die erzeugten Reisen zwischen den Zonen verteilt werden. Dies erfolgt mithilfe eines Gravitationsmodells, das die Attraktivität von Zielzonen und die Entfernung zwischen Zonen berücksichtigt.

Gravitationsmodell:

$$T_{ij} = k \cdot \frac{O_i \cdot D_j}{f(c_{ij})}$$

mit Widerstandsfunktion $f(c_{ij})$:

$$f(c_{ij}) = c_{ij}^\beta$$

mit:

- ▶ T_{ij} : Anzahl der Reisen von Zone i nach Zone j
- ▶ O_i : Anzahl der von Zone i ausgehenden Reisen
- ▶ D_j : Anzahl der in Zone j endenden Reisen
- ▶ c_{ij} : Widerstand (z. B. Reisezeit oder Entfernung zwischen i und j)
- ▶ i : Ursprung (Zone)
- ▶ j : Ziel (Zone)

3. Verkehrsmittelwahl

Die Verkehrsmittelwahlfunktion im Rahmen des Multinomialen Logit-Modells (MNL) basiert auf der Idee, dass Individuen bei der Wahl zwischen verschiedenen Verkehrsmitteln (z. B. Auto, Bus, Fahrrad, Bahn) das Verkehrsmittel wählen, das ihnen den höchsten persönlichen Nutzen bringt. Die Wahrscheinlichkeit P_i , dass eine Person das Verkehrsmittel i wählt, wird durch die folgende Formel beschrieben. Die Wahl im Güterverkehr erfolgt analog:

$$\text{Logit-Modell: } P_{im} = \frac{e^{V_{im}}}{\sum_n e^{V_{in}}}$$

$$\text{Nutzenfunktion: } V_{im} = \alpha_{im} + \beta \cdot GK_{im}$$

mit:

- ▶ m : Verkehrsmittel (z. B. Auto, Bus, Fahrrad)
- ▶ n : Alternative (z. B. Verkehrsmittelooptionen im Logit-Modell)
- ▶ P_{im} : Wahrscheinlichkeit, dass Verkehrsmittel m für Reisen aus Zone i gewählt wird
- ▶ V_{im} : Nutzen für Verkehrsmittel m
- ▶ α_{im} : Reisezeit für Verkehrsmittel m
- ▶ GK_{im} : Generalisierte Kosten (Kosten und Zeiten) für Verkehrsmittel m

Unterschieden werden folgende Modes:

Im Personenverkehr

- ▶ Pkw
- ▶ SPFV
- ▶ SPNV
- ▶ SSU
- ▶ Reisebus

- ▶ Linienbus
- ▶ Rad
- ▶ Fuß
- ▶ Carsharing
- ▶ Ridepooling
- ▶ Scootersharing
- ▶ Luft national(*)
- ▶ Luft international(*)

Im Güterverkehr

- ▶ LKW $\leq 3,5t$
- ▶ LKW $> 3,5 - 12t$
- ▶ LKW $> 12t$
- ▶ Schienengüterverkehr
- ▶ Binnenschifffahrt
- ▶ Luftfracht national(*)
- ▶ Luftfracht international(*)
- ▶ Seeschiff national(*)
- ▶ Seeschiff international(*)

(*) Diese Verkehrsträger wurden im Rahmen des Projektes separat und mit einem neuen Ansatz modelliert. Die Methode unterscheidet sich deshalb von der hier beschriebenen. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich am Ende dieses Abschnitts.

4. Routenwahl

Im letzten Schritt wird klassischerweise ermittelt, welche Wege durch das Netz genutzt werden und wie sich der Verkehr auf die Straßen verteilt. Hier nutzt ASTRA-M eine Vereinfachung. Die Umlegung wird anhand von zwei Ansätzen umgesetzt. Überregionale Verkehre werden anhand einer Quell-Ziel-Matrix umgelegt. Nähere Verkehre (innerhalb von NUTS 2-Zonen) werden anhand von Distanzbändern umgelegt. Für den Personenverkehr werden folgende Distanzbänder unterschieden

- ▶ Lokal (0-2km)
- ▶ Kurz (2-10km)
- ▶ Mittellang (10-50km)
- ▶ Lang ($> 50km$)

Die Begriffe Personenkilometer (Pkm) und Tonnenkilometer (Tkm) werden verwendet, um die Transportleistung im Personen- bzw. Güterverkehr zu messen. Ihre Berechnung erfolgt ebenfalls in diesem Schritt und nach klar definierten Formeln:

$$Pkm = \sum_{i=1}^n P_i \cdot d_i$$

P_i : Anzahl der beförderten Personen auf einer Strecke i

d_i : Länge der Strecke i (in Kilometern) basierend auf Distanzband oder Matrix

n : Anzahl der Strecken oder Fahrten

$$Tkm = \sum_{i=1}^n T_i \cdot d_i$$

T_i : Masse der transportierten Fracht (in Tonnen) auf einer Strecke i

d_i : Länge der Strecke i (in Kilometern) basierend auf Distanzband oder Matrix

n : Anzahl der Strecken oder Transporte

Flugverkehr, Cargoflieger und Küsten-/Seeschiff

Der inländische und internationale Passagierflugverkehr wird in ASTRA-M mit einem vereinfachten Ansatz modelliert. Dabei fließen die Entwicklung des Pro-Kopf-Einkommens und die Entwicklung der Ticketpreise in die Entwicklung der Personen-Kilometer für beide Kategorien ein. Dabei unterscheidet ASTRA-M Flugverkehr zu touristischen Zwecken von Geschäftsreiseverkehr, indem unterschiedliche Elastizitäten (Department for Transport, 2022) einfließen. Änderungen durch Kerosinpreisschwankungen wirken sich damit auf die Entwicklung der Personen-Kilometer direkt aus.

Der inländische und internationale Luftfrachtverkehr wird in ASTRA-M ebenfalls mit einem vereinfachten Ansatz modelliert. Die Modellierung ist produktionsgetrieben. Analog zum Ansatz in den anderen Güterverkehrsmodi wird aus den exogenen Produktionswerten ein Aufkommen berechnet. Dieses ist für die Quell-Flughäfen Deutschland flughafenscharf. International werden die Ziel-Flughäfen ländergenau modelliert. Die Quell-Ziel-Verteilung der Güter erfolgt anschließend statisch über den Modellzeitraum. Das Aufkommen wird um die Belly Carrier reduziert, somit werden nur reine Frachtflüge und -aufkommen ausgewiesen.

Der Küsten-/Seeverkehr wird ebenfalls vereinfacht modelliert und in inländische und internationale Verkehre unterteilt. Die Produktionswerte werden in Aufkommenswerte umgerechnet. Das Aufkommen an der Quelle erfolgt wiederum hafengenau. National wird also Hafen für Hafen abgebildet. International wird vereinfacht, indem für mittlere Distanzen europäische Länder und für lange Distanzen Kontinente verwendet werden. Die Verteilung ist wiederum statisch über die Zeit.

Referenzen:

- Dios Ortúzar, J. de & Willumsen, L. G. (1990). *Modelling Transport*. Wiley. <https://books.google.de/books?id=XzVPAAAAMAAJ> [17.12.2025]
- Schade, W., Haug, I., Emmerich, J., Berthold, D., Oehme, R., Streif, M., Khanna, A., Emmerich, C., Krail, M., Anstett, P., Walther, C. & Waßmuth, V. (2023). *Gestaltung des MKS-Referenzszenarios für die Periode 2022 bis 2050 (REF-2050): Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)*. <https://m-five.de/publikationsartikel/gestaltung-des-mks-referenzszenarios-fuer-die-periode-2022-bis-2050-ref-2050> [17.04.2024]

- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Higher Education. Irwin/McGraw-Hill.
<https://books.google.de/books?id=CCKCQgAACAAJ> [17.12.2025]

OpenSource

Auf eine Open Source-Strategie zur Verwendung des ASTRA-M-Modells wurde aus verschiedenen Gründen verzichtet. Diese liegen vorrangig in der Komplexität eines nicht-linearen System Dynamics-Modells begründet. ASTRA-M ist ein über 25 Jahre gewachsenes Modell, das kontinuierlich von einem erfahrenen Modellierer-Team bestehend aus Mitarbeitenden des Fraunhofer ISI und von M-Five weiterentwickelt wurde. Es enthält ca. 9.000 Variablen und ist eine der größten Modellanwendungen der Software Vensim. Daher kann bei einer Veröffentlichung des Programmcodes nicht sichergestellt werden, dass nicht-erfahrene Modellierende Anwendung und Weiterentwicklung fehlerfrei durchführen. Zusätzlich bedürfen System Dynamics-Modelle spezieller und nicht kostenfrei verfügbarer Software. Letztlich baut ASTRA-M auf dem Wissen zahlreicher wissenschaftlicher Projekte und Dissertationen auf, in die sowohl das Fraunhofer ISI als auch M-Five investiert haben.

M-Five finanziert sich zu 100 % über Projekte (keine Fremd- oder Grundfinanzierung). Einzelne Modelle von ASTRA-M wurden in Eigenleistung erstellt und sind Firmeneigentum. Geteilt werden Annahmen, Inputs und Ergebnisse, jedoch nicht der Modellcode.

Parameter

ASTRA-M enthält ca. 9.000 Variablen. Zentrale Parameter sind:

- Demografische & Wirtschaftliche Parameter
- Bevölkerungsentwicklung: Gesamtzahl, Altersstruktur
- Bruttoinlandsprodukt (BIP): Wirtschaftswachstum, Inflation
- Energiepreise: Strom, Wasserstoff, fossile Kraftstoffe
- CO₂-Preispfad: Entwicklung der Bepreisung für Emissionen
- Verkehrsnachfrage & Infrastruktur
- Personenverkehr: Entwicklung des motorisierten Individualverkehrs (MIV), öffentlicher Verkehr, Fahrrad- & Fußverkehr
- Güterverkehr: Modalanteile von Straße, Schiene, Binnenschifffahrt
- Verkehrsinfrastruktur: Straßennetz, Schienennetz, Lade- & Tankinfrastruktur
- Fahrzeugflotten & Antriebsarten
- PKW-Flotte: Kaufentscheidungen, Hochlauf von Elektrofahrzeugen, Batteriepreise
- Leichte & schwere Nutzfahrzeuge (LNF & SNF): Anteil E-LKW, Wasserstoff-LKW, Diesel-LKW
- Bus-Flotte: Elektrifizierung, Förderung alternativer Antriebe
- Technologische & Politische Maßnahmen
- Förderprogramme für E-Mobilität, Ladeinfrastruktur, synthetische Kraftstoffe
- CO₂-Standards für Fahrzeuge (PKW, LNF, SNF)

- ▶ Mauttarife & Steuerpolitik für emissionsarme Fahrzeuge
- ▶ ÖPNV-Ausbau & Verbesserungen im Schienenverkehr
- ▶ Energie- & THG-Emissionen
- ▶ Endenergieverbrauch (EEV): Aufteilung nach Antriebsart & Verkehrsträger
- ▶ THG-Emissionen: Berechnung als CO₂-Äquivalente

Die zentralen Indikatoren aus ASTRA-M werden bottom-up modelliert.

Programmiersprache

- ▶ Vensim-interne Programmiersprache (Methode nach System Dynamics)

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

ASTRA-M verwendet einzelne, sich gegenseitig und endogen beeinflussende Module. Es ist strukturiert nach Modulen für die Bevölkerung (POP), Makroökonomie (MAC), Personenverkehr (PASS), Güterverkehr (FRE), Fahrzeugflotten (VFT), Infrastruktur (INF) und Emissionen/Energieverbrauch (ENV). Die Module sind miteinander über Schnittstellen verbunden. Siehe dazu Abschnitt "Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen".

Regelmäßige Kalibrationen sowie ein kontinuierliches Update von exogenen Daten stellen die Validierung der Prognosen sicher. Dabei werden fehlerhafte Parametrisierungen über detaillierte Wirkungsanalysen und durch auftretende Unplausibilitäten überprüft und ggf. korrigiert.

Räumliche Auflösung

Räumliche Variablen sind in den Kategorien städtisch und ländlich (basierend auf RegioStar 2), sowie differenziert nach NUTS-2-Regionen unterteilt. Im Verlauf der Rechnungen werden Ergebnisse auf nationaler Ebene aggregiert.

Sektoren

ASTRA-M bildet die THG-Emissionen des nationalen Verkehrssektors nach Definition des Bundes-Klimaschutzgesetzes ab.

Software

- ▶ Modellierung: Vensim (Ventana Systems)
- ▶ Modellinputdaten: Microsoft Excel, Python, R, SQL-Datenbanken

Techniken

- ▶ Das Modell bildet den Verkehrssektor mit den dazugehörigen Technologien und Energieinfrastrukturen ab. ASTRA-M unterscheidet heute und zukünftig nach Einschätzungen der wissenschaftlichen Fachliteratur verfügbare Antriebsarten. Darüber hinaus werden Funktionen und Wirkungen der Automatisierung und Vernetzung von Verkehrsmitteln berücksichtigt.
- ▶ Pkw werden nach KBA-Segmenten differenziert. Die Klassifizierung von Lkw sowie anderen Verkehrsmitteln ist gewichtsbezogen und orientiert sich nach Einteilung des KBA.
- ▶ Daten zu Kosten und Entwicklungen der Technologien werden in einer internen Technologiesdatenbank verwaltet. Diese ist derzeit nicht öffentlich zugänglich, jedoch können Teile in Schade et al. (2023) eingesehen werden.

Referenzen:

- Schade, W., Haug, I., Emmerich, J., Berthold, D., Oehme, R., Streif, M., Khanna, A., Emmerich, C., Krail, M., Anstett, P., Walther, C. & Waßmuth, V. (2023). *Gestaltung des MKS-Referenzszenarios für die Periode 2022 bis 2050 (REF-2050): Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)*. <https://m-five.de/publikationsartikel/gestaltung-des-mks-referenzszenarios-fuer-die-periode-2022-bis-2050-ref-2050> [17.04.2024]

Treibhausgasemissionen

ASTRA-M bildet die Emissionen von CO_{2aq} für alle Verkehrsmittel ab.

Unsicherheit

- ASTRA-M bildet komplexe Wechselwirkungen in Verkehr, Wirtschaft, Gesellschaft und Umwelt ab und umfasst ein Gleichungssystem mit über 9.000 Variablen. Durch die benötigten Vereinfachungen der Wirkungsketten im Modell (siehe Abschnitte „Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien“ sowie „Methodischer/mathematischer Ansatz“) entstehen durch die Bandbreite der Ergebniserzeugung an dieser Stelle Unschärferelationen:
 - In der räumlichen Auflösung entstehen Unsicherheiten beispielsweise bei der Umlegung von Quelle-Ziel-Matrizen auf die verfügbare Verkehrsinfrastruktur oder der Modellierung kleinräumiger Verkehrsströme.
 - In der zeitlichen Auflösung entstehen Unsicherheiten beispielsweise bei der Darstellung disruptiver oder unterjähriger Ereignisse (z. B. Finanzkrise 2008, 9-Euro-Ticket in 2022).
- Für manche Modell-Inputgrößen sind (noch) keine repräsentativen, empirisch ableitbaren Daten verfügbar, beispielsweise zur Verkehrsmittelwahl mit Hilfe multimodaler Mobilitätsplattformen. Die Abbildung solcher Begebenheiten ist stark annahmegetrieben und damit schwer in der Plausibilisierung.
- Die zeitliche Fortschreibung relevanter Modell-Parameter ist häufig annahmegetrieben bzw. muss durch eine robuste Szenario-Definition plausibilisiert werden. Sofern empirisch beispielsweise aus linearen oder multiplen Regressionen ableitbare Beziehungen von Variablen existieren (beispielsweise Analysen auf Basis bevölkerungsrepräsentativer Befragungen, z. B. Nobis & Kuhnimhof, 2018), wird auf diese zurückgegriffen. Durch die Kalibrierung an langen Zeitreihen (1995 bis 2023 bzw. nach Verfügbarkeit) werden weitere Unsicherheiten reduziert. Im Falle eines Fehlens von empirisch ableitbaren Daten können Sensitivitätsrechnungen dazu beitragen, Unsicherheiten zu minimieren.
- Unsicherheiten werden in ASTRA-M nicht explizit quantifiziert, sondern in der Regel in Abhängigkeit der Domäne (Personenverkehr, Güterverkehr etc.) methodisch in Form von Szenarien und Sensitivitäten berücksichtigt. Soweit möglich, finden dabei interinstitutionelle Vergleiche und Validierungen mit den Ergebnissen anderer Modellierungen statt, um die Unsicherheiten zu reduzieren. Auch durch die Erfahrung der Modellierenden muss sichergestellt werden, dass das Modellverhalten plausibel und Ergebnisse robust sind. Anpassungen an aktuelle Entwicklungen und die zeitliche Aktualisierung von Input-Daten stellen in einem kontinuierlichen Prozess sicher, dass das Modell in der Historie korrekt kalibriert und der Realität entsprechend (unter Berücksichtigung der Unschärferelationen und weiterer Unsicherheiten) reagiert.

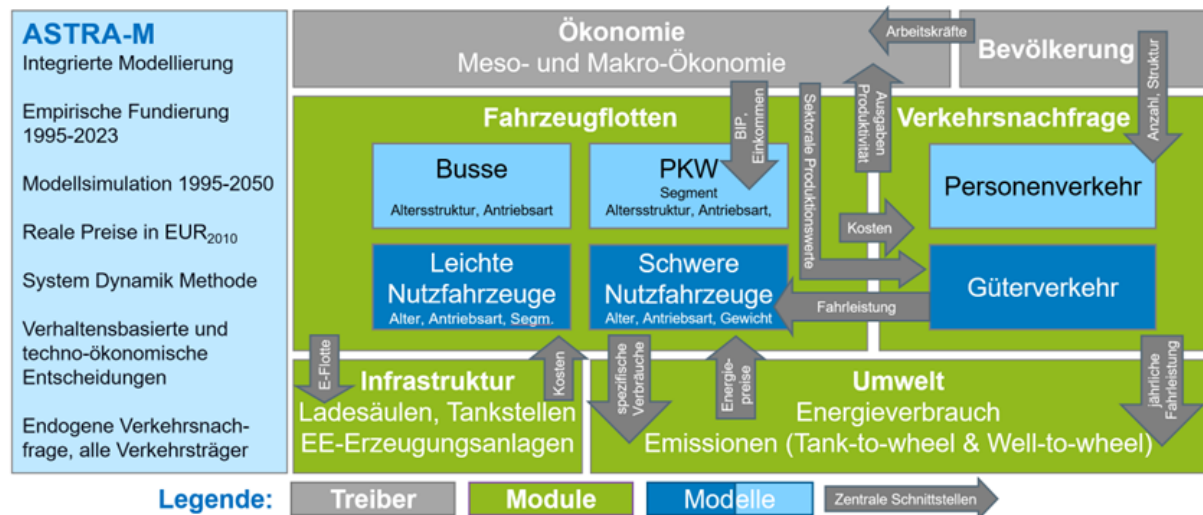
- Eine Analyse aller Unsicherheiten nach Walker et al. (2003) wurde bisher nicht durchgeführt.

Referenzen:

- Nobis, C. & Kuhnimhof, T. (2018). *Mobilität in Deutschland 2017 - MiD Ergebnisbericht: Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15)*. https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf [17.04.2024]

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 1: Visualisierung des ASTRA-M Modells und dessen Funktionsweisen



Quelle: Eigene Darstellung, M-Five

Wesentliche endogene und exogene Strukturen/Variablen

Endogene Strukturen:

- Bevölkerungsentwicklung nach Altersgruppen (kann auch exogen implementiert werden)
- Verkehrsnachfrage (Aufkommen, Verkehrs- und Fahrleistungen)
- Bestand und Neuzulassungen bei Fahrzeugflotten
- Alter, Größenklasse und Antriebsart der Fahrzeugflotten
- Endenergieverbrauch, Primärenergieverbrauch und THG-Emissionen
- Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts (wird für dieses Projekt exogen implementiert, da anhand der Rahmenbedingungen vorgegeben).

Endogene Variablen (ausgewählte projekt-relevante Variablen):

- Verkehrsaufkommen (Wege/Tonnen nach Distanzband (Distanzgruppe) und Mode (Verkehrsmittel))
- Verkehrsleistung (Personen-km/Tonnen-km nach Wegezweck/Güterkategorie, Distanzband und Mode)
- Fahrleistung (Fahrzeug-km nach Wegezweck/Güterkategorie, Distanzband und Mode)

- ▶ Anzahl der Fahrzeuge (Neuzulassungen und Bestand) nach Alter und Antriebsarten
- ▶ Endenergie- und Primärenergieverbrauch
- ▶ THG-Emissionen
- ▶ Bedarf und Aufbau der Energieinfrastrukturen für Verkehr
- ▶ Gesamtinvestitions- und Nutzungskosten

Exogene Variablen:

- ▶ Emissionsfaktoren, (teils endogene Rückkopplungen möglich)
- ▶ Distanzen (teils endogene Rückkopplungen möglich)
- ▶ Beladungsfaktoren bzw. Besetzungsgrade (teils endogene Rückkopplungen)
- ▶ Jahresfahrleistungen bei Nutzfahrzeugen
- ▶ Fahrzeugpreise (u. a. Batteriepreise) und Betriebskosten (teils endogene Rückkopplungen)
- ▶ Politikparameter wie Steuersätze, Gebühren- und Abgabenhöhe (z. B. LKW-Maut)
- ▶ Kraftstoffkosten (teils endogene Rückkopplungen von Energieinvestitionen)
- ▶ Bevölkerung (kann auch endogen berechnet werden)
- ▶ Bruttoinlandsprodukt

Mit ASTRA-M lassen sich derzeit relevante Politikinstrumente im Verkehrssektor abbilden. Zu diesen gehören u. a.: preisliche und fiskalische Instrumente (z. B. Subventionen, Steuern, Förderinstrumente, Pkw-Maut, Innenstadtmaut, Parkgebühren, etc.), Ordnungsrechtinstrumente (bspw. Tempolimit, EU-CO₂-Flottenzielwerte, Niedrig-/Nullemissionszonen) sowie Infrastrukturmaßnahmen (bspw. Deutschlandtakt, Radverkehrsförderung). ASTRA-M berechnet Wechselwirkungen von Instrumentenbündeln endogen. Alle Instrumente wirken gleichzeitig auf Kosten, Verhalten und Kaufentscheidung der Nutzer*innen. ASTRA-M kann durch die Modellierung der Wechselwirkungen die Überschätzung von Wirkungen vermeiden, beispielsweise von Instrumenten zur Verlagerung auf den Schienenverkehr bei paralleler Förderung der Elektrifizierung der Antriebe. Eine isolierte Betrachtung von Verlagerungswirkungen würde höhere Minderungswirkungen ergeben, bei gleichzeitiger Förderung der Elektromobilität wird die Minderung jedoch kleiner ausfallen, weil die spezifischen THG-Emissionen des Straßenverkehrs parallel sinken.

Wesentliche Konzepte und Annahmen

Verkehrsnachfrage:

- ▶ Sowohl der Personen- als auch der Güterverkehr werden in ASTRA-M bottom-up über ein State-of-the-art-4-Stufen-Modell modelliert. Dabei wird zunächst das Verkehrsaufkommen für die NUTS-2-Regionen (weiter differenziert nach städtisch und ländlich gemäß RegioStar 2) in Deutschland ausgehend von demografischen Indikatoren (Bevölkerung nach Altersgruppe) bzw. aus wirtschaftlichen Indikatoren (Produktionswerte nach Wirtschaftszweigen) und Erkenntnissen aus Mobilitätsumfragen (z. B. Nobis & Kuhnimhof, 2018) bzw. Güterverkehrserhebungen (z. B. Wermuth et al., 2012) erzeugt. In Abhängigkeit der Verkehrszwecke und der Güterkategorien wird im zweiten Schritt das Aufkommen auf potenzielle Zielzonen verteilt, beeinflusst durch die Entwicklung von Verkehrszeiten und

-kosten. Im dritten Schritt werden die Quell-Ziel-Verbindungen (NUTS-2 zu NUTS-2) auf verfügbare Haupt-Verkehrsmittel anhand generalisierter Kosten und Präferenzen in einer Logit-Funktion verteilt. Der vierte Schritt besteht in der Modell-Theorie aus einer Umlegung der Quell-Ziel-Matrizen auf die verfügbare Netz-basierte Verkehrsinfrastruktur. Dieser Schritt kann in ASTRA-M auf Grund der Datengröße der Verkehrsnetzdaten nur stark vereinfacht durchgeführt werden. Bei zu starker Belastung der Infrastruktur wirkt sich dies über Rückkopplungsschleifen negativ auf Verkehrszeiten aus, welche sowohl die Verkehrsverteilung als auch den Modal Split beeinflussen können. Damit kann ASTRA-M auch Wirkungen von Stauwirkungen grob abbilden.

Fahrzeugflotte:

- Die Fahrzeugflotten werden in ASTRA-M über die sogenannte Bestands-Fluss-Methodik (Kern von System Dynamics-Modellen: Bestände repräsentieren akkumulierte Größen, wie Fahrzeuge in einem Land, während Flüsse die Zu- und Abnahmen dieser Bestände beschreiben, etwa durch Zuflüsse wie Neukauf oder Abflüsse wie Verschrottung. Siehe z. B. Forrester, 1968) modelliert. Dies ermöglicht die Simulation der Alterung der Fahrzeugbestände und der Differenzierung nach Alterskohorten. Auf Basis eines Startwerts für den Fahrzeugbestand nach Fahrzeugtyp (Pkw, Busse, leichte und schwere Nutzfahrzeuge), Alter, Antriebsart und Fahrzeugsegment bzw. -größe für das Jahr 1995 werden die Bestände für jeden Zeitschritt durch Neuzulassungen erhöht und gleichzeitig durch durchschnittliche Verschrottungs- bzw. Exportwahrscheinlichkeiten (abgeleitet beispielsweise aus KBA, fortlaufend). Eine vollständige Nennung aller verwendeten KBA-Statistiken findet sich in der Dokumentation der Metadaten.) wieder reduziert. Bei Nutzfahrzeugen wird auf Basis der Verkehrsnachfrage und spezifischen jährlichen Fahrleistungen der Bedarf nach Neuzulassungen ermittelt und fließt im nächsten Zeitschritt wieder als Neuzulassungen in den Bestand ein. Bei Pkw wird der Bedarf nach Neuzulassungen getrieben von der wirtschaftlichen und demografischen Entwicklung sowie der Entwicklung von Fahrzeug- und Kraftstoffpreisen. Der Markthochlauf alternativer Antriebe wird mittels eines auf Total Cost of Ownership, Verfügbarkeiten von Antriebsarten sowie Präferenzen der Käufer basierten Logit-Ansatzes berechnet und in den Bestand integriert. ASTRA-M geht als Annahme davon aus, dass der Markthochlauf der öffentlichen Ladeinfrastruktur dem Markthochlauf von Elektrofahrzeugen folgt.

Energieverbrauch und THG-Emissionen:

- Der Energieverbrauch nach Energieträgern aus dem Sektor Verkehr wird unter mittels Verbrauchswerten aus dem CO₂-Monitoring der CO₂-Standards der Europäischen Umweltagentur (u. a. European Environment Agency [EEA], 2024) ermittelt und auch mit dem Handbuch für Emissionsfaktoren (Infras, 2023) abgeglichen. Über Umrechnungsfaktoren der DIN16258 (siehe CEN, 2013) werden die Energieverbräuche in CO_{2äq.} umgerechnet.

Referenzen:

- Nobis, C. & Kuhnimhof, T. (2018). *Mobilität in Deutschland 2017 - MiD Ergebnisbericht: Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15)*. https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf [17.04.2024]
- CEN (2013). *Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)* (EN 16258:2013-3). <https://dx.doi.org/10.31030/1894795>

- ▶ European Environment Agency (Hrsg.) (2024). *Monitoring of CO₂ emissions from passenger cars Regulation (EU) 2019/631: Datahub*.
<https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/fa8b1229-3db6-495d-b18e-9c9b3267c02b> [07.08.2024]
- ▶ Forrester, J. W. (1968). *Principles of systems*. Pegasus Communications, Inc.
- ▶ Infrac (Hrsg.) (2023). *The Handbook of Emission Factors for Road Transport*.
<https://www.hbefa.net/> [09.12.2025]
- ▶ Wermuth, M., Neef, C., Wirth, R., Hanitz, I., Löhner, H., Hautzinger, H., Stock, W., Pfeifer, M., Fuchs, M., Lenz, B., Ehrler, V., Schneider, S. & Heinzmann, H.-J. (2012). *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010): Schlussbericht*. <https://daten.clearingstelle-verkehr.de/240/9/KiD2010-Schlussbericht.pdf> [17.04.2024]
- ▶ Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (fortlaufend). *Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen*.
https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz13_b_uebersicht.html [06.11.2025]

3.2 CAPRI

Name

CAPRI

Version des Modells

Model revision number 11514 in SVN Branch DEproj

Betreibende Organisation

- ▶ Thünen-Institut für Betriebswirtschaft, Braunschweig, Deutschland
- ▶ Institut für Lebensmittel- und Ressourcenökonomik, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Deutschland
- ▶ Swedish University of Agricultural Sciences (SLU), Uppsala, Schweden

Link zu den betreibenden Organisationen: <https://www.capri-model.org/dokuwiki/doku.php?id=capri:team>

Zweck des Modells

CAPRI (Common Agricultural Policy Regional Impact) ist ein wirtschaftliches Modell des Agrarsektors, welches die gesamte EU auf regionaler NUTS-2-Ebene und die globalen Agrarmärkte abdeckt. Hauptziel ist die Ex-ante-Bewertung der Auswirkungen der Agrar-, Umwelt- und Handelspolitik auf Produktion, Einkommen, Märkte, Handel und Umwelt, von der globalen bis zur regionalen Ebene. CAPRI wird unter anderem zur Projektion der Entwicklung des landwirtschaftlichen Sektors (Flächennutzung, Tierzahlen) im Projektionsbericht eingesetzt. Die Ergebnisse werden an das Modell Py-GAS-EM übergeben, das die Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft modelliert.

Akteure

Im CAPRI-Modell wird das aggregierte Verhalten des landwirtschaftlichen Sektors auf regionaler Ebene, beispielsweise in definierten Regionen oder Ländern, simuliert. Im Gegensatz zu agentenbasierten Modellen verwendet CAPRI einen Top-Down-Ansatz, bei dem Entscheidungen

nicht auf die Ebene einzelner Akteure, wie etwa Landwirte, heruntergebrochen werden. Stattdessen werden Entscheidungen als aggregierte Verhaltensweisen dargestellt, die auf sektoralen Daten und allgemeinen Verhaltensannahmen basieren.

Dokumentation

PID/URL zur Benutzerdokumentation: <https://www.capri-model.org/dokuwiki/help/doku.php>

PID/URL zu einer Auswahl an Artikeln, in denen das Modell kritisch geprüft bzw. validiert wird: https://www.capri-model.org/doku.php?id=capri:capri_pub

Räumliche Abdeckung

NUTS-2-Ebene (Regierungsbezirke und Stadtstaaten) in der EU, Norwegen, dem Westbalkan und der Türkei. Außerhalb Europas werden im Marktmodell von CAPRI Länder (NUTS-0-Ebene) zu Handelsblöcken aggregiert.

Zeithorizont

Der Zeithorizont ist variabel. Typischerweise arbeitet CAPRI mit dem jeweils aktuellsten verfügbaren Jahr mit Datenverfügbarkeit zur Kalibrierung und modelliert das Zieljahr der untersuchten Politiken (z. B. 2030 oder 2050).

Zeitliche Auflösung

CAPRI hat eine jährliche Auflösung.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

Das Common Agricultural Policy Regional Impact (CAPRI)-Modell ist ein globales partielles Gleichgewichtsmodell für den Agrarsektor, mit einem Schwerpunkt auf der Europäischen Union. Es wurde für die Ex-ante-Folgenabschätzung von agrar-, umwelt- und handelspolitischen Maßnahmen entwickelt. Das Modell umfasst ein Angebotsmodul, das die EU und einige zusätzliche europäische Länder abdeckt (regionale Programmierungsmodelle für etwa 280 europäische Regionen mit detaillierter Berücksichtigung agrarpolitischer Maßnahmen). Dieses Modul ist eingebettet in ein Marktmodell, das auch Regionen außerhalb Europas abdeckt (globales Marktmodell mit Darstellung des bilateralen Handels zwischen Handelsregionen). Das CAPRI-Modell bietet somit eine globale Abdeckung, berücksichtigt jedoch keine potenziellen Wechselwirkungen mit nichtlandwirtschaftlichen Sektoren, abgesehen von der Landnutzung.

Für weitere Informationen: https://www.capri-model.org/dokuwiki/help/doku.php?id=introduction#what_is_capri

Methodischer/mathematischer Ansatz

CAPRI ist ein modular aufgebautes komparativ-statisches Modell und besteht aus einem Angebots- und einem Marktmodell, die iterativ in Verbindung stehen. Das Angebotsmodul besteht aus PMP (Positive Mathematical Programming)-kalibrierten Programmierungsmodellen auf NUTS-2-Ebene, die in jeder Iteration auf exogen vorgegebene Preise zurückgreifen. Ein Angebotsmodell umfasst ca. 50 pflanzliche und tierische Produktionsverfahren und ca. 50 Inputs und erzeugte Produkte für jede NUTS-2-Region in der EU. Jedes Modell maximiert das regionale bzw. Betriebsgruppeneinkommen zu gegebenen Preisen des Marktmodells und bestehenden GAP-Prämien in Abhängigkeit von Produktionsbeschränkungen wie Boden, Politikvariablen, Fütterungs- und pflanzlichem Düngemittelbedarf. Jedes regionale Programmierungsmodell definiert unter anderem, welche Menge bestimmter Futterkategorien (z. B. Getreide) oder einzelner Futtermittel (z. B. Futtermais, Gras, Stroh etc.) pro Tier in Abhängigkeit von den Futtermittelpreisen verwendet wird. CAPRI berücksichtigt dabei den Nährstoffbedarf der Tiere. Der gesamte Futtermittelverbrauch kann regional produziert oder zu festgelegten Preisen vom Markt bezogen werden. Diese Preise ändern sich jedoch mit jeder Iteration des Marktmodells.

Das Marktmodell umfasst ca. 40.000 Gleichungen und Variablen, die gleichzeitig gelöst werden. Viele Parameter, wie Elastizitäten, sind von anderen Modellen oder Publikationen übernommen. Die Angebots-, Verarbeitungs-, Futternachfrage- und Konsumnachfragefunktionen sind flexibel, um auf extern gegebene Eigen- und Kreuzpreiselastizitäten kalibriert zu werden. Das Modell unterstellt Profitmaximierung für Produzenten und Nutzenmaximierung für Konsumenten. Das Marktmodell ermittelt den Markträumungspreis. Das Angebotsmodell optimiert das Einkommen der Landwirte mit dem letzten Markträumungspreis des Marktmodells. Die iterative Kopplung zwischen Angebotsmodellen und Marktmodell erzeugt somit einen quasi endogenen Preis für die Angebotsmodelle.

Für weitere Informationen: https://www.capri-model.org/dokuwiki/help/doku.php?id=introduction#what_is_capri

OpenSource

Das CAPRI Modell ist open source und kann unter folgender URL heruntergeladen werden: https://www.capri-model.org/dokuwiki/help/doku.php?id=getting_started_with_capri

Parameter

Die wichtigsten Parameter in CAPRI umfassen die Anbauflächen, die Landnutzung, die Herdengrößen, die Düngemittelanwendung und die Futterzusammensetzungen. Weitere Parameter werden nach Möglichkeit aus historischen Daten abgeleitet, ergänzt um Literaturrecherchen und Expertenschätzungen.

Programmiersprache

CAPRI ist technisch in GAMS (General Algebraic Modeling System) geschrieben und wird gesteuert mittels eines grafischen Nutzerinterface, welches in Java programmiert ist.

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

CAPRI ist ein modular aufgebautes komparativ-statisches Modell und besteht aus einem Angebots- und einem Marktmodul, die iterativ in Verbindung stehen. Durch den modularen Aufbau von CAPRI können beispielsweise regionale Angebotsmodelle für einen bestimmten Mitgliedstaat der EU zu festen exogenen Preisen ohne Marktmodul ausgeführt werden.

Für weitere Informationen: https://www.capri-model.org/dokuwiki/help/doku.php?id=scenario_simulation#overview_of_the_system

Räumliche Auflösung

CAPRI arbeitet in der EU27, Norwegen, dem Westbalkan und der Türkei auf NUTS-2-Ebene (Regierungsbezirke und Stadtstaaten). Außerhalb Europas werden im Marktmodell von CAPRI Länder (NUTS-0-Ebene) in Handelsblöcken zusammengefasst.

Sektoren

CAPRI bildet den landwirtschaftlichen Sektor in Europa detailliert auf NUTS-2-Ebene und für Nicht-EU Länder auf nationaler Ebene (NUTS-0-Ebene) und Handelsblöcken ab.

Software

CAPRI ist technisch in GAMS (General Algebraic Modeling System) geschrieben und wird gesteuert mittels eines grafischen Nutzerinterface, welches in Java programmiert ist. Der GAMS-Programmierungscode sowie alle Daten sind mittels Subversion kontrolliert über TortoiseSVN.

Techniken

Im CAPRI-Modell stehen zahlreiche Technologien in der EU zur Verfügung, die zur Reduzierung der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen beitragen können. Dazu gehören unter

anderem die Präzisionslandwirtschaft sowie Biogasanlagen, die ausschließlich Gülle zur Energiegewinnung nutzen. Weitere Optionen umfassen den Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren und Fütterungsmaßnahmen. Basierend auf einer nicht-linearen Kostenfunktion wird der Implementierungsanteil jeder Technologie endogen für jede Region bestimmt. Da alle Technologien im Modell miteinander konkurrieren, hängt die Entscheidung über den Umfang der Einführung einer bestimmten Technologie von regionsspezifischen Faktoren ab. Zu diesen Faktoren zählen Kosten, Nutzen, die Verfügbarkeit von Wirtschaftsdünger und andere relevante Parameter.

Die Implementierung der Technologien wurde vom Joint Research Centre im Auftrag der Europäischen Kommission in das CAPRI-Modell integriert. Für mehr Informationen: <https://dx.doi.org/10.2760/4668>

Treibhausgasemissionen

CAPRI berechnet endogen die landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen der EU auf NUTS-2-Ebene basierend auf den Input- und Output-Daten der Produktionsaktivitäten im Angebotsmodul. Das CAPRI-Modell integriert ein detailliertes Stoffflussmodell pro Aktivität und Region (einschließlich expliziter Fütterungs- und Düngungsaktivitäten, d. h. des Abgleichs von Nährstoffbedarf und -verfügbarkeit) und berechnet die Erträge pro landwirtschaftlicher Aktivität. Auf dieser Grundlage werden die Treibhausgasemissionen gemäß den IPCC-Richtlinien (IPCC, 2006a) berechnet. Die aktivitätsbasierten Emissionsfaktoren werden mithilfe des Tier-2-Ansatzes berechnet. Falls entsprechende Informationen fehlen, wird der Tier-1-Ansatz verwendet (z. B. beim Reisanbau). Die Quantifizierung von Methanemissionen aus enterischer Fermentation und Güllemanagement erfolgt bei der Rinderhaltung nach dem Tier-2-Ansatz, während bei Schweinen, Geflügel, Schafen und Ziegen der Tier-1-Ansatz angewendet wird.

Weitere Informationen zur Berechnung der Treibhausgasemissionen finden sich in der Dokumentation des CAPRI-Modells: https://www.capri-model.org/dokuwiki/help/doku.php?id=the_capri_data_base#input_allocation

Zudem stehen im CAPRI-Modell zahlreiche Technologien in der EU zur Verfügung, die zur Reduzierung der landwirtschaftlichen Treibhausgasemissionen beitragen können. Dazu gehören unter anderem die Präzisionslandwirtschaft sowie Biogasanlagen, die ausschließlich Gülle zur Energiegewinnung nutzen. Weitere Optionen umfassen den Einsatz von Nitrifikationsinhibitoren und Fütterungsmaßnahmen.

Für mehr Informationen: <https://dx.doi.org/10.2760/4668>

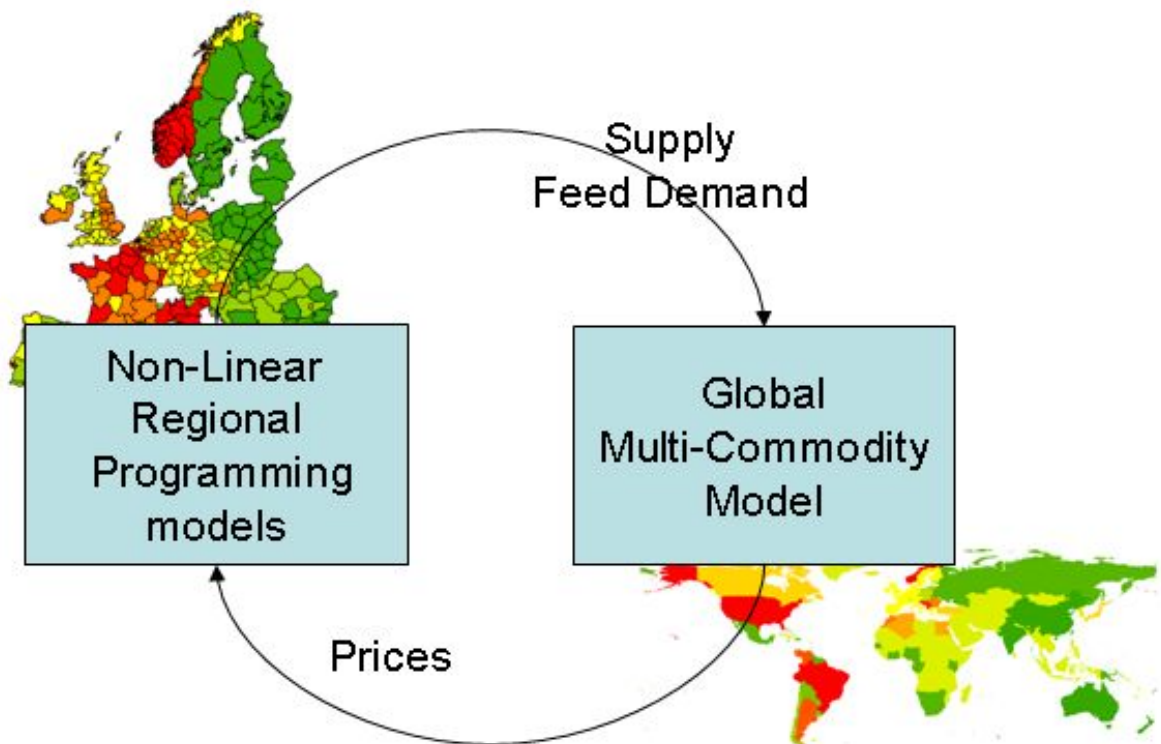
Unsicherheit

Das Common Agricultural Policy Regional Impact (CAPRI)-Modell ist ein globales partielles Gleichgewichtsmodell für den Agrarsektor und berücksichtigt dadurch keine potenziellen Wechselwirkungen mit nicht-landwirtschaftlichen Sektoren, abgesehen von der Landnutzung.

Unsicherheiten werden nicht explizit abgebildet und werden in der Regel im Rahmen von Sensitivitäten aufgezeigt.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 2: Visualisierung des CAPRI Modells und dessen Funktionsweisen



Quelle: Eigene Darstellung, Thünen Institut

3.3 ENUSEM

Name

Energie-Umwandlungs-Sektor-Modell

Version des Modells

Für jede Modellierungsrunde wird eine eigene Modellversion erstellt.

Eine explizite Versionsnummerierung erfolgt nicht. Die neueste Modellversion ist die für die Projektionen 2025 im Projekt Politiksznarien XII genutzte.

Betreibende Organisation

Öko-Institut e.V. – Institut für angewandte Ökologie

Zweck des Modells

ENUSEM wird zur Projektion von Szenarien immer im Modellverbund eingesetzt. Der Modellverbund kann je nach Art der Szenarien variieren, daher kann nicht für ENUSEM alleine beschrieben werden, welche Fragestellungen beantwortet bzw. nicht beantwortet werden können.

Die Entwicklung von ENUSEM verfolgte folgende Ziele:

- ENUSEM projiziert die Emissionsprojektionen in der CRF-Struktur des nationalen Treibhausgasinventars auf Basis nationaler (KSG, 2024) und internationaler Vorgaben (United Nations Framework Convention on Climate Change [UNFCCC], 2013), Governance-

Verordnung (Verordnung (EU) 2018/1999, 2018) und deren Durchführungsverordnung (Durchführungsverordnung (EU) 2020/1208, 2020)).

- ▶ ENUSEM bildet Energieverbräuche sowohl in der Inventarstruktur als auch der Energiebilanzstruktur ab, wobei relevante Unterschiede zwischen nationaler und europäischer Energiebilanz berücksichtigt werden (z. B. die Behandlung von Hochöfen und Umweltwärme).
- ▶ ENUSEM aggregiert für die Strommarktmodellierung notwendige Inputdaten (insbesondere Nachfragen nach Strom, Fern- und KWK-Wärme und strombasierten Brennstoffen).
- ▶ ENUSEM bildet diejenigen Teile des Umwandlungssektors ab, die nicht in anderen Sektormodellen enthalten sind.
- ▶ ENUSEM stellt für die Gesamtmodellierung die zentrale Energie- und Emissionsdatenbank dar und aggregiert aus den Einzeldaten wesentliche Gesamtergebnisse (siehe hierzu auch Abbildung im Abschnitt Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen). Dies sind beispielsweise:
 - Primärenergieverbrauch nach Energieträgern (siehe auch Kapitel 1.3 der Modelldokumentation (Emele & Moosmann, 2025))
 - Endenergieverbrauch nach Energieträgern (siehe auch Kapitel 1.3 der Modelldokumentation (Emele & Moosmann, 2025))
 - Endenergieverbrauch nach Sektoren (Industrie, GHD, Haushalte, Verkehr)
 - Bruttostromverbrauch
 - THG-Emissionen in der Sektorstruktur des Common Reporting Formats (CRF) (UNFCCC ohne Jahr) (UNFCCC, o.J.), zukünftig Common Reporting Tables (CRT) (UNFCCC, 2021). Dieses wird beispielsweise zur Befüllung der Berichtstabelle 1a des Anhangs XXV der Durchführungsverordnung (EU) 2020/1218 genutzt.
 - THG-Emissionen in KSG-Struktur (siehe KSG, 2024, Anlage 1 zu § 5)
 - THG-Emissionen unterteilt nach EU-ETS und ESR, ESR-Emissionen wiederum unterteilt in Emissionen innerhalb bzw. außerhalb des nEHS/ETS-2

Literatur:

- ▶ United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (o.J.). *Use of the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories and revision of the UNFCCC reporting guidelines for Annex I Parties to the Convention / UNFCCC*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and-review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/reporting-requirements/use-of-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories-and-revision-of-the-unfccc> [10.11.2025]
- ▶ United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2021). *Common Reporting Tables (CRT) on NIRs / UNFCCC*. <https://unfccc.int/documents/311076> [10.11.2025]

Akteure

ENUSEM modelliert Energieverbräuche und THG-Emissionen von Sektoren und keine Akteure.

Dokumentation

- ▶ PID/URL zur Benutzerdokumentation:
https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/energie-klimaschutz/OEKO-ENUSEM.pdf
- ▶ PID/URL zum Git-Repository: Nicht vorhanden
- ▶ PID/URL zu einer Auswahl an Artikeln, in denen das Modell kritisch geprüft bzw. validiert wird: Es gibt bisher keine Artikel, in denen das Modell explizit kritisch geprüft bzw. validiert wird, da das Modell bisher nur für die Auftragsforschung entwickelt und angewendet wurde. Für entsprechende Publikationen war in den bisherigen Projekten kein Budget kalkulierbar. Im Kontext der jeweiligen Projektarbeit wird das Modell regelmäßig sorgfältig überprüft.

Räumliche Abdeckung

ENUSEM bildet die Energieverbräuche und THG-Emissionen der Bundesrepublik Deutschland entsprechend der nationalen Energiebilanz und des nationalen Treibhausgasinventars ab (Territorialprinzip). Zusätzlich werden der abgehende internationale Luftverkehr sowie Bunkerungen von Hochseeschiffen in deutschen Häfen berücksichtigt.

Zeithorizont

ENUSEM deckt den Zeitraum von 1990 bis 2050 ab.

Startzeitpunkt (Basisjahr) ist in der Regel das letzte Jahr, für das historische Daten vorliegen. In der Vergangenheit war das Basisjahr meist zwei Jahre vor dem Jahr, in dem die Modellierungsarbeiten begannen.

Zeitliche Auflösung

ENUSEM hat eine jährliche Auflösung. In der Regel entspricht ein Modelljahr auch der tatsächlichen Auflösung. Sofern Inputdaten nur in gröberen Auflösungen vorliegen (z. B. Fünfjahresschritte), so werden die Zwischenjahre linear interpoliert.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

ENUSEM verfolgt das Ziel, eine vollständige Projektion der Emissionen entsprechend der Struktur des nationalen Treibhausgasinventars zu erstellen. Dabei sollen die Methoden, die bei der Erstellung des nationalen Treibhausgasinventars genutzt werden, entsprechend für die Projektionen angewandt werden. ENUSEM berechnet für die verbrennungsbedingten Emissionen (CRF 1.A), die diffusen Emissionen aus Brennstoffen (CRF 1.B) und Teile der Emissionen aus Industrieprozessen (CRF 2) die Emissionsdaten selbst aus den entsprechenden Aktivitätsdaten, die durch die entsprechenden Modelle projiziert wurden. Für die Sektoren Landwirtschaft (CRF 3), LULUCF (CRF 4), Abfallwirtschaft (CRF 5), sowie die F-Gase (Teil von CRF 2) liefern die entsprechenden Modelle direkt Emissionsdaten an ENUSEM, die in die Emissionsberechnung integriert werden.

Zusätzlich bildet ENUSEM Strukturen der deutschen und der europäischen Energiebilanzen teilweise nach. Durch den Verbund der Sektormodelle wird das Energiesystem nicht vollständig abgebildet. Daher werden manche Elemente des Energiesystems (z. B. Raffinerien oder Pipelineverdichter) mit vereinfachten Modellblöcken direkt in ENUSEM geschlossen (siehe auch Programmtechnische Gestaltungsprinzipien sowie die Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen.).

Methodischer/mathematischer Ansatz

ENUSEM ist ein Bottom-up-Modell, das intern mit einer detaillierten Subsektor- und Energieträgerstruktur arbeitet. ENUSEM benötigt nur mathematische Grundrechenarten. Ein Beispiel hierfür ist die Emissionsberechnung für die verbrennungsbedingten Emissionen:

$$\text{Emission} = \text{Aktivitätsrate} \cdot (1 - \text{Abscheiderate}) \cdot \text{Emissionsfaktor}$$

Häufig vorkommende Formeln sind dabei innerhalb von Excel als VBA-Formeln implementiert. Beispielsweise ist die beschriebene Emissionsformel wie folgt implementiert:

Abbildung 3: VBA Implementierung der oben dargestellten Emissionsformel für ENUSEM

```
Function Emission(vAktivitaetsrate As Variant, vEmissionsfaktor As Variant,
vAbscheiderate As Variant)
    If vEmissionsfaktor <> "Kein EF" Then
        If vAktivitaetsrate <> 0 And vAktivitaetsrate <> "" Then
            Emission = vAktivitaetsrate * vEmissionsfaktor * (1 -
vAbscheiderate)
        End If
    Else
        Emission = 0
    End If
End Function
```

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Aggregation von Detaildaten zu gröber aufgelösten Daten (z. B. von CRF-Quellgruppen zu KSG-Sektoren oder einzelnen ENUSEM-Energie-Subsektoren zu Energiebilanzsektoren) erfolgt über Summierungen. In Daten aus dem Treibhausgasinventar sind für fehlende Werte unterschiedliche Notation Keys definiert (z. B. NO = not occurring, IE = included elsewhere). In ENUSEM sind spezielle Summierungsfunktionen implementiert, die mit diesen Notation Keys umgehen können.

OpenSource

ENUSEM stellt durch seine Implementierung als Daten und Funktionalität integrierende Excel-Dateien einerseits ein Modell und andererseits eine Datenbank dar. Da auch nicht frei verfügbare und zum Teil vertrauliche Daten enthalten sind, ist eine Open-Source-Veröffentlichung in seiner jetzigen Form nicht möglich.

Parameter

Die wichtigsten modellinternen Parameter stellen die Emissionsfaktoren dar, die aus den historischen Aktivitäts- und Emissionsdaten des deutschen THG-Inventars abgeleitet werden (siehe auch Abschnitt [ENUSEM-Integration](#)). Mit einer Aktualisierung der historischen Emissions- und Aktivitätsdaten aktualisieren sich somit die Emissionsfaktoren in ENUSEM.

Weitere Parameter werden nach Möglichkeit ebenfalls aus historischen Daten abgeleitet, ergänzt um Literaturrecherchen, Expertenschätzungen oder werden von anderen Modellen im Modellverbund übernommen. Ein Beispiel sind die Splitfaktoren zur Aufteilung der Brennstoffeinsätze in die auf den EU-ETS- und den nEHS (siehe Kapitel 1.3 der ENUSEM-Modelldokumentation (Emele & Moosmann, 2025)), die für jeden Brennstoff in jedem der ENUSEM-Subsektoren benötigt werden. In diese gehen u. a. folgende Datenquellen ein:

- ▶ deutsche Article-21-Reports ³ ⁴
- ▶ Endberichte von Forschungsprojekten zum EU-Emissionshandel und dem BEHG/nEHS
- ▶ Modellierungsergebnisse von PowerFlex (siehe Abschnitt 3.12) zu kleinen BHKWs
- ▶ Schätzungen von ETS-Experten*Expertinnen am Öko-Institut

Andere Beispiele für ähnlich abgeleitete Parameter sind (sofern im jeweiligen Szenario relevant): Wirkungsgrade von in ENUSEM abgebildeten Teilen der Energiewirtschaft (z. B. Heizwerke, Pipelineverdichter und Elektrolyseure) sowie Emissionsfaktoren für neue Brennstoffe (z. B. Wasserstoff, PtL-Kraftstoffe, Ammoniak).

Literatur:

- ▶ Emele, L. & Moosmann, L. (2025). *Modellbeschreibung ENUSEM*.
https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/energie-klimaschutz/OEKO-ENUSEM.pdf [01.10.2025]

Programmiersprache

ENUSEM operiert mit Standard-Excel-Funktionen sowie eigenen in Visual Basic for Applications (VBA) programmierten Funktionen.

Programmetechnische Gestaltungsprinzipien

ENUSEM ist in drei Module unterteilt (siehe Abbildung im Abschnitt Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweise), die in drei separaten Excel-Dateien – ENUSEM-Kompilation, ENUSEM-Integration, ENUSEM-Dissemination – implementiert sind.

1. ENUSEM-Kompilation

Zweck des Moduls **ENUSEM-Kompilation** ist es, für die Strommarktmodellierung wichtige Daten bereitzustellen. Die Outputdaten von ENUSEM-Kompilation stellen also Inputdaten für das Strommarktmodell PowerFlex dar, siehe Datendokumentation. Dazu nutzt ENUSEM-Kompilation als Input Daten von den Endverbrauchssektormodellen und berechnet daraus zahlreiche Daten. Die von ENUSEM-Kompilation an PowerFlex übergebenen Daten umfassen neben Strom- und Wärmenachfragen beispielsweise auch Aktivitätsdaten wie zur Verfügung stehende Sondergasmengen (z. B. Gichtgas, Kokereigas, Raffineriegas) und Nachfragen nach synthetischen Brennstoffen (z. B. Wasserstoff, PtL-Kraftstoffe).

2. ENUSEM-Integration

ENUSEM-Integration stellt die zentrale Energie- und Emissionsdatenbank dar und folgt im Wesentlichen der Logik der nationalen Treibhausgasinventare und der IPCC-Guidelines (IPCC, 2006a). Folgende wesentliche Berechnungsschritte erfolgen:

³ <https://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/emt/>

⁴ <https://reportnet.europa.eu/public/country/DE>

- ▶ Aus historischen Emissions-⁵ und Aktivitätsdaten⁶ werden die notwendigen Emissionsfaktoren⁷ berechnet.
- ▶ Mithilfe dieser Emissionsfaktoren werden aus den projizierten Aktivitätsdaten die Emissionen berechnet.
- ▶ Für die verbrennungsbedingten Emissionen stellen die Brennstoffverbräuche die Aktivitätsdaten dar.
- ▶ Für die diffusen Emissionen stellen die projizierten Verbräuche von Braunkohle, Steinkohle, Mineralöl und Erdgas, die projizierte Förderung von Erdöl und Erdgas sowie Annahmen zur Entwicklung der Gasnetzlängen und die Rohstahlproduktion die relevanten Aktivitätsdaten dar.
- ▶ Für den Teil der Industrieprozessemissionen, die in ENUSEM berechnet werden, werden die nötigen projizierten Aktivitätsdaten aus den Produktionsdaten von FORECAST-Industry abgeleitet. Wo diese fehlen, werden historische Trends fortgeschrieben.
- ▶ Die Berechnung der EU-ETS/ESR/nEHS-Emissionen erfolgt für die verbrennungsbedingten Emissionen mit subsektor- und brennstoffspezifischen Splitfaktoren, für Details siehe Kapitel 1.3 der ENUSEM-Modellbeschreibung (Emele & Moosmann, 2025).

3. ENUSEM-Dissemination

Das Strommarktmodell PowerFlex übergibt an ENUSEM nur Ergebnisse für den Kraftwerkspark insgesamt, ohne weitere Branchendifferenzierung. **ENUSEM-Dissemination** teilt die projizierten Brennstoffeinsätze der Kraftwerke auf die vier CRF-Quellgruppen 1.A.1.a, 1.A.1.b, 1.A.1.c und 1.A.2 auf. Neben den Ergebnissen der Strommarktmodellierung selbst gehen weitere Aktivitätsdaten ein:

- ▶ Für 1.A.1.b (Raffineriekraftwerke, RaffKW): Wesentliche Treibergröße ist die Raffinerieaktivität, basierend auf der in ENUSEM-Kompilation berechneten Nachfrage nach Mineralölprodukten.
- ▶ Für 1.A.1.c (Übrige Kraftwerke des Umwandlungssektors, ÜbrUmKW): Braunkohlenachfrage von Industrie, GHD, Haushalten und Landwirtschaft (wegen Kraftwerken in Braunkohlebrikettfabriken)
- ▶ Für 1.A.2 (Industriekraftwerke, IKW):
 - Nachfrage nach industrieller KWK-Wärme, berechnet in ENUSEM-Kompilation auf Basis von Ergebnissen von FORECAST-Industry (siehe Abschnitt 3.4)
 - Brennstoffeinsatz an Biomasse und Müll für KWK von FORECAST-Industry (Abschnitt 3.4)

⁵ Die 2006 IPCC Guidelines beschreiben Emission (emissions) als: "Anthropogenic emissions and removals means that greenhouse gas emissions and removals included in national inventories are a result of human activities. The distinction between natural and anthropogenic emissions and removals follows straightforwardly from the data used to quantify human activity. In the Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) Sector, emissions and removals on managed land are taken as a proxy for anthropogenic emissions and removals, and interannual variations in natural background emissions and removals, though these can be significant, are assumed to average out over time." (Intergovernmental Panel on Climate Change (2006a), Band 1, Kapitel 1.1).

⁶ Die 2006 IPCC Guidelines beschreiben Aktivitätsdaten (activity data) als: "information on the extent to which a human activity takes place" (IPCC (2006a), Band 1, Kapitel 1.2).

⁷ Die 2006 IPCC Guidelines beschreiben Emissionsfaktoren (emission factors) als: "coefficients which quantify the emissions or removals per unit activity" (IPCC (2006a), Band 1, Kapitel 1.2).

- Für 1.A.1.a (Öffentliche Kraftwerke, ÖffKW): Alle Brennstoffeinsätze, die nicht einem der anderen drei Quellgruppen zugeordnet wurden

Bisher war in dieser Aufteilung eine starre Kopplung von Strom- und Wärmescheiben hinterlegt. In den Projektionen 2025 wurde unterstellt, dass es bei den mit Erdgas betriebenen Industriekraftwerken zu einer Entkopplung von Strom- und Wärmeproduktion kommt, sprich die rückläufige Wärmenachfrage dazu führt, dass die Erdgas-Industriekraftwerke mehr im Kondensationsbetrieb (reine Stromerzeugung) laufen.

In der Aufteilung werden für hergestellte Gase quellgruppenspezifische Besonderheiten entsprechend des Treibhausgasinventars berücksichtigt:

- Gichtgas wird komplett den IKW zugeordnet.
- Raffineriegas wird zum großen Teil den RaffKW, zum kleinen Teil den IKW zugeordnet.
- Sonstige Sondergase werden fast vollständig den IKW zugeordnet.

Schnittstellen

- Die drei ENUSEM-Module sind untereinander verlinkt, da alle drei in Excel implementiert sind.
- Die Schnittstelle für Input- und Outputdaten stellen in der Regel ebenfalls Excel-Dateien dar, in wenigen Fällen auch andere Formate (z. B. CSV).
- Die Schnittstellen zu anderen Modellen stellen ebenfalls Excel-Dateien dar und werden als Interface-Dateien bezeichnet.

Automatische Checks

In ENUSEM sind eine Vielzahl von Kontrollrechnungen (Checksummen und -differenzen) implementiert, die Daten- und Berechnungsfehler aufzeigen. Dies umfasst beispielsweise:

- Checksummen und -differenzen, die sicherstellen, dass keine Daten in einzelnen Verarbeitungsschritten verloren gehen.
- Checks auf negative Werte bei Differenzenbildung.

Literatur:

- Emele, L. & Moosmann, L. (2025). *Modellbeschreibung ENUSEM*. https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/energie-klimaschutz/OEKO-ENUSEM.pdf [01.10.2025]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2006a). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> [29.10.2023]

Räumliche Auflösung

ENUSEM bildet Deutschland als Ganzes ab, ohne weitere räumliche Unterteilung. Die Modellierungsregion entspricht daher NUTS: DE.

Sektoren

ENUSEM kann die Energie- und Emissionsdaten der sieben Sektoren (KSG-Sektoren) nach Bundes-Klimaschutzgesetz Anlage 1 (KSG, 2024) abbilden. Intern arbeitet ENUSEM mit einer deutlich detaillierteren Sektorstruktur als der KSG-Sektorstruktur.

Für das Energiesystem ist die Sektorstruktur von ENUSEM in vielen Fällen detaillierter als die Struktur in den CRF-Tabellen. Die folgende Tabelle listet alle Energie-Subsektoren auf und zeigt, welchen CRF-Kategorien und welchen KSG-Sektoren diese jeweils zugeordnet sind. Zusätzlich zeigt die Tabelle die Zuordnung zum Energiebilanzsektor.

Tabelle 1: Subsektoren des Energiesystems in ENUSEM

Subsektor (internes Kürzel)	CRF-Kategorie	KSG-Sektor	Energiebilanzsektor
Öffentliche Kraftwerke – Stromerzeugung (ÖffKW_P)	1.A.1.a	Energiewirtschaft	Umwandlung
Öffentliche Kraftwerke – Wärmeerzeugung (ÖffKW_Q)	1.A.1.a	Energiewirtschaft	Umwandlung
Öffentliche Heizwerke (ÖffHW)	1.A.1.a	Energiewirtschaft	Umwandlung
Raffineriekraftwerke – Stromerzeugung (RaffKW_P)	1.A.1.b	Energiewirtschaft	Umwandlung
Raffineriekraftwerke – Wärmeerzeugung (RaffKW_Q)	1.A.1.b	Energiewirtschaft	Umwandlung
Raffineriewärmeerzeuger (RaffWERz)	1.A.1.b	Energiewirtschaft	Umwandlung
Übrige Kraftwerke des Umwandlungssektors – Stromerzeugung (ÜbrUmKW_P)	1.A.1.c	Energiewirtschaft	Umwandlung
Übrige Kraftwerke des Umwandlungssektors – Wärmeerzeugung (ÜbrUmKW_Q)	1.A.1.c	Energiewirtschaft	Umwandlung
Übrige Wärmeerzeuger des Umwandlungssektors (ÜbrUmWERz)	1.A.1.c	Energiewirtschaft	Umwandlung
Industriekraftwerke – Stromerzeugung (IKW_P)	1.A.2	Industrie	Umwandlung
Industriekraftwerke – Wärmeerzeugung (IKW_Q)	1.A.2	Industrie	Endenergie – Industrie
Industrie – Wärmeerzeuger und Prozessfeuerungen (Industrie)	1.A.2	Industrie	Endenergie – Industrie
Bauwirtschaftlicher Verkehr (SVerkehrBau)	1.A.2.g.viii	Industrie	Endenergie – GHD
Inländischer Luftverkehr (Flug)	1.A.3.a	Verkehr	Endenergie – Verkehr
Straßenverkehr (Straße)	1.A.3.b	Verkehr	Endenergie – Verkehr
Schienenverkehr (Schiene)	1.A.3.c	Verkehr	Endenergie – Verkehr
Binnenschifffahrt (Schiff)	1.A.3.d	Verkehr	Endenergie – Verkehr
Erdgasverdichterstationen (SVerkehrPipe)	1.A.3.e	Energiewirtschaft	Umwandlung
Gewerbe, Handel, Dienstleistungen einschließlich Militär (GHD)	1.A.4.a + 1.A.5	Gebäude	Endenergie – GHD
Private Haushalte (Haushalte)	1.A.4.b	Gebäude	Endenergie – Haushalte

Subsektor (internes Kürzel)	CRF-Kategorie	KSG-Sektor	Energiebilanzsektor
Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei (LaWiEn)	1.A.4.c	Landwirtschaft	Endenergie – GHD
Internationaler Luftverkehr (IntFlug)	1.D.1.a	—	Endenergie – Verkehr
Hochseeschifffahrt (IntSchiff)	1.D.1.b	—	—

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut, basierend u. a. auf Emele und Moosmann (2025)

Abkürzungen:

CRF: Common Reporting Format, genutzt in den Treibhausgasinventaren

KSG: Bundes-Klimaschutzgesetz

GHD: Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

Für die übrigen Quellgruppen ist der Detaillierungsgrad in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 2: Andere Sektoren in ENUSEM

CRF-Sektor	KSG-Sektor	Detailgrad
CRF 1.B Diffuse Emissionen	Energiewirtschaft	Detaillierung entsprechend der CRF-Tabellen
CRF 2 Industrieprozesse	Industrie	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O: Detaillierung entsprechend der CRF-Tabellen
.	.	F-Gase: Dritte Unterebene (z. B. CRF 2.F.1), dabei SF ₆ und NF ₃ als Einzelgase sowie HFKW, FKW und nichtspezifizierter Mix als Gruppe
CRF 3 Landwirtschaft	Landwirtschaft	Erste Unterebene (z. B. CRF 3.A)
CRF 4 LULUCF	LULUCF	Erste Unterebene (z. B. CRF 4.A)
CRF 5 Abfallwirtschaft	Abfallwirtschaft	Erste Unterebene (z. B. CRF 5.A)

Quelle: Eigene Darstellung Öko-Institut, basierend u. a. auf Emele und Moosmann (2025)

Abkürzungen:

CRF: Common Reporting Format, genutzt in den Treibhausgasinventaren

KSG: Bundes-Klimaschutzgesetz

Für die Projektionen 2025 wurde ein zusätzlicher Sektor Technische Senken nach § 3b KSG definiert, in dem durch Bioenergy carbon capture and storage (BECCS) entstehende Emissionssenkten verbucht werden. Dieser Sektor ist nur im Mit-Weiteren-Maßnahmen-Szenario (MWMS) der Projektionen 2025 relevant.

Literatur:

- ▶ Emele, L. & Moosmann, L. (2025). *Modellbeschreibung ENUSEM*.
https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/energie-klimaschutz/OEKO-ENUSEM.pdf [01.10.2025]

Software

ENUSEM ist in Microsoft Excel implementiert.

Techniken

ENUSEM bildet in der Regel nicht einzelne Techniken ab, sondern Sektoren als Ganzes. Die Einzeltechnikebene ist also in der Regel abstrahiert, da die Techniken bereits in den Sektormodellen implementiert sind. In den Teilmodellen zur Abbildung von Elementen des Umwandlungssektors, die nicht in anderen Modellen abgebildet sind (Heizwerken, Raffinerien, Kokereien und anderen Anlagen) werden teilweise auch einzelne Techniken implementiert, wenn dies zur Abbildung von Politikinstrumenten notwendig ist. Beispielsweise sind folgende Einzeltechnologien enthalten:

- ▶ Elektrolyseure in Raffinerien zum Ersatz von Dampfreformern;
- ▶ zusätzliche elektrische Verdichter im Erdgasnetz (in den Projektionen 2025 nicht relevant).

Treibhausgasemissionen

ENUSEM umfasst folgende Treibhausgase für die Berechnung der Emissionen:

- ▶ Kohlendioxid (CO₂)
- ▶ Methan (CH₄)
- ▶ Distickstoffoxid/Lachgas (N₂O)
- ▶ Schwefelhexafluorid (SF₆)
- ▶ Stickstofftrifluorid (NF₃)
- ▶ Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) als Aggregat
- ▶ Perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) als Aggregat
- ▶ Unspezifischer Mix von HFKW und FKW als Aggregat

Die drei F-Gas-Aggregate entsprechen den im deutschen Treibhausgasinventar und insbesondere den CRF/CRT-Tabellen genutzten.

Unsicherheit

Eine vollständige oder systematische Analyse aller Unsicherheiten des Modells ENUSEM wurde bisher nicht durchgeführt. Wesentliche Einflüsse auf die Unsicherheiten von ENUSEM können dennoch benannt werden:

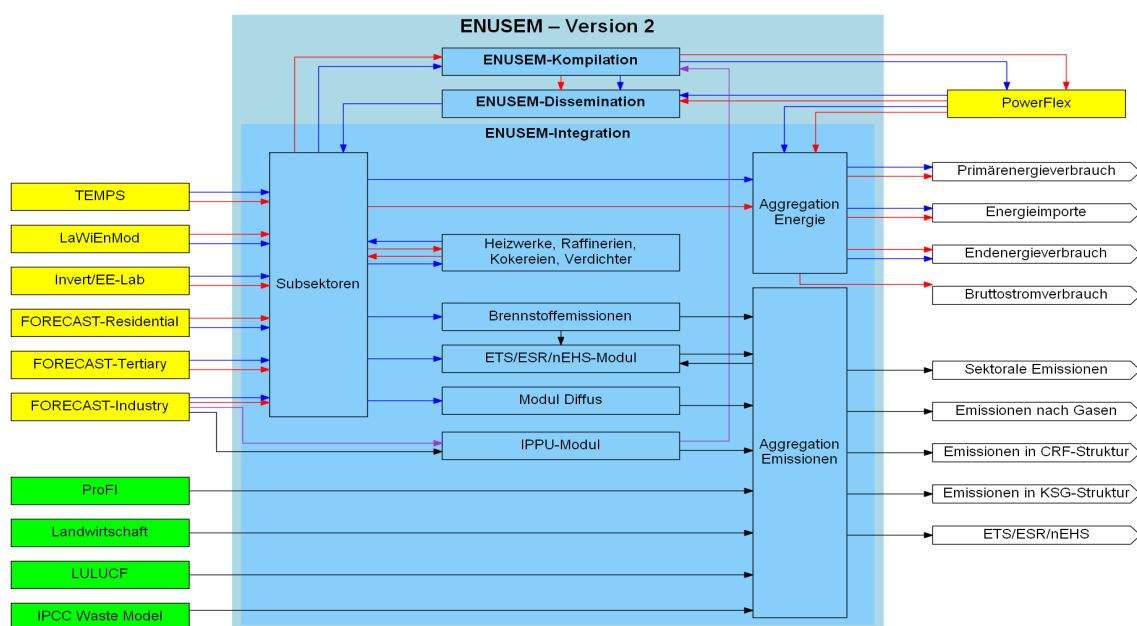
- ▶ Zentrale historische Inputdaten sind die genutzten Aktivitäts- und Emissionsdaten des Treibhausgasinventars, Unsicherheiten des Inventars pflanzen sich daher prinzipiell auf die Modellierung fort. Entsprechendes gilt für Energiebilanzdaten.
- ▶ Eine weitere Quelle von Unsicherheiten ist, dass ENUSEM im Allgemeinen gegenüber dem Treibhausgasinventar über einen geringeren Detaillierungsgrad verfügt. So differenziert ENUSEM beispielsweise bei CH₄- und N₂O-Emissionsfaktoren nicht zwischen

unterschiedlichen Verbrennungstechnologien. Stattdessen wird pro Brennstoff nur ein CH₄- und N₂O-Emissionsfaktor genutzt, der einem mengengewichteten Mittelwert der einzelnen technologiespezifischen Emissionsfaktoren entspricht.

- Modellierungsunsicherheiten entstehen auch dadurch, dass in den zugrundeliegenden Daten (historischen ZSE- und CRF-Inventardaten) manche Daten vertraulich und daher für die Modellierung unbekannt sind.
- Unsicherheiten der Sektormodelle führen direkt zu entsprechenden Unsicherheiten bei den Ergebnissen von ENUSEM.
- Die in ENUSEM integrierten Teilmodelle für Raffinerien, Kokereien, Verdichter und andere Anlagen des Umwandlungssektors stellen starke Vereinfachungen mit entsprechenden Unsicherheiten dar. Insbesondere sind in diesen Teilmodellen nur physikalische und keine ökonomischen Zusammenhänge implementiert, Brennstoff- und CO₂-Preise haben auf diese Teilmodelle keine Wirkung.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 4: Visualisierung des ENUSEM-Modells und dessen Funktionsweisen



Erläuterung:

blaue Kästen: Integrationsmodell

gelbe Kästen: Sektormodelle Energie

grüne Kästen: Sonstige Sektormodelle

rote Pfeile: Brennstoffverbräuche

blaue Pfeile: sonstige Energieverbräuche

schwarze Pfeile: Emissionen

lila Pfeile: sonstige Aktivitätsdaten

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Die Abbildung stellt im Zentrum in Blautönen die interne Struktur von ENUSEM dar, bestehend aus den drei Teilen ENUSEM-Kompilation, ENUSEM-Dissemination und ENUSEM-Integration. Für ENUSEM-Integration sind weitere funktionale Blöcke dargestellt: die Subsektoren, die Aggregation Energie und die Aggregation Emissionen, die mit Blöcken für Teile der Energiewirtschaft (Heizwerke, Raffinerien, Kokereien, Verdichter), einem Block für Brennstoffemissionen, dem EU-ETS/ESR/BEHG-Modul, dem Modul für Diffuse Emissionen und

dem Modul für Industrieprozesse (IPPU) interagieren. Auf der linken Seite sind in gelb Energiemodelle (TEMPs, LaWiEnMod, Invert/EE-Lab, FORECAST-Residential, FORECAST-Tertiary, FORECAST-Industry) und Nicht-Energie-Modelle (ProFI, Landwirtschaft, LULUCF, IPCC Waste Model) dargestellt, die Inputs an ENUSEM liefern. Auf der rechten Seite ist zum einen das Strommarktmodell PowerFlex dargestellt, das sowohl Daten von ENUSEM-Kompilation bekommt, als auch Ergebnisse an ENUSEM-Dissemination und ENUSEM-Integration liefert. Ebenfalls auf der rechten Seite sind Ergebnisdaten aus ENUSEM dargestellt, unterteilt in Energiedaten (Primärenergieverbrauch, Endenergieverbrauch, Stromverbrauch) und Emissionsdaten (Sektorale Emissionen, Emissionen nach Gasen, Emissionen in CRF-Struktur, Emissionen in KSG-Struktur, EU-ETS/ESR/BEHG-Emissionen). Datenflüsse zwischen Modellen bzw. Modellkomponenten sind als farbige Pfeile dargestellt.

Dokumentation des Modells:

Emele, L. & Moosmann, L. (2025). *Modellbeschreibung ENUSEM*.

https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/energie-klimaschutz/OEKO-ENUSEM.pdf [01.10.2025]

3.4 FORECAST-Industry

Name

Forecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool - Industry

Version des Modells

Die aktuelle Version des Modells ist in Revision 12799 (dokumentiert anhand einer Versionskontrolle). Im Zuge des Projektes werden möglicherweise Anpassungen und kleinere Weiterentwicklungen des Modellcodes erfolgen, durch die diese Versionsnummer inkrementell fortschreitet. Die grundlegenden Funktionen sind identisch mit denen der Modellversion, die im Projektionsbericht 2024 verwendet wurde.

Betreibende Organisation

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.)

Zweck des Modells

FORECAST Industry war in seiner Ursprungsform auf die Berechnung von Energieeffizienzpotentialen in energieintensiven industriellen Prozessen beschränkt. Ziel war es, diese Potentiale möglichst auf Prozessebene (in Abgrenzung zur sektoralen und Branchenebene) anzugeben, und so eine Bottom-up-Einschätzung von erreichbaren Effizienzverbesserungen anzubieten. Durch Weiterentwicklungen wurden weitere Bereiche der industriellen Energienachfrage ergänzt und bestehende Methoden vertieft. Dadurch repräsentiert FORECAST Industry heute den größten Teil der energieintensiven Industrie auf Prozessebene und weitere (nicht-energieintensive) Branchen abstrahiert. Technologisch abgrenzbare Bereiche (z. B. Dampferzeugung, Industrieöfen, Bereitstellung mechanischer Energie...) werden dabei mit jeweils an die inhaltlichen Zusammenhänge angepassten Methoden modelliert. Im Zuge dieser Entwicklung wurde FORECAST Industry zu einer "Disaggregation der Energiebilanzen" - also der Ergänzung der zugrundegelegten Statistik zur Energienachfrage (im Allgemeinen Eurostat oder AGEb) mit techno-ökonomischen Dimensionen. Auf dieser Basis werden Projektionen möglicher Zukünfte entwickelt.

FORECAST Industry repräsentiert den Industriesektor (*Bergbau, Gew. Steine u. Erden, Verarbeit. Gewerbe*, entsprechend AGEb-Definition) der betrachteten Organisationseinheit (hier: Deutschland, sonst auch die EU27, deren Mitgliedstaaten sowie ausgewählte weitere).

Grundsätzlich ist dabei jeder Zuschnitt möglich - die verfügbaren Daten beschränken die Modellierung in der Praxis auf staatliche Strukturen. Im Rahmen der THG-Projektionen bestehen die wichtigsten Dynamiken der Modellierung in:

- ▶ Effizienzfortschritt von energieintensiven Prozessen in Abhängigkeit von ökonomischen Rahmenbedingungen und Investitionsverhalten von Akteuren
- ▶ Technologie- und Energieträgernutzung zur Deckung der Energienachfrage (darunter Austausch von Bestandsanlagen und Entscheidung unter dem Einfluss unterschiedlicher Preissignale und Verfügbarkeit/Nutzenbewertung von Optionen)
- ▶ Attraktivität CO₂-armer Produktionsverfahren und Wirkung darauf gerichteter Politikinstrumente.

FORECAST Industry untersucht vorrangig, welche Technologien und Energieträger unter gegebenen Rahmenbedingungen (darunter z. B. gesamtwirtschaftliche Entwicklung, Energieträgerpreise, CO₂-Preise, Nachfrage nach/Produktionsmenge von Grundstoffen, verfügbare Technologien) im Industriesektor aus Sicht eines überwiegend rational handelnden Akteurs (unter Berücksichtigung beobachteter Einschränkungen der Rationalität, vgl. Domschke, 2014) eingesetzt würden. Die Einflüsse von Politikinstrumenten auf diese Rahmenbedingungen oder die Entscheidungsfindung wird dabei in den THG-Projektionen in den Mittelpunkt gestellt. Anwendungen in anderen Projekten umfassen breit angelegte Szenarioanalysen, um Angebots- und Infrastrukturmodellierungen eine Datenbasis zur Energienachfrage zur Verfügung zu stellen. In diesen stehen oft weniger Politikinstrumente als die Eröffnung eines Lösungsraums (z. B. durch Variation der oben genannten Annahmen wie der Produktionsmenge) im Vordergrund. FORECAST Industry kann keine Aussage zur Sinnhaftigkeit oder Eintrittswahrscheinlichkeit der Szenarioannahmen treffen - etwa zur Entwicklung des CO₂-Preises oder der Nachfrage nach Stahl, Beton und anderen Grundstoffen.

Entlang der Szenariotypologie von Börjeson (Börjeson et al., 2006) ist das Modell grundsätzlich in der Lage, alle dort aufgeführten Szenarienarten zu untersuchen. Allerdings ist im Rahmen der THG-Projektionen nicht von einer Vorhersage ("predictive scenarios") auszugehen, da das Projekt lange Zeiträume unter tiefer Unsicherheit umfasst. Die Projektion der ersten Modellierungsjahre ist womöglich unter "Forecast" einzuordnen, und in der Vergangenheit durchgeführte Übungen zu Annahmen von Produktionsmengenentwicklung (siehe z. B. Produktionsmengensensitivitäten im Projektionsbericht 2024, Harthan et al., 2024) ähneln "was wenn" ("what-if")-Szenarien.

Die lange Frist der Modellierung im Rahmen der THG-Projektionen weist allerdings vielmehr auf den Szenariotyp explorativ oder strategisch ("*explorative*", "*strategic*"), insbesondere aufgrund der zugrundeliegenden Fragestellung "was kann passieren, wenn wir auf bestimmte Art handeln?" - also jener nach der Wirkung der Politikinstrumente. Von externen Annahmen maßgeblich definierte ("*external*") Szenarien sind wie oben beschrieben Teil der von FORECAST Industry bedienten Palette, vor allem in Forschungsprojekten zum Energiesystem mit Fokus auf Angebot und Infrastruktur. Ähnliches gilt für normative ("*normative*") Szenarien. Bei der Einordnung all dieser Typisierungen ist notwendig zu berücksichtigen, dass Szenariotechnik stets von einer Vielzahl an Szenarien ausgeht. Dies ist die grundlegende Methode, um mit den starken Unsicherheiten der Modellierung umzugehen. Die Verwendung des Modells im Rahmen der THG-Projektionen ist aus verschiedenen Gründen auf ein Szenario (mit ergänzenden Sensitivitäten) ausgerichtet. Dies ist als starke Einschränkung der Anwendbarkeit der Typisierung nach Börjeson et al. (2006) anzusehen. Die primären Ergebnisse von FORECAST Industry sind Endenergienachfrage und Treibhausgasemissionen der Industrie auf jährlicher

Basis zwischen dem Startjahr (z. B. 2021) und dem Endjahr (z. B. 2050). Dabei differenziert FORECAST Industry Energieträger, Branchen und Technologiebereiche.

Literatur:

Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T. & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723–739.

<https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>

Rehfeldt, M., Fleiter, T. & Worrell, E. (2018). Inter-fuel substitution in European industry: A random utility approach on industrial heat demand. *Journal of Cleaner Production*, 187, 98–110.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.179>

Akteure

FORECAST Industry bildet industrielle Prozesse und Subsektoren/Branchen ab. Diese haben Eigenschaften, die die Entscheidungsfindung beeinflussen, sie beeinflussen sich aber nicht gegenseitig und sind daher nicht als Agenten oder ähnlich zu bezeichnen. Es sind Nutzengruppen. Einzelne Personen, Personengruppen oder Organisationen werden darüber hinaus nicht abgebildet. FORECAST Industry bildet Voraussicht von Akteuren optional in der Vorhersage der CO₂-Preise bzw. deren Berücksichtigung (und Erwartungen) in Investitionsentscheidungen ab. Informationsverfügbarkeit wird abstrahiert über einen Parameter der Logit-Formulierung (Nutzenbewertung von Optionen) abgebildet (Markthomogenität, vergleiche Domschke, 2014). Lerneffekte werden nicht abgebildet (bzw. nur stark abstrahiert und exogen über Kostenreduktion innovativer Technologien).

Dokumentation

Prüfung eines Teilmodells

Rehfeldt, M., Fleiter, T. & Worrell, E. (2018). Inter-fuel substitution in European industry: A random utility approach on industrial heat demand. *Journal of Cleaner Production*, 187, 98–110.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.179>

Methodikbeschreibung

Fleiter, T., Rehfeldt, M., Herbst, A., Elsland, R., Klingler, A.-L., Manz, P. & Eidelloth, S. (2018). A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. *Energy Strategy Reviews*, 22, 237–254.

<https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.09.005>

Eine umfassende Validierung des Modells ist nicht verfügbar. Dafür fehlten bislang im Rahmen der Auftragsforschung die notwendigen Ressourcen.

Weitere Literaturverweise

- ▶ Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T. & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723–739.
<https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- ▶ Kuramochi, T., Ramírez, A., Turkenburg, W. C. & Faaij, A. (2012). Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(1), 87–112. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.05.001>
- ▶ Fleiter, T., Rehfeldt, M., Herbst, A., Elsland, R., Klingler, A.-L., Manz, P. & Eidelloth, S. (2018). A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. *Energy Strategy Reviews*, 22, 237–254.
<https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.09.005>

- ▶ Rehfeldt, M., Fleiter, T. & Toro, F. (2018). A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry. *Energy Efficiency*, 11(5), 1057–1082.
<https://doi.org/10.1007/s12053-017-9571-y>
- ▶ Rehfeldt, M., Fleiter, T. & Worrell, E. (2018). Inter-fuel substitution in European industry: A random utility approach on industrial heat demand. *Journal of Cleaner Production*, 187, 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.179>
- ▶ Vogl, V., Ahman, M. & Nilsson, L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, 736–745.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>
- ▶ Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M., Janssen, P. & Kreyer von Krauss, M. P. (2003). Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment*, 4(1), 5–17.
<https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>

Räumliche Abdeckung

EU27 auf Mitgliedsstaatebene, außerdem ausgewählte weitere Länder (Norwegen, Schweiz, UK).

Zeithorizont

Der Zeithorizont ist variabel. Typischerweise arbeitet FORECAST Industry zwischen dem jeweils aktuellsten verfügbaren Jahr mit Datenverfügbarkeit zum Zweck der Kalibrierung (z. B. 2021) und 2050 (Zieljahr untersuchter Politiken).

Zeitliche Auflösung

FORECAST Industry rechnet jährlich.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

Es lassen sich unmittelbar drei fundamentale Annahmen der Modellierung in FORECAST Industry identifizieren. **Erstens**, "Prozess gleicht Prozess". Dieses Konzept besagt, dass industrielle Prozesse die kleinste betrachtete Einheit sind und damit in allen ihren Anwendungen unverändert. Der Prozess "Stahl walzen" ist damit im gesamten untersuchten Gesamtsystem identisch (in Salzgitter und in Völklingen). Auch Veränderungen im Zeitverlauf, z. B. durch Effizienzverbesserungen, sind für alle Anwendungen des Prozesses gleich. Ausdifferenzierungen zwischen geografischen Einheiten (z. B. Frankreich und Deutschland) entstehen durch den unterschiedlichen Grad, in dem diese Prozesse angewendet werden (ihre Aktivität). So sieht der Stahlsektor in Italien anders aus als der in Deutschland - nicht, weil die Prozesse anders wären, sondern weil in Italien mehr Sekundärstahl, in Deutschland mehr Oxygenstahl hergestellt wird. **Zweitens**, "Simulation, nicht Optimierung". Dieses Konzept postuliert, dass die Entwicklung der industriellen Endenergienachfrage kein Resultat gesamtmärklicher und intertemporaler Optimierung, sondern das Resultat von Entscheidungen individueller Akteure ist. Entsprechend werden Entscheidungen als Simulation abgebildet, unter limitierten Informationen mit individuellem Entscheidungskalkül. Eine Ausprägung dieses Konzepts ist die Verwendung der Logit-Formulierung von Discrete-Choice Problemen. Durch diese entstehen Wahlwahrscheinlichkeiten (z. B. von Technologien und Energieträgern) - also ein Spektrum an Entscheidungen mit Mehrheitslösungen und Nischen. **Drittens**, "Szenarien beschreiben den Lösungsraum". Dieses Konzept legt fest, dass die tiefe Unsicherheit, unter der die Modellierung des Energiesystems (bzw. von Teilen davon) stattfindet, quantitative Aussagen über Eintrittswahrscheinlichkeiten verhindert. Ziel der Modellierung ist es daher, mögliche Zukünfte zu beschreiben und durch deren Vielzahl eine Vorstellung vom Lösungsraum zu entwickeln. Operativ heißt das, dass von Versuchen von probabilistischer Modellierung und

Berechnung von Wahrscheinlichkeiten Abstand genommen wird. Unsicherheiten werden über sich ergänzende Szenarien oder, falls dies nicht möglich ist, über Sensitivitäten abgebildet.

FORECAST Industry bildet schwerpunktmäßig Entscheidungen über Technologie- und Energieträgerwechsel ab (vergleiche oben). Dazu dienen Nutzenbewertungen, die auf Basis techno-ökonomischer Bedingungen erfolgen. Politikinstrumente beeinflussen diese Bewertungen auf vielfältige Weise, z. B. durch Veränderung der Preisstruktur durch neue Preiskomponenten oder Subventionen, durch ordnungsrechtliche Vorgaben, die Optionen ausschließen oder mandatieren, sowie durch Beeinflussung von die Dynamik von Entwicklungen beschreibenden Parametern wie der Austauschgeschwindigkeit von Bestandsanlagen oder der Risikobereitschaft von Akteuren. Basierend auf im Projekt durchgeführten Vorarbeiten (Rahmendatendefinition) sind Annahmen zur Produktionsmenge/ wirtschaftlicher Aktivität ein exogener Input.

Wechselwirkungen von Politikinstrumenten entstehen endogen dann, wenn diese die gleichen Technologiebereiche bzw. Entscheidungssphären betreffen. So ergänzt ein CO₂-Preis die direkte Subventionierung CO₂-armer Technologien durch zusätzlich verbesserte Wirtschaftlichkeit im Wettbewerb gegen CO₂-intensivere Optionen und Instrumente, die einen schnelleren Austausch bestehender Anlagen fördern (z. B. Information/Netzwerke, Planungssicherheit) und verstärken die transformative Wirkung, da so im selben Zeitraum mehr Investitionsentscheidungen getroffen werden (die häufiger zugunsten von Dekarbonisierungstechnologien ausfallen).

Methodischer/mathematischer Ansatz

FORECAST Industry ist ein Bottom-up-Simulationsmodell. Es verwendet in mehreren Modulen den Ansatz der Total Cost of Ownership und setzt auf dieses Zahlengerüst eine Logit-Formulierung des Discrete Choice-Problems.

OpenSource

FORECAST Industry ist nicht OpenSource. Gegen eine Veröffentlichung spricht vor allem der hohe Aufwand, um den Code zugänglich und lesbar für Außenstehende zu machen. Da es sich um eine Eigenentwicklung handelt, sind Kenntnisse der Programmiersprache nicht hinreichend, um die Modellierung zu verstehen. Insofern würde eine Veröffentlichung aktuell keinen Mehrwert für Transparenz bieten.

Parameter

Techno-ökonomische Parameter basieren auf den nachfolgenden Literaturangaben. Weitere Parameter werden aus Statistiken (AGEB Energiebilanz, Inventarbericht) entnommen, zum Teil selbst erzeugt.

Vogl, V., Ahman, M. & Nilsson, L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, 736–745.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>

Kuramochi, T., Ramírez, A., Turkenburg, W. C. & Faaij, A. (2012). Comparative assessment of CO₂ capture technologies for carbon-intensive industrial processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(1), 87–112. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.05.001>

Programmiersprache

Visual Basic .NET, mit aufgesetzter Modelliersprache in Eigenentwicklung.

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

FORECAST Industry ist in Modulen organisiert. Diese Module umfassen inhaltlich abgrenzbare Bereiche der Modellierung. Kurz zusammengefasst sind dies vor allem (nicht vollständige Liste):

- ▶ Modification (Vorbereitung und Formatierung von Eingangsdaten)
- ▶ Industry (Kernberechnung der Bottom-up-Energienachfrage und der an industriellen Prozessen orientierten Effizienzpotentiale)
- ▶ Querschnittstechnologien (Effizienzpotentiale von Motoren, Pumpen, Druckluft usw.)
- ▶ Prozesswärme Dampf (Bestandsmodell von Dampferzeugung, Technologiewechsel)
- ▶ Prozesswärme Industrieöfen (Energieträgerwechsel im Hochtemperaturbereich)
- ▶ Energiebilanzkalibrierung (Erfassung und Fortschreibung der Differenz der Ergebnisse zur statistischen Grundlage)
- ▶ Rohstoffe (stoffliche Nutzung von Energieträgern in der Chemie)
- ▶ CCS (Diffusion von CO₂-Abscheidung)
- ▶ Kosten (Erfassung von CAPEX und OPEX der vorherigen Modellentscheidungen)
- ▶ Ergebnisse (Formatierung und Zusammenführung der Ergebnisse)

Die Modellierung erfolgt seriell; die Module werden nacheinander durchlaufen und liefern entlang der Kette jeweils die Inputdaten des nachfolgenden Moduls. Schnittstellen mit anderen Modellen sind grundsätzlich an allen Punkten des Ablaufs möglich (das potentielle Auslesen von Zwischenergebnissen jeder Berechnung ist integriert). In der Praxis werden vor allem Endergebnisse übergeben. Es bestehen mehrere Ebenen der Fehlerprüfung. Neben der der Entwicklungsumgebung inhärenten Syntaxprüfung (bei der Kompilierung) wird im Modelllauf auf Fehler (Ergebnisse sind formal falsch) und Warnungen (Ergebnisse sind unerwartet, aber grundsätzlich zulässig) geprüft. Zusätzlich sind an wichtigen Stellen inhaltliche Plausibilitätsprüfungen angelegt. So wird zum Beispiel ein Hinweis ausgegeben, wenn Produktionsmenge oder Energienachfrage in einem Prozess in einem Jahr um einen gewissen Betrag sinkt, oder der rohstoffliche Bedarf nicht unmittelbar zur hinterlegten Aktivität chemischer Produkte passt.

Räumliche Auflösung

FORECAST Industry arbeitet auf NUTS 0-Ebene (Staat). Eine der Industriemodellierung nachgelieferte Regionalisierung arbeitet bis auf NUTS 3 (diese wird für die THG-Projektionen aber nicht genutzt).

Sektoren

FORECAST Industry bzw. die dem Modell nachgelagerte Formatierung basiert auf den Klassifikationen des Inventarberichts/ der CRF-Tabellen (kompatibel mit Bundes-Klimaschutzgesetz). Darüber hinaus wird der Industriesektor aus Energiesicht kompatibel mit den Energiebilanzen von AGEB und Eurostat abgebildet.

Software

FORECAST Industry ist in Microsoft Visual Studio 2017 (Visual Basic .NET Framework) programmiert, setzt auf diese Basis der Programmiersprache aber eine Eigenentwicklung der Modellersprache, die auf der Manipulation von Tabellen (SQLite) mit vergleichsweise einfachen mathematischen Operationen beruht. Zur Versionskontrolle wird TortoiseSVN eingesetzt.

Techniken

FORECAST Industry bildet mehrere Technologiegruppen ab (siehe Modulliste oben). Technologien umfassen Effizienztechniken für etwa 80 industrielle Prozesse und

Querschnittstechnologien (Pumpen, Motoren, Druckluft...). Außerdem Dampferzeugungsanlagen (Kessel, KWK, mit Untergruppen je Energieträger, Wärmepumpen) und eine abstrahierte Darstellung von Industrieöfen über ihre Energieträgernutzung. Hinzu kommen weitere Bereiche wie CCS und stoffliche Nutzung von Energieträgern.

Teile der Daten sind in Rehfeldt, Fleiter und Toro (2018), Rehfeldt, Fleiter und Worrell (2018) und in Fleiter et al. (2018) dargestellt. Es existiert keine vollständige, öffentlich zugängliche Datenbank aller Modelldaten.

Treibhausgasemissionen

Vorrangig CO₂ aus energiebedingten und prozessbedingten Quellen, ergänzend prozessbedingt N₂O, CH₄. F-Gase als nachgelagerte Berechnung im Rahmen der Ergebniskalibrierung auf das Treibhausgasinventar und in Kooperation mit anderen Modellen des Konsortiums (siehe ProFi, Abschnitt 3.13). Dies beinhaltet insbesondere die Berücksichtigung von Inventarposten der Produktverwendung (Domschke, 2014).

Unsicherheit

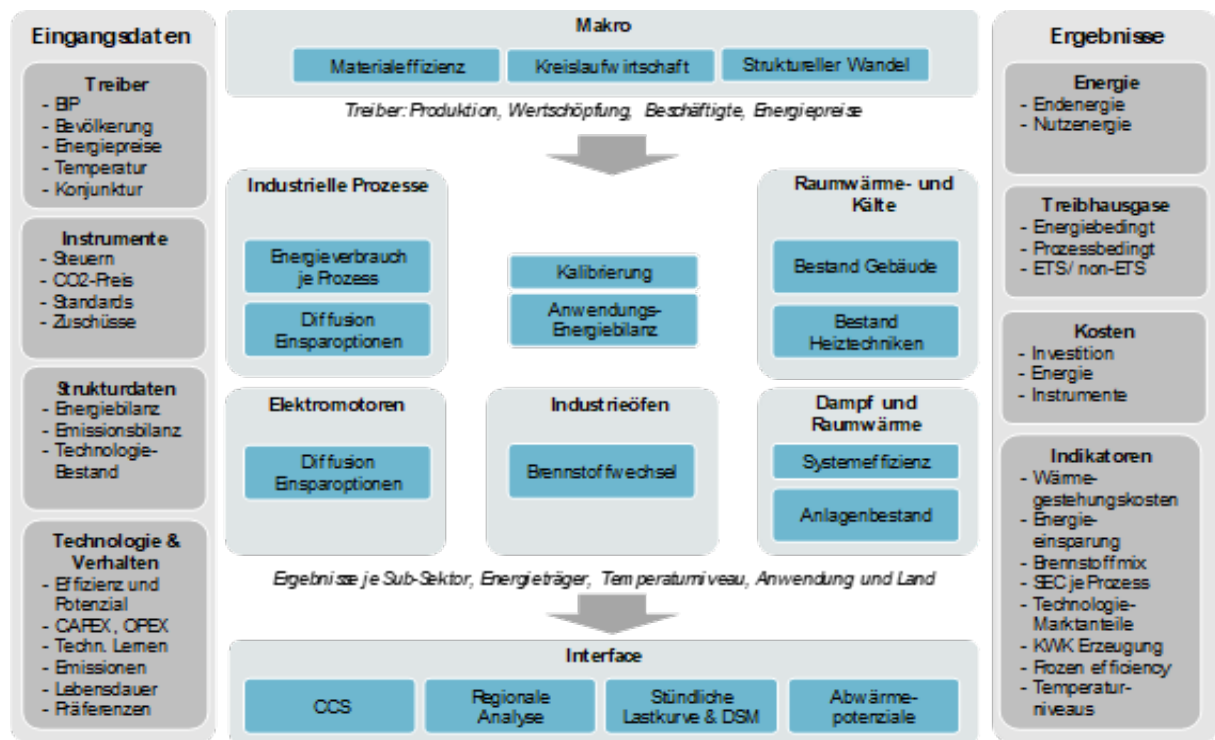
Siehe hierzu auch vorangehende Ausführungen zu Szenarien und Walker et al. (2003).

Entlang der Szenariomethode wird Unsicherheit im Modell nicht quantifiziert. Sie wird methodisch über die Szenariodefinition und die Rechnung mehrerer Szenarien adressiert. Dies betrifft im Idealfall nicht nur Bandbreiten von Rahmendaten, sondern auch technologischer Annahmen. In den THG-Projektionen werden ausgewählte Unsicherheiten der verwendeten Daten über Sensitivitäten adressiert. Da nur ein Szenario beauftragt ist, werden Unsicherheiten des realen Systems und der Methode nicht adressiert. In anderen Sektoren werden Zweitmodellierungen eingesetzt, um die Hauptmodellergebnisse vergleichbar zu machen. Dieses Vorgehen wäre auch im Industriesektor grundsätzlich möglich und empfehlenswert. Für die Interpretation ergibt sich daraus, dass bei auffälligen oder nicht unmittelbar einsichtigen Ergebnissen die Fähigkeiten des Modells zur Plausibilisierung genutzt werden müssen. Dazu gehört eine vergleichsweise große Detailtiefe, die es ermöglicht, Endergebnisse auf Zwischenergebnisse, und diese auf Inputdaten zurückzuführen. Also in etwa: *Fernwärmeanteil sinkt 2035 sehr schnell? Ja, das findet vor allem im Chemiesektor statt, weil dort ab 2035 Subventionen für direkte Elektrifizierung und Wasserstoffkessel angenommen sind. Diese verschieben die wirtschaftliche Bewertung sehr stark.*

Dabei geht es vor allem um Plausibilisierung, nicht um Wahrheitsbeweise.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 5: Visualisierung des FORECAST-Industry Modells und dessen Funktionsweisen



Quelle: Eigene Darstellung, Fraunhofer ISI

3.5 FORECAST-Residential

Name

Forecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool - Residential

Version des Modells

Aktuell liegt FORECAST-Residential gemäß SVN-basierter Versionskontrolle in Revision 13290 vor. Diese Revision wird parallel zu den Modellrechnungen im Projekt weiterentwickelt, wobei die grundlegenden Funktionen identisch zu denen der für den Projektionsbericht 2024 eingesetzten Version bleiben.

Betreibende Organisation

Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung ISI (Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.)

Zweck des Modells

FORECAST-Residential ist ein Modul innerhalb der umfassenden FORECAST-Modellfamilie, die den Endenergiebedarf in Industrie, Haushalten sowie Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) bis zum Jahr 2050 simuliert. Im Haushaltssektor unterscheidet FORECAST-Residential acht **Anwendungsgruppen**:

1. Raumwärme,
2. Warmwasser,
3. Lüftung,
4. Raumkühlung,
5. Haushaltsgroßgeräte,
6. Informations- und Kommunikationstechnik (IKT),

7. Beleuchtung und
8. Kochen.

Die ersten drei Anwendungsgruppen ("**Wärme**") werden in diesem Projekt bereits über das Modell Invert/EE-Lab (siehe Abschnitt 3.7) abgedeckt. Entsprechend konzentriert sich FORECAST-Residential hier auf die vier Anwendungsgruppen Haushaltsgroßgeräte, IKT-Endgeräte, Raumkühlung, Beleuchtung und Kochen, zusammenfassend als „**Geräte**“ bezeichnet.

Der Haushaltssektor macht in Deutschland rund 28 % des Endenergieverbrauchs aus (Stand 2023), wovon etwa 17 % auf Geräte und 83 % auf Wärme (Raumwärme, Warmwasser, Lüftung) entfallen. Damit entspricht der Geräteanteil rund 5 % des gesamten deutschen Endenergieverbrauchs. Durch die Kopplung von Invert/EE-Lab und FORECAST-Residential wird das gesamte Spektrum des Haushaltssektors abgebildet, was eine konsistente Analyse aller relevanten Endenergieanwendungen ermöglicht.

FORECAST-Residential simuliert in diesem Rahmen den Endenergieverbrauch für Geräte (Anwendungsgruppen 4 bis 8) bis zum Jahr 2050. Durch verschiedene Szenarien lassen sich politische (z. B. Mindesteffizienzstandards) und ökonomische Rahmenbedingungen (z. B. Strompreise) variieren, um zu untersuchen, wie sie Kaufverhalten und Energieverbrauch beeinflussen. Die Ergebnisse ermöglichen eine explorative Betrachtung langfristiger Entwicklungen und helfen abzuschätzen, wo der Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen im Jahr 2050 unter unterschiedlichen Annahmen liegen könnten.

Akteure

In FORECAST-Residential werden Haushalte nicht als einzelne, explizite Akteure wie in Agenten-basierten Modellen abgebildet. Stattdessen entsteht die Kauf- und Nutzungsentscheidung auf einer aggregierten Ebene, indem der ökonomische Vergleich (Total Cost of Ownership, TCO) mit einem multinomialen Logit-Verfahren kombiniert wird. Die Haushalte werden somit als eine Gesamtheit betrachtet, deren Verhalten durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung auf verschiedene Technologieoptionen abgebildet wird. Der deterministische Teil dieser Gesamtkostenrechnung (Anschaffung, Energie, Wartung) beschreibt die relativen Vorteile unterschiedlicher Gerätevarianten. Um die reale Kaufentscheidung jedoch realistisch zu erfassen, integriert das Modell eine zufällige Komponente, welche Umstände wie unvollständige Informationen, Gewohnheiten oder Verzerrungen (z. B. Status quo bias) widerspiegelt. Auf diese Weise lassen sich Streuungen in den Marktanteilen erklären, ohne dass jede einzelne Kaufentscheidung einer bestimmten „Akteurperson“ explizit modelliert werden muss. Falls ausreichend empirische Informationen zu verschiedenen Haushaltstypen oder sozialen Gruppen vorliegen, könnte das Modell auch unterschiedliche Akteurguppen (z. B. einkommensabhängig) getrennt analysieren. Eine derartige Erweiterung erfordert umfangreiche, differenzierte Daten zur Charakterisierung des Kauf- und Verbrauchsverhaltens.

Dokumentation

Eine ausführliche Beschreibung von FORECAST-Residential findet sich auf der Webseite <https://www.forecast-model.eu/forecast-en/> sowie in den folgenden Publikationen:

- Elsland, R. (2016). *Long-term energy demand in the German residential sector: Development of an Integrated Modelling Concept to Capture Technological Myopia*. Nomos.
<https://doi.org/10.5771/9783845267487>
- Mandel, T., Kranzl, L., Popovski, E., Sensfuß, F., Müller, A. & Eichhammer, W. (2023). Investigating pathways to a net-zero emissions building sector in the European Union: what role for the energy efficiency first principle? *Energy Efficiency*, 16(4), 1–29.
<https://doi.org/10.1007/s12053-023-10100-0>

Räumliche Abdeckung

Das Modell ist grundsätzlich für Deutschland sowie alle EU-Mitgliedstaaten einsetzbar. Je nach Fragestellung werden die Berechnungen für einzelne Länder oder für eine gesamte Region durchgeführt.

Zeithorizont

Der Zeithorizont ist variabel. Typischerweise arbeitet FORECAST-Residential zwischen dem jeweils aktuellsten verfügbaren Jahr mit Datenverfügbarkeit zum Zweck der Kalibrierung (z. B. 2023) und 2050 (Zieljahr untersuchter Politiken).

Zeitliche Auflösung

FORECAST-Residential verwendet eine jährliche Auflösung. Für jedes Modelljahr werden die relevanten Größen (z. B. Gerätebestand, spezifischer Verbrauch) berechnet, sodass eine Zeitreihe bis zum Endjahr entsteht.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

Bottom-up-Modellierung FORECAST-Residential ist ein Bottom-up-Modell, das den Haushaltssektor in verschiedene Anwendungen (z. B. Haushaltsgroßgeräte), Technologien (z. B. Kühlschränke) und Energieeffizienzklassen (z. B. Klasse A) unterteilt. Der Endenergieverbrauch wird technologiespezifisch berechnet, indem zunächst die Verfügbarkeit (Ausstattungsrate) und die Effizienz jedes Gerätetyps ermittelt und anschließend dessen Einsatzdauer bzw. Betriebsprofil modelliert wird.

Bestandsentwicklung und Substitution Das Modell verfolgt die jährliche Erneuerung des Gerätebestands (Bestandsumwälzung). Alte Geräte werden auf Basis einer empirisch ermittelten ökonomischen Lebensdauer ersetzt, während neu hinzukommende Geräte mithilfe eines mikroökonomischen Ansatzes (Total Cost of Ownership in Kombination mit multinomialen Logit) ausgewählt werden. Auf diese Weise bildet das Modell Substitutionseffekte und das sukzessive Verschwinden ineffizienter Techniken durch neue, regulatorisch konforme Alternativen ab.

Abbildung von Politikinstrumenten Das Modell berücksichtigt politisch gesetzte Energieeffizienzanforderungen, Förderungen und Informationsinstrumente, die sich direkt auf die Kaufentscheidung und die Verfügbarkeit einzelner Effizienzklassen auswirken. So werden Gerätevarianten, die bestimmten gesetzlichen Standards nicht mehr entsprechen, modellintern als „nicht mehr verfügbar“ gekennzeichnet, was den Einsatz- bzw. Kaufspielraum für Haushalte beeinflusst. Gleichzeitig können finanzielle Anreize (z. B. Förderprogramme) oder Informationskampagnen über veränderte Preis- bzw. Nutzendiskontierungen in das Modell einfließen, was zu einer schnelleren Marktdurchdringung effizienter Technologien führt.

Methodischer/mathematischer Ansatz

FORECAST-Residential folgt einem Bottom-up-Simulationsmodell, das jede relevante Anwendung (zum Beispiel Kühlgeräte, Fernseher, Beleuchtung) auf Geräte- und Effizienzklassenebene abbildet. In einem ersten Schritt wird die Ausstattungsrate einzelner Technologien, etwa die Anzahl von Beleuchtungspunkten oder Kühlschränken pro Haushalt, mit Hilfe einer logistischen Wachstumskurve projiziert. Diese Kurve orientiert sich an historischen Marktdaten und setzt eine Sättigungsgrenze fest, die durch Marktstudien und Expertenschätzungen bestimmt wird. Diese Phase erfasst nur das Wachstum der „Energiedienstleistung“ (wie Beleuchtung oder Kühlung), aber noch nicht die Verteilung auf verschiedene Energieeffizienzklassen.

Im nächsten Schritt erfolgt die **jährliche Bestandsumwälzung**. Hier wird zunächst angenommen, dass ein Teil der im Bestand befindlichen Geräte ersetzt werden muss. Die Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich aus einer über Normalverteilungen ermittelten ökonomischen Lebensdauer, die berücksichtigt, dass Haushaltsgeräte oft vor ihrem technischen Defekt ausgetauscht werden. Parallel dazu wird bestimmt, welche neuen Technologien beziehungsweise Effizienzklassen als **Ersatz** angeschafft werden. FORECAST-Residential nutzt dabei einen **ökonomischen Kostenvergleich** (Total Cost of Ownership, TCO), bei dem Anschaffungs-, Energie- und Wartungskosten über die erwartete Lebensdauer eines Geräts diskontiert werden. Für die Entwicklung zukünftiger Anschaffungspreise werden Lernkurven (technologisches Lernen) herangezogen, die Skaleneffekte in der Produktion abbilden. Energiepreise werden nur eingeschränkt antizipiert, indem das Modell unterstellt, dass Haushalte ihren Preistrend auf Grundlage zurückliegender Jahre fortschreiben. Um das tatsächliche Kaufverhalten der Verbraucher zu erfassen, genügt keine rein rational-optimierende Betrachtung. Das Modell verwendet daher einen **multinomialen Logit-Ansatz**, der den deterministischen TCO-Bestandteil um Zufallsnutzen ergänzt. Dieser Zufallsnutzen wird über eine Skalenkonstante (λ) gesteuert, die bestimmt, wie stark sich die Entscheidungswahrscheinlichkeit auf eine bestimmte Technologie konzentriert oder streut. Gleichzeitig unterliegt das Modell rechtlichen Vorgaben: Mindestenergieeffizienzstandards (etwa aus der EU-Ökodesign-Verordnung) legen fest, ob bestimmte Klassen in einem definierten Zeitraum überhaupt auf dem Markt verfügbar sein dürfen.

Die Kombination aus Ausstattungsraten, Gerätelebensdauer und der probabilistischen Wahl neuer Technologieoptionen führt letztlich zu **einer jährlichen Aktualisierung des gesamten Gerätebestands** sowie dessen Energieverbrauch. Um den Endenergiebedarf zu ermitteln, werden die so ermittelten Bestände mit den spezifischen Leistungswerten (in Watt) und typischen Nutzungszeiten (Stunden pro Jahr) der jeweiligen Geräte verknüpft. Letztere sind im Modell als exogene Parameter hinterlegt und können zur Berücksichtigung von Rebound-Effekten oder Verhaltensänderungen angepasst werden.

Beim Abgleich mit den Energiebilanzen bleibt in der Regel ein Restsegment übrig, das im Modell als **„Sonstige & Neue Anwendungen“** zusammengefasst wird. Dieses Segment fasst einerseits Geräte zusammen, für die keine ausreichenden Daten zur detaillierten Bottom-up-Modellierung vorliegen (etwa Toaster oder Haartrockner), und bildet andererseits mögliche Zukunftstechnologien ab, die zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht etabliert sind. Für diese Kategorie kommt ein Top-down-Ansatz zur Anwendung, der anhand eines multiplikativen Wachstumsmodells auf exogene Elastizitäten (Haushaltsgröße, Pro-Kopf-Einkommen, Strompreise, autonome Energieeffizienzverbesserungen) reagiert.

OpenSource

Das Modell FORECAST-Residential ist derzeit nicht als Open Source verfügbar. Eine Offenlegung des Codes würde aufgrund des Aufwands zur Aufbereitung und Dokumentation aktuell keinen direkten Mehrwert für Anwender außerhalb des Entwicklerteams bieten.

Parameter

FORECAST-Residential verwendet eine Vielzahl an Parametern, die sich in vier Hauptkategorien unterteilen lassen: demografische Rahmendaten, Preise, technische Daten sowie politische und regulative Parameter.

1. Demografische Rahmendaten

- **Haushaltszahl und Bevölkerungsentwicklung:** Die Wachstumsraten der Haushaltszahlen basieren auf offiziellen Statistiken (z. B. Eurostat) und nationalen Prognosen. Sie bestimmen

maßgeblich das Nachfragepotenzial für Haushaltsgeräte (z. B. Anzahl Kühlschränke pro Haushalt) und beeinflussen somit den projizierten Energieverbrauch.

2. Preise

- ▶ **Energiepreise:** Die Strom- und gegebenenfalls Brennstoffpreise (z. B. für Gasherde) werden in FORECAST-Residential als exogene Szenarioannahmen hinterlegt. Neben den Großhandelspreisen fließen typische Verbraucheraufschläge wie Steuern, Umlagen und Netzentgelte ein.
- ▶ **Gerätepreise:** Das Modell verwendet Gerätebeschaffungskosten aus Marktanalysen, Herstellerangaben und Studien. Lernkurven (technologisches Lernen) erlauben es, sinkende Anschaffungskosten neuer und effizienterer Technologien im Zeitverlauf abzubilden.
- ▶ **Wartungs- und Betriebskosten:** Wartungskosten werden, sofern relevant, hinzugezogen. Diese Parameter gehen in den Total Cost of Ownership (TCO) ein und beeinflussen das Kaufverhalten im Modell.

3. Technische Daten

- ▶ **Gerätebestand und Effizienzklassen:** Im Startjahr werden Gerätezahl, durchschnittlicher Energiebedarf und Energieeffizienzklassen auf Basis empirischer Erhebungen und Forschungsstudien kalibriert. Lebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit: Für jede Gerätekategorie existiert eine empirisch hinterlegte ökonomische Lebensdauer, die über eine Normalverteilung ins Modell eingespielt wird. So wird die Wahrscheinlichkeit abgebildet, wann ein Gerät ersetzt wird.
- ▶ **Spezifischer Verbrauch und Betriebsstunden:** Zur Berechnung des jährlichen Endenergiebedarfs werden Leistung (in Watt) und typische Betriebsstunden (pro Jahr) herangezogen. Diese Parameter basieren auf Vorstudien im Rahmen des EU-Ökodesigns.
- ▶ **Ausstattungsraten und Sättigungsgrenzen:** Eine logistische Wachstumskurve bildet die Prognose der Verbreitung bestimmter Technologien (z. B. Unterhaltungselektronik). Als Obergrenze („Sättigungsniveau“) dienen Schätzungen aus Marktanalysen und Expertenschätzungen.

4. Politische und regulative Parameter

- ▶ **Mindestenergieeffizienzstandards:** EU-Ökodesign-Verordnungen legen fest, welche Gerätevarianten künftig nicht mehr angeboten werden dürfen. Das Modell unterhält hierfür eine boolesche Kennzeichnung (erlaubt/verboten), welche automatisch Änderungen in der Marktdurchdringung bewirkt.
- ▶ **Förderprogramme und Informationsinstrumente:** Sofern staatliche Förderungen oder Informationskampagnen (z. B. Energieeffizienzlabels) für bestimmte Geräte existieren, werden diese im Modell als Preisvergünstigung oder erhöhtes Bewusstsein (über Logit-Funktion) berücksichtigt, was wiederum die Wahlwahrscheinlichkeit beeinflusst.
- ▶ **Steuern und Abgaben:** Änderungen an fiskalischen Rahmenbedingungen, etwa CO₂-Bepreisung auf Gasverbrauch oder Stromabgaben, fließen in die Energiepreise ein und wirken sich unmittelbar auf die TCO-Rechnung der Haushalte aus.

Programmiersprache

FORECAST-Residential ist in Visual Basic .NET implementiert. Zur Datenspeicherung und -verwaltung werden SQLite und MS Excel eingesetzt. Die Entwicklung erfolgt in Visual Studio 2017.

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

FORECAST-Residential ist in Visual Basic .NET implementiert und wird primär über die Entwicklungsumgebung Visual Studio weiterentwickelt. Die Datenhaltung erfolgt in einer SQL-Datenbank (SQLite), ergänzt um externe Dateien in Microsoft Excel-Formaten für den Datenimport und -export. Das Modulsystem FORECAST beinhaltet neben der Komponente „Residential“ noch weitere Sektormodule (z. B. FORECAST-Industry, FORECAST-Tertiary), die parallele Datenschnittstellen nutzen. Zur Koordination der Teilmodelle steht eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) zur Verfügung, in der Nutzer*innen Szenariovariablen anpassen und Modellläufe steuern können. Der Workflow beim Betrieb von FORECAST-Residential gliedert sich üblicherweise in folgende Schritte:

- ▶ **Datenimport:** Eingangsdaten, wie demografische Angaben, Energie- und Gerätepreise oder politische Parameter, werden über Excel-Sheets aufbereitet und in die SQLite-Datenbank importiert.
- ▶ **Modelleinstellungen:** Über das GUI lassen sich Parameter wie Diskontierungsraten, Lebensdauerannahmen oder die Ausprägung politischer Instrumente anpassen.
- ▶ **Durchführung der Modellläufe:** Das Kernprogramm in Visual Basic .NET greift auf die hinterlegten Daten zu, erstellt die benötigten Variablen und führt die Iterationen zur Bestands- und Verbrauchsberechnung durch.
- ▶ **Ergebnisaufbereitung:** Die Resultate werden in der SQLite-Datenbank gespeichert und können bei Bedarf erneut in Excel-Sheets exportiert werden. So ist eine individuell anpassbare Weiterverarbeitung (z. B. Grafiken, Tabellen) möglich.

Räumliche Auflösung

Für die Simulation wird die nationale Ebene (NUTS 0) zugrunde gelegt, sodass jedes Land als Einheit ohne weitere regionale Untergliederung betrachtet wird.

Sektoren

FORECAST-Residential deckt gemäß den Energiestatistiken von Eurostat und der AG Energiebilanzen (AGEB) den Haushaltssektor ab. Im Rahmen dieses Projekts berücksichtigt das Modell nur die Anwendungsgruppen Haushaltsgroßgeräte, Informations- und Kommunikationstechnik, Beleuchtung, Kochen und Raumkühlung. Für Raumwärme und Warmwasser kommt im Rahmen dieses Projekts hingegen das Modell **Invert/EE-Lab** (siehe Abschnitt 3.7) zum Einsatz. Für elektrische Geräte und Prozesse im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD), die nicht auf Raumwärme oder Warmwasser entfallen, wird das Schwestermodell **FORECAST-Tertiary** (siehe Abschnitt 3.6) eingesetzt.

Software

Visual Studio 2017, SQLite, MS Excel

Techniken

FORECAST-Residential bildet den Energieverbrauch von Haushaltsgeräten und Unterhaltungselektronik detailliert auf Einzeltechnologieebene ab. Die wichtigsten Gruppen sind

- ▶ **Haushaltsgroßgeräte** (Kühlschränke, Gefrierschränke, Waschmaschinen, Trockner, Geschirrspüler),
- ▶ **Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)** (Fernseher, Computer-Bildschirme, Laptops, Desktop-PCs, Spielkonsolen, Smartphones, Modems/Router),
- ▶ **Beleuchtung** (LED, Leuchtstoff-, Energiespar- und Halogenlampen, Glühlampen),
- ▶ **Kochen** (Glaskeramik-, Induktions- und Massekochfelder, Gasherde),
- ▶ **Raumkühlung** (mobile Klimageräte, Kühltrenn-Anlagen).

Jede dieser Technologien wird in mindestens sieben Energieeffizienzklassen (A bis G) eingeteilt; zum Teil kommen weitere Differenzierungen hinzu, etwa unterschiedliche Displaygrößen bei Fernsehern. Darüber hinaus berücksichtigt das Modell eine Kategorie „**Sonstige & Neue Geräte**“. Sie fasst einerseits Geräte zusammen, die zwar relevant sind (z. B. Toaster, Kaffeemaschinen, Haarföhne), aber nur schwer bottom-up erfasst werden können, weil die benötigte Datenlage (z. B. Bestände, Effizienzklassen) für eine feingliedrige Modellierung nicht ausreicht. Andererseits umfasst diese Kategorie auch mögliche zukünftige Technologien, die bislang nicht am Markt etabliert sind. Die Projektion dieses „Restsegments“ erfolgt mithilfe eines Top-down-Ansatzes, der sich an exogenen Trends wie der Haushaltszahl, dem verfügbaren Einkommen, den Energiepreisen und regulatorischen Effizienzvorgaben orientiert (siehe Abschnitt Methodischer/mathematischer Ansatz).

Treibhausgasemissionen

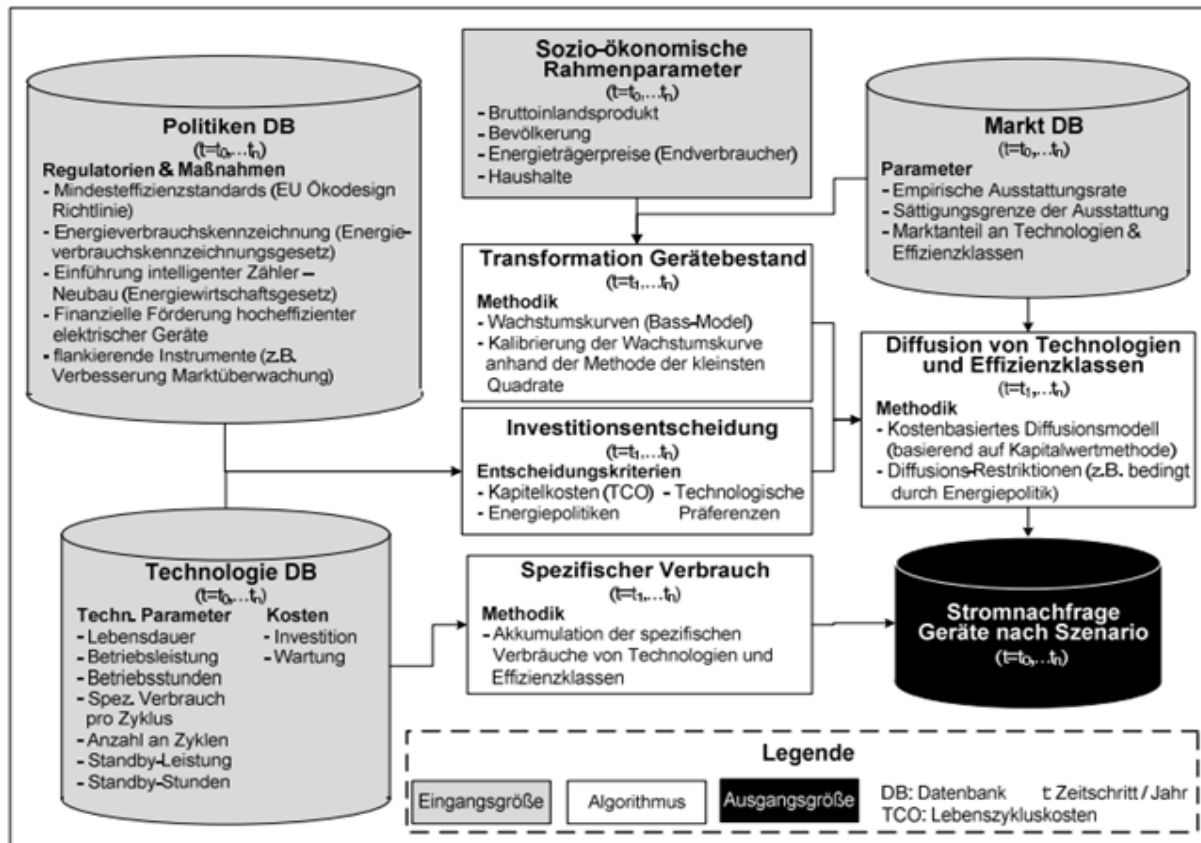
FORECAST-Residential berechnet die Scope-1- und Scope-2-Emissionen im Sinne des Greenhouse Gas Protocols. Vor allem CO₂-Emissionen des Stromverbrauchs sind relevant. Die Verknüpfung mit Emissionsfaktoren erfolgt über die exogen angenommenen Emissionspfade.

Unsicherheit

Das Modell bildet Unsicherheiten nicht explizit ab; Vertrauensintervalle oder Monte-Carlo-Analysen sind nicht Bestandteil der Standardauswertung. In der Regel wird die Spannbreite möglicher Entwicklungen über Sensitivitätsanalysen abgedeckt, indem beispielsweise Variationen bei Energiepreisen oder Annahmen zum Markthochlauf neuer Technologien vorgenommen werden.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 6: Visualisierung des FORECAST-Residential Modells und dessen Funktionsweisen



Quelle: Elsland (2016)

3.6 FORECAST-Tertiary

Name

Forecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool - Tertiary

Version des Modells

Forecast 2024

Betreibende Organisation

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung

Zweck des Modells

- **Ziel:** Simulation des langfristigen Endenergieverbrauchs von Geräten und Prozessen im Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor, ohne den Endenergieverbrauch für Raumheizung, Raumkühlung und Warmwasser.
- **Forschungsfragen**
 - Wie wird sich der Endenergieverbrauch für Geräte und Prozesse im Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektor in Deutschland bis zum Jahr 2050 entwickeln?
 - Wie beeinflussen die politischen Rahmenbedingungen das Investitions- und Energieverbrauchsverhalten?

- Wie beeinflussen die Energiepreise das Energieverbrauchsverhalten?
- ▶ **Art der Szenarien:** Fokus auf explorative Szenarien, die darauf abzielen, das zukünftige Investitions- und Energieverbrauchsverhalten des Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektors zu simulieren. Das Modell kann instrumentenbasierte Szenarien simulieren. Um Zielszenarien zu simulieren, können Benutzer verschiedene sinnvolle Kombinationen politischer Instrumente ausprobieren, bis das Ziel erreicht ist. Es gibt jedoch keine Garantie dafür, dass das Ziel optimal erreicht wird.
- ▶ **Primäre Ergebnisse des Modells:** Endenergieverbrauch für Geräte und Prozesse (TWh); Kosten (Geräteeinkauf und Energie in Euro); Emissionen (Scope 1-2, vgl. Greenhouse Gas Protocol); Marktanteile (die Anteile unterschiedlicher Gerätetypen und Effizienzklassen am Bestand)

Akteure

- ▶ Illustration von repräsentativen Unternehmen des Gewerbe-, Handel- und Dienstleistungssektors. Die Agenten in diesem Modell sind „repräsentative Unternehmen“, die mit ihrem „Subsektor“ und ihren Endanwendungen sowie den Geräten zur Befriedigung der „Dienstleistungsnachfrage“ jeder Endanwendung initialisiert wurden. Basierend auf einer großen Anzahl von Agenten simuliert das Modell den Technologiewandel sowie die Veränderung der Endenergienachfrage aus einer Bottom-up-Perspektive. Der Entscheidungsprozess wird auf Agentenebene modelliert und dann auf Subsektor- und nationaler Ebene aggregiert.
- ▶ Simulation von Kauf- und Energieverbrauchsentscheidungen unter Verwendung von Rentabilitätsberechnungen, Logit-Verteilungen und Annahmen über die Preiserwartungen von Unternehmen des Dienstleistungssektors

Dokumentation

- ▶ Dokumentation: <https://www.forecast-model.eu/forecast-en/index.php>
- ▶ Artikel: <https://doi.org/10.5771/9783845267487>

Räumliche Abdeckung

Deutschland

Zeithorizont

- ▶ Start: 2019
- ▶ Ende: Typischerweise 2045 oder 2050

Zeitliche Auflösung

Jährliche Auflösung

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

- ▶ **Wesentliche Konzepte:** Die Berechnung des Endenergiebedarfs erfolgt in einem agentenbasierten Rahmen. Die GHD-Sektoren werden durch eine große Anzahl von Agenten repräsentiert, die nach Untersektoren klassifiziert sind. Die Agenten repräsentieren einzelne Unternehmen und werden mit der Adoption von Geräten sowie den Verhaltensparametern (u. a. Betriebsstunden pro Jahr, Energieintensität etc.) initialisiert. Für jede Endanwendung jedes Unternehmens wird der Unternehmensvertreter bei Erreichen der Lebensdauer veranlasst, die Geräte zu ersetzen, indem er eine der auf dem Markt verfügbaren Optionen

auswählt, die durch die Ökodesign-Politik des Modells beeinflusst werden können. Die Kostenbewertung der verschiedenen Optionen wird auch durch die Energiekosten beeinflusst. Infolgedessen wird der Endenergiebedarf des gesamten tertiären Sektors aus einer Bottom-up-Perspektive berechnet.

- ▶ **Endogene Variablen:** Endenergieverbrauch für Geräte und Prozesse (TWh); Kosten (Geräteeinkauf und Energie in Euro); Emissionen (Scope 1-2 vgl. Greenhouse Gas Protocol); Marktanteile (nach Energieeffizienzklassen)
- ▶ **Exogene Variablen:** Bevölkerungsentwicklung; Strom- und Energiepreise (Verbraucherpreise); Gerätepreise (Kaufkosten); Gerätebestand im Startjahr; politische Rahmenbedingungen (Mindesteffizienzstandards; Förderung; Informationsinstrumente)

Methodischer/mathematischer Ansatz

▶ Ansatz

- Bestandsmodell: Berechnet den Energieverbrauch auf der Grundlage des aktuellen Gerätebestands der Agenten sowie ihres spezifischen Verbrauchs;
- Logistische Funktion: Modelliert die Wahl der Firmenagenten, die aus den verfügbaren Optionen auf dem Markt wählen;
- Lebensdauermodellierung: Verwendet normalverteilte Ausfallwahrscheinlichkeiten, um die Erneuerung des Gerätebestands zu simulieren;
- Geräte- und Effizienzauswahl: Basiert auf Mindesteffizienzstandards und der Markteinführung neuer Technologien;
- Verbrauchsberechnung: Der Energieverbrauch wird aus dem spezifischen Verbrauch der Geräte, multipliziert mit der Betriebsstunde, berechnet;
- Wirtschaftliche Bewertung: Ermittelt die Kosten unterschiedlicher Geräte und Effizienzklassen unter Berücksichtigung der Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten.

▶ **Einordnung:** Bottom-up-Simulationsmodell

OpenSource

Forecast-Tertiary ist nicht Open Source. Gegen eine Veröffentlichung spricht vor allem der hohe Aufwand, um den Code zugänglich und lesbar für Außenstehende zu machen. Da es sich um eine Eigenentwicklung handelt, sind Kenntnisse der Programmiersprache nicht hinreichend, um die Modellierung zu verstehen. Insofern würde eine Veröffentlichung aktuell keinen Mehrwert für Transparenz bieten.

Parameter

Zu den wichtigsten Parametern gehören die Akzeptanzrate verschiedener Endanwendungen in den Teilsektoren des GHD sowie die Aktivitätsintensität der Endanwendungen. Diese Parameter werden auf Grundlage der vom Fraunhofer ISI durchgeführten GHD-Befragung geschätzt.

Programmiersprache

Python

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

- ▶ FORECAST-Tertiary wird in Python implementiert und basiert auf einem allgemeinen Framework für agentenbasierte Modellierung, genannt „Melodie“. Das Framework ist Open Source auf GitHub (<https://github.com/ABM4ALL/Melodie>).
- ▶ Erstens werden die Teilsektoren in GHD nach dem agentenbasierten Ansatz durch eine große Anzahl von Agenten, d. h. repräsentative Unternehmen, repräsentiert.
- ▶ Zweitens gibt es über den Agenten ein Objekt „Umgebung“, das die Entscheidungsprozesse der Agenten koordiniert.
- ▶ Drittens werden die Eingabedaten über ein Objekt namens „Szenario“ an die Umgebung und die Agenten übermittelt.
- ▶ Schließlich werden alle Komponenten (einschließlich Agenten, Umgebung, Szenario) in einem Container namens „Modell“ gespeichert.

Räumliche Auflösung

NUTS 0 (Nationalstaaten)

Sektoren

Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)

Software

PyCharm

Techniken

siehe oben

Treibhausgasemissionen

CO₂

Unsicherheit

Unsicherheiten werden nicht explizit abgebildet, Vertrauensintervalle werden nicht standardmäßig erzeugt. In der Regel werden Unsicherheiten im Rahmen von Sensitivitäten aufgezeigt.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Ähnlich Forecast-Residential (siehe Abschnitt 3.5)

3.7 Invert/EE-Lab

Name

Invert/EE-Lab

Version des Modells

I/2024

Betreibende Organisation

IREES GmbH – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien

Zweck des Modells

- ▶ Methodisch stellt Invert/EE-Lab ein dem Bottom-up-Ansatz folgendes, technoökonomisches Simulationsmodell dar, mit dem der Energiebedarf und dessen Deckung für Wärme (Raumwärme und Warmwasser) sowie Klimatisierung von Wohn- und Nichtwohngebäuden ermittelt und die Auswirkungen verschiedener Förderinstrumente in Jahresschritten abgebildet werden können.
- ▶ Grundlage des Modells ist eine detaillierte Darstellung des Gebäudebestands nach Gebäudetypen, Baualtersklassen und Sanierungszuständen mit relevanten bauphysikalischen und ökonomischen Parametern einschließlich der Technologien zur Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Klimatisierung. Darauf aufbauend wird der Heiz- und Kühlenergiebedarf unter Einbeziehung von Nutzerverhalten und Klimadaten ermittelt.
- ▶ Die Investitionsentscheidung in Technologien und Effizienzmaßnahmen wird unter Berücksichtigung von investorenspezifischen Entscheidungskalkülen und Hemmnissen sowie Energieträgerpotentialen in einer agentenbasierten Modellierung (Invert-Agents) ermittelt.
- ▶ Mit Invert/EE-Lab ist es möglich, die Auswirkung unterschiedlicher Politikinstrumente und deren Ausgestaltungsvarianten auf die Diffusion von Wärmeversorgungssystemen und Effizienzmaßnahmen im Gebäudebereich in Szenarien zu analysieren.
- ▶ Das Modell ermöglicht eine detaillierte und integrierte Abbildung auf den folgenden, für die Diffusion von Energieeffizienzmaßnahmen und EE-Wärme-Technologien relevanten Ebenen (Steinbach, 2016, S. 172):
 - „Abbildung und Simulation der Investoren im Gebäudebereich: Es werden heterogene Investoren abgebildet, die unter unterschiedlichen administrativen, ökonomischen und informatorischen Voraussetzungen agieren.
 - Abbildung und Simulation des Energiesystems Gebäude und der relevanten Technologien: Der Gebäudebereich wird disaggregiert über eine detaillierte thermische Simulation von Referenzgebäuden unter Berücksichtigung der jeweiligen bauphysikalischen und technologischen Parameter abgebildet.
 - Abbildung der energiepolitischen Maßnahmen und deren Auswirkung auf die individuelle Investitionsentscheidung: Es werden Politikinstrumente in unterschiedlichen Ausgestaltungsvarianten modelliert, welche die Bedingungen der Investitionsentscheidung in Abhängigkeit der agentenspezifischen Wahrnehmung individuell beeinflussen.“
- ▶ Primäre Ergebnisse des Modells (Modelloutput)
 - Endenergie- und Nutzenergiebedarf nach Energieträger und Gebäude
 - Endenergie- und Nutzenergieverbrauch unter Berücksichtigung von Reboundeffekten nach Energieträger und Gebäude
 - Installierte Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmenpakete
 - Investitionen in Wärmeversorgungstechnologien nach Technologie
 - Investitionen in Effizienzmaßnahmen nach Technologie

- Energie- und Betriebskosten nach Energieträger

Akteure

- ▶ Das Modell differenziert die Gebäudeeigentümer und -eigentümerinnen entsprechend ihrer Entscheidungskalküle, Informationsstände und Wahrnehmungen.
- ▶ Es können beliebig viele unterschiedliche Eigentübertypen definiert werden, die dann den Modellklassen „selbstnutzender Eigentümer“, „privater Vermieter“, „Wohnungsgesellschaft“ oder „Nichtwohngebäude-Eigentümer“ zugeordnet werden.

Dokumentation

- ▶ Dokumentation: <https://invert.at/>
- ▶ Artikel Prüfung/ Validierung:
 - <https://doi.org/10.24406/publica-fhg-280782>
 - <https://doi.org/10.34726/hss.2015.29320>

Räumliche Abdeckung

- ▶ Deutschland, Europa
- ▶ Kleinräumigere Darstellung bis auf Stadtebene möglich

Zeithorizont

Der Zeithorizont ist abhängig vom modellierten Szenario und grundsätzlich beliebig. Der Gebäudebestand kann auf ein bestimmtes Basisjahr kalibriert werden.

Zeitliche Auflösung

Jahresschritte

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

- ▶ Der Gebäudebestand wird über Referenzgebäudeklassen abgebildet, die durch bauphysikalische Eigenschaften (U-Werte, Geometrien, Bauteilalter) und Nutzungsprofile charakterisiert sind, ebenso wie durch die installierten Wärmeversorgungstechnologien und Wärmeverteilssysteme.
- ▶ In jedem Zeitschritt (1 Jahr) wird basierend auf einer Weibullverteilung ermittelt, wie viele Gebäude pro Jahr in jeder Referenzgebäudeklasse ein Heizsystem tauschen und Effizienzmaßnahmen durchführen. Die Verteilungsfunktion hängt dabei an dem Alter der Heizsysteme bzw. an dem Alter der Bauteile bei Effizienzmaßnahmen. Neben der lebensdauerbedingten Austauschdynamik fließen im Falle von Effizienzmaßnahmen auch Energiepreisentwicklungen als Elastizität ein, so dass die Sanierungsaktivität nicht allein durch das Alter der Gebäude bestimmt wird.
- ▶ Im nächsten Schritt wird bei denjenigen Gebäuden mit Heizungstausch oder Maßnahmen an der Gebäudehülle die Investitionsentscheidung simuliert. Bei der Wärmeversorgungswahl stehen alle zur Verfügung stehenden und nicht durch Politikinstrumente eingeschränkte Technologien zur Verfügung, die im Input definiert sind. Bei Maßnahmen an der Gebäudehülle kann grundsätzlich eine reine Instandhaltung gewählt werden oder unterschiedliche energetische Maßnahmenpakete, die je nach Szenario und Förderregime ebenfalls im Input definiert werden. Standardmäßig werden diese Maßnahmenpakete

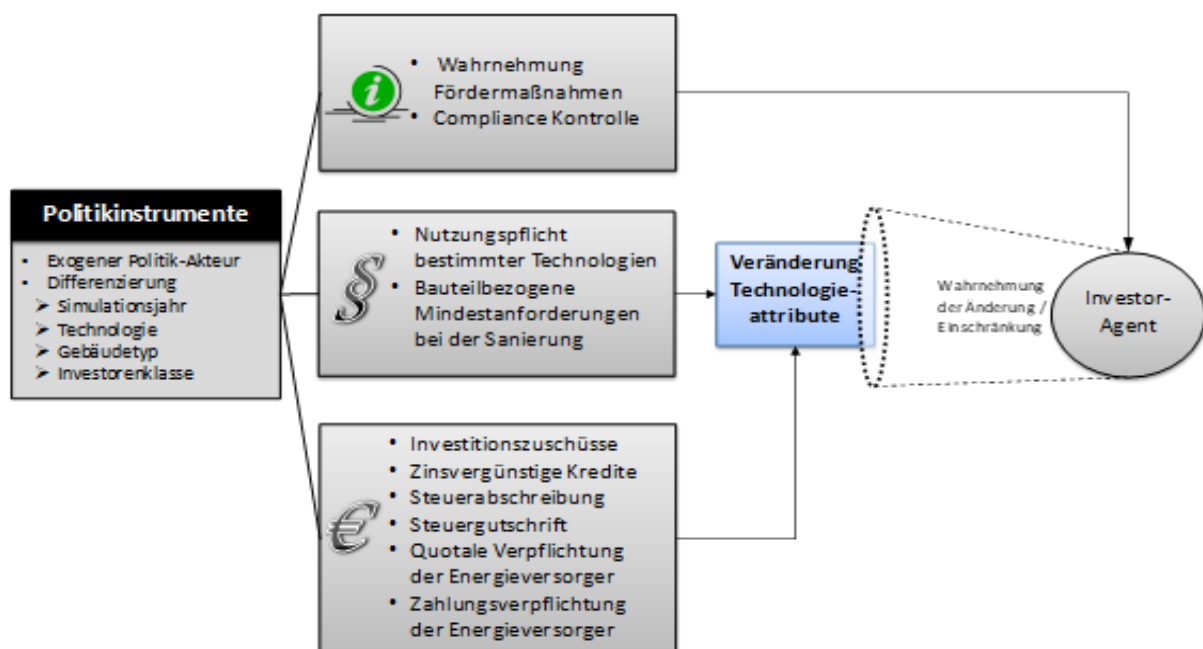
individuell für jedes Referenzgebäude berechnet unter Vorgabe unterschiedlicher zu erreichender Standards (GEG, EH 70, EH 55, Einzelmaßnahme etc.)

- ▶ Neben dem Tausch von Heizsystemen und Maßnahmen an der Gebäudehülle werden ebenfalls modellendogen der Abriss und Neubau von Gebäuden in jeder Periode berechnet. Die Gesamtentwicklung des Gebäudebestandes wird dabei als Flächen- bzw. Gebäudenachfrage exogen vorgegeben. Der Abriss wird in Abhängigkeit der Lebensdauer der Gebäude ebenfalls über eine Weibullfunktion ermittelt, das Delta zwischen exogen vorgegebener Gebäudeentwicklung des Gebäudebestandes nach Abriss wird entsprechend durch Neubauten modellendogen zugebaut. Durch Sanierung von Gebäuden kann die Lebensdauer verlängert werden. Hier kann im Modell grundsätzlich unterschieden werden, ob eine Lebensdauerverlängerung nur durch energetische Maßnahmen oder auch bei einer reinen Instandsetzungsmaßnahme berücksichtigt wird.
- ▶ Die Investitionsentscheidung wird in Abhängigkeit des zugewiesenen Eigentübertyps (Investorenagenten) ermittelt (siehe oben). Im Modell können einzelne Investorentypen implementiert werden, welche den Referenzgebäudesegmenten anteilig als Besitzer zugeordnet werden. Diese Anteile sind zeitabhängig und können somit exogen über den Simulationszeitraum verändert werden. Das Modell erlaubt die Definition beliebig vieler Investorenagenten, welche jeweils Instanzen einer von fünf möglichen Agentenklassen darstellen (siehe oben).
- ▶ Als Ergebnis der Simulation resultieren Marktanteile für die Wärmeversorgungssysteme einerseits und für Effizienzmaßnahmenpakete andererseits jeweils innerhalb einer Referenzgebäude-Agentenkombination. Mit den resultierenden Marktanteilen werden die Referenzgebäudeklassen weiter aufgeteilt und die Ergebnisse zurückgeschrieben für den nächsten Zeitschritt.
- ▶ Im Modell lassen sich darüber hinaus auch Diffusionsbeschränkungen für Technologien abbilden, so dass Marktanteile in Abhängigkeit von Technologieverfügbarkeiten und Wissen der Fachkräfte nicht sprunghaft ansteigen können, sondern in Abhängigkeit der Marktanteile im jeweiligen Vorjahr und definierter Marktgeschwindigkeiten gedeckelt werden.
- ▶ Des Weiteren lassen sich Energieträgerverfügbarkeiten über Kostenpotenzialkurven in den Inputdaten abbilden, mit denen eine Veränderung der exogen hinterlegten Energiepreise in Abhängigkeit der Gesamtnachfrage nach einem Energieträger hinterlegt werden kann. Dies ist insbesondere für Biomasse relevant. In den Inputdaten im Modell können Kostenpotenzialkurven jedoch grundsätzlich für alle Energieträger differenziert hinterlegt werden.
- ▶ Räumliche Verfügbarkeiten von Energieträgern lassen sich in den Inputdaten zudem über Energieträgerregionen abbilden, denen eine bestimmte Anzahl des Gebäudebestandes zugewiesen werden. Dies ist insbesondere für leitungsgebundene Energieträger (Fernwärme, Gas) relevant.
- ▶ Um die Wirkung der Politikinstrumenten auf die Investitionsaktivität in Energieeffizienzmaßnahmen und Wärmeversorgungssystemen zu untersuchen, werden diese explizit im Modell abgebildet. Dies geschieht als integrale Modellierung von Politikinstrumenten und Investoren, die eine aktueursspezifische Untersuchung der Wirkungen der Instrumente ermöglichen sollen. Die Politikinstrumente und deren Ausgestaltung werden zunächst aus Sicht eines Politik-Akteurs für jedes Simulationsjahr exogen definiert. Dabei werden Förder- und Anforderungsbedingungen nach den adressierten Technologien und Maßnahmen sowie den Adressaten – Investorenklassen und

Gebäudetypen – differenziert. Ordnungsrechtliche und finanzielle Fördermaßnahmen verändern die Wirtschaftlichkeit der Technologiealternativen oder schränken die Wahlmöglichkeiten durch Nutzungspflichten oder Mindestanforderungen ein. In Abhängigkeit des Entscheidungskalküls der definierten Investor-Agenten werden diese Veränderungen oder Einschränkungen bei der Investitionsentscheidung berücksichtigt. Ein Investitionszuschuss beispielsweise verändert die relative Vorteilhaftigkeit einer Technologie hinsichtlich des Attributes Investitionen, wobei dies nicht zwangsläufig der wahrgenommenen Attributausprägung eines Investor-Agenten entspricht (z. B. wenn das Förderinstrument nicht bekannt ist). Informatorische Maßnahmen wiederum wirken indirekt auf die Attribute der Wahlmöglichkeiten, indem die investorenspezifische Wahrnehmung verändert wird. Neben spezifischen Fördersätzen und minimalen oder maximalen Förderungen pro Maßnahmen können bei finanziellen Förderinstrumenten auch das Gesamtförderbudget pro Maßnahme und Jahr vorgegeben werden. Wird das Förderbudget innerhalb eines Jahres in der Simulation überschritten, erfolgt für das Jahr eine neue Simulation für einen Teil des Gebäudebestandes ohne Förderung. Nicht ausgeschöpfte Fördermittel werden in das Folgejahr übertragen.

- Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Modellierung von Politikinstrumenten im Modell.

Abbildung 7: Schematische Darstellung der Modellierung von Politikinstrumenten im Modell Invert/EE-Lab



Quelle: Eigene Darstellung, IREES

- Die Programmtechnische Strukturierung des Modells folgt einer objektorientierten Programmierung mit unterschiedlichen Modulen (Klassen), die einander aufrufen und berechnete Werte austauschen (siehe Abbildung 8 zur Modellstruktur).
- Es werden umfangreiche Daten herausgeschrieben, mit denen die Ergebnisse auf Plausibilität überprüft werden können.
- Im Modell erfolgt eine Plausibilitätsprüfung der Inputdaten, die geb. einen Abbruch des Modelllaufs verursachen, sofern unplausible oder fehlerhafte Inputdaten definiert sind.

- ▶ Alle Inputdaten werden im Ergebnisordner mit herausgeschrieben, so dass Szenariensets immer mit Modelloutput und Modellinputdaten dokumentiert sind.
- ▶ Die programmierten Funktionen der einzelnen Module sind durch umfangreiche Funktionstests verifiziert worden.

Methodischer/mathematischer Ansatz

- ▶ Agentenbasiertes Simulationsmodell zur Modellierung der Veränderung / Investitionsentscheidung
- ▶ Bauphysikalisches Gebäudemodell zur Modellierung des Energiebedarfs
- ▶ Bottom-up- Abbildung des Gebäudebestandes

OpenSource

- ▶ Nein
- ▶ Gegen eine Veröffentlichung des Modells spricht die hohe Komplexität des Modells.

Parameter

Integration empirischer Daten soweit möglich

Programmiersprache

Python

Räumliche Auflösung

Ergebnisse der Modellierung können für Deutschland auf NUTS 3-Ebene heruntergebrochen werden.

Sektoren

- ▶ Invert/EE-Lab simuliert die Sektoren Haushalte und Gewerbe-Handel-Dienstleistungen.
- ▶ Es ist möglich, die Treibhausgas-Emissionen entsprechend der Sektoren nach IPCC Guidelines und Bundes-Klimaschutzgesetz aufzuteilen.

Software

- ▶ Software zur Versionsverwaltung: Git-hub
- ▶ Integrierte Entwicklungsumgebungen: Eclipse und MS Visual Studio Code

Techniken

- ▶ Wärmeversorgungssysteme, Lüftungsanlagen, Effizienzmaßnahmen an der Gebäudehülle
- ▶ Wärmeversorgungssysteme und Effizienzmaßnahmen werden separat definiert.
- ▶ Bei Wärmeversorgungssystemen kann eine Kombination zwischen primären und sekundären Wärmeversorgungssystemen erfolgen. Sekundäre Wärmeversorgungssysteme sind Solarthermieanlagen oder PV-Anlagen. Primäre Wärmeversorgungssysteme sind alle gängigen Technologien. Dabei werden auch verschiedene Technologien einer Kategorie hinterlegt, z. B. verschiedene Wärmepumpensysteme (Luft/Wasser, Sole/ Wasser, Luft/Luft, Wasser/Wasser) oder auch verschiedene Kessel – Niedertemperatur- und Brennwertkessel – sowie unterschiedliche Biomassekessel (Scheitholz, Pellets, Hackschnitzel). Des Weiteren werden neben Zentralheizungskesseln und Etagenheizungen auch Einzelraumheizungen

(Elektrische Öfen, Gasöfen, Holzöfen etc.) abgebildet, die jedoch nur in Gebäuden ohne zentrale oder wohnungsweise Verteilsysteme eingesetzt werden können.

- Effizienzmaßnahmen werden wie oben bereits beschrieben gebäudespezifisch für jedes Referenzgebäude ermittelt, unter Vorgabe von zu erreichenden Standards. Neben den energetischen Sanierungspaketen ist auch die Instandsetzung ohne energetische Sanierung ein Alternative. Bei Effizienzmaßnahmenpaketen bzw. Einzelmaßnahmen können maximal 8 verschiedene Pakete pro Gebäude definiert werden, die zur Auswahl stehen. Die Pakete werden individuell anhand von zu erreichenden U-Werten und zugehöriger Förderung definiert.
- Die Daten werden laufend basierend auf Literaturdaten (Evaluationsberichten) und Datenbanken (Langreder et al., 2024) aktualisiert und sind als Inputdaten verfügbar.

Treibhausgasemissionen

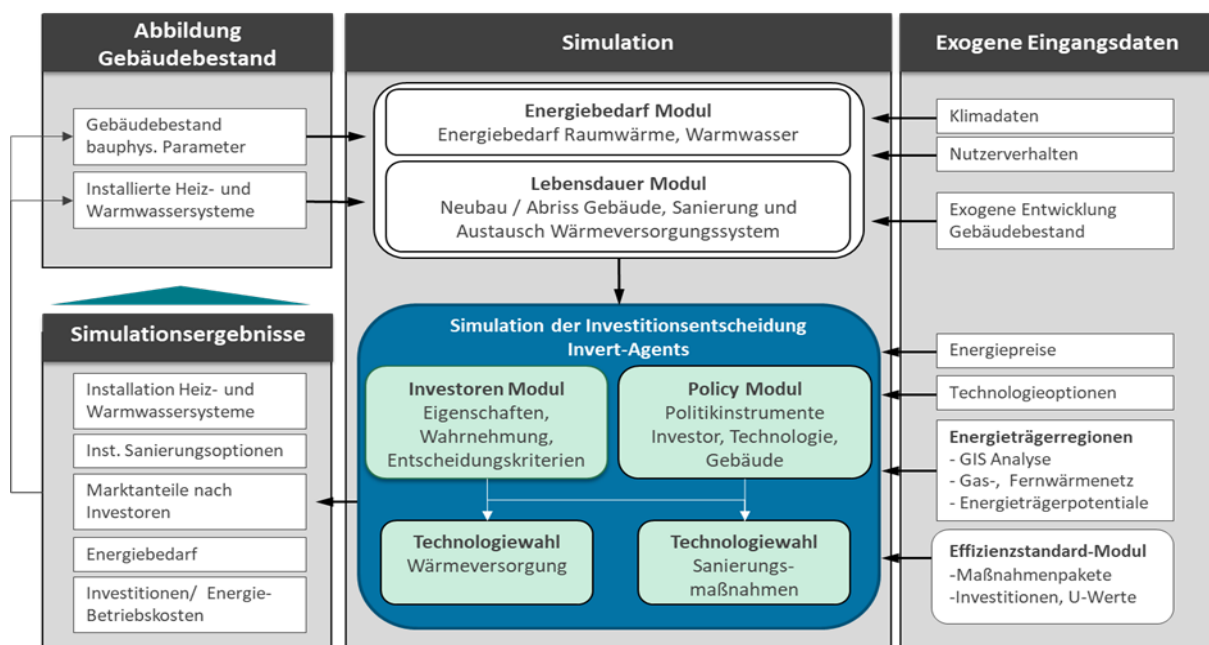
Aus den Energieverbräuchen nach Energieträger werden im Modell auf Basis der hinterlegten spezifischen Emissionsfaktoren die THG-Emissionen in CO₂-Äquivalenten berechnet. Die spezifischen Emissionsfaktoren der Energieträger werden in den Inputdaten definiert.

Unsicherheit

Unsicherheiten werden nicht explizit abgebildet, Vertrauensintervalle werden nicht standardmäßig erzeugt. In der Regel werden Unsicherheiten im Rahmen von Sensitivitäten aufgezeigt.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 8: Visualisierung des Modells Invert/EE-Lab und dessen Funktionsweisen



Quelle: Eigene Darstellung, IREES

3.8 IPCC Waste Model

Name

IPCC Waste Model

Version des Modells

2019 Refinement, Version zur Erstellung des THG-Inventars für 2024 durch das Umweltbundesamt oder ggf. neuere Version, falls diese zur Verfügung gestellt werden kann.

Betreibende Organisation

Öko-Institut e.V. wendet das Modell im Konsortium an. Entwickelt wurde es vom IPCC, angewendet wird es weltweit von unterschiedlichen Behörden zur Ermittlung von Treibhausgasemissionen aus Siedlungsabfalldeponien, unter anderem vom Umweltbundesamt.

Zweck des Modells

- ▶ Das Modell wurde entwickelt, um die Länder bei der Erstellung ihrer THG-Emissionsinventare für den Bereich Abfall, Teilbereich Deponien zu unterstützen.
- ▶ Es wurde vom Umweltbundesamt und dem Öko-Institut für die Anwendung in Deutschland angepasst, um die landestypischen Besonderheiten bei der Erstellung des THG-Inventars berücksichtigen zu können.
- ▶ Eine durch das Öko-Institut durchgeführte Erweiterung des Modells ermöglicht die Projektion der Emissionen aus Siedlungsabfalldeponien in die Zukunft unter Berücksichtigung der Bevölkerungsentwicklung.
- ▶ Das Modell berücksichtigt die organischen Abbauprozesse in Deponien in Abhängigkeit von Art und Ablagerungszeitpunkt der betrachteten Abfalltypen.
- ▶ Das primäre Ergebnis des Modells ist die zeitliche Entwicklung von Methan-Emissionen aus Siedlungsabfalldeponien in Deutschland.
- ▶ Das Modell kann herangezogen werden, um zu beantworten, inwiefern eine Änderung der Art und Menge von deponierten Stoffen die Entwicklung an Methanemissionen beeinflusst. Darüber hinaus können Auswirkungen von unterschiedlicher Erfassung von Deponiegas betrachtet werden.

Akteure

Es werden keine Akteure oder deren Verhalten abgebildet/simuliert.

Dokumentation

- ▶ Dokumentation: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/5_Waste-1.pdf,
<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol5.html>
- ▶ Modell: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/5_Volume5/19R_V5_Waste_Model.xlsx
- ▶ Studien, die das Modell vergleichend nutzen: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2008.00409.x>,
<https://researchrepository.rmit.edu.au/esploro/outputs/doctoral/Quantifying-the-greenhouse-impacts-of-landfill/9922255413401341>

Räumliche Abdeckung

Deutschland, komplettes Bundesgebiet, konsistent zum Territorialprinzip der THG-Inventare

Zeithorizont

- ▶ 1950-2050

- ▶ Zur Inventarerstellung wird der Zeitraum von 1950 bis zum jeweils aktuellen Jahr mit Datenverfügbarkeit verwendet.
- ▶ Für die Projektion kann der Zeithorizont bis zum Jahr 2050 erweitert werden, Startjahr ist dann jeweils das erste Jahr, für das keine Daten aus dem THG-Inventar zur Verfügung stehen.

Zeitliche Auflösung

- ▶ Jährliche Auflösung.
- ▶ Es werden keine unterjährigen Effekte berücksichtigt.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

- ▶ Das Modell berücksichtigt die organischen Abbauprozesse in Siedlungsabfalldeponien in Abhängigkeit von Art und Ablagerungszeitpunkt der betrachteten Abfalltypen.
- ▶ Die Berechnung der Methanemissionen aus der Deponierung basiert auf der „First Order Decay Method“, welche in den 2006 veröffentlichten *IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories* veröffentlicht wurden.
- ▶ Es werden sowohl nationale Aktivitätsdaten sowie landesspezifische Werte beispielsweise für Anteile des organisch abbaubaren Kohlenstoffs (DOC) oder Halbwertszeiten (k-Werte) angesetzt.
- ▶ Weitere Parameter basieren auf Default-Werten der IPCC-Guidelines, wurden aber in Teilen auch durch Forschungsvorhaben überprüft.
- ▶ Für weitere Informationen siehe auch:
https://unfccc.int/sites/default/files/resource/2024-04-15_DE_NID_2024_UNFCCC_english.pdf?download, Kapitel 7.2.1.2.
- ▶ Das Modell kann Wirkungen von Politiken und Maßnahmen abbilden, insofern sie auf die Ablagerung von Stoffen auf Siedlungsabfalldeponien wirken.

Methodischer/mathematischer Ansatz

- ▶ Das Modell berechnet die Methanemissionen aus der Deponierung auf Basis der sogenannten „First Order Decay Methode“. Dabei wird für jedes Jahr die Gesamtmenge an abbaubarem organischem Kohlenstoff in den Deponien berechnet, um zu ermitteln, wieviel davon in jedem Jahr zu Methan und CO₂ abgebaut wird.
- ▶ Das Modell ist ein Multi-Phasen-Modell, welches für die einzelnen Abfallfraktionen mit verschiedenen Halbwertszeiten rechnet und anschließend summiert.

OpenSource

- ▶ Das Modell ist in der Grundform online beim IPCC und UNFCCC frei verfügbar zur Berechnung von Emissionen aus Deponien.
- ▶ Für die Berechnungen der Projektionen wird dem Öko-Institut die jeweils auf das aktuelle Treibhausgasinventar für Deutschland angepasste Modellversion zur Verfügung gestellt. Diese darf vom Öko-Institut ausschließlich zum Zweck der Projektionserstellung genutzt und nicht weitergegeben werden.

Parameter

- ▶ Im Modell werden nationale Statistiken zu Abfallmengen verwendet.
- ▶ In Fällen, wo keine gemessenen oder berechneten nationalen Werte vorhanden sind, stehen im Modell vom IPCC vorgegebene Default-Werte zur Verfügung, auf welche zurückgegriffen werden kann.

Programmiersprache

Excel Formula Language

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

- ▶ Das Modell ist in Excel implementiert.
- ▶ Es bietet die Möglichkeit, für verschiedene Kategorien an Abfallstoffen einerseits Daten aus statistischen Datenquellen anzugeben und andererseits deren zukünftige Ablagerung zu projizieren, dies passiert jeweils für jede Kategorie in einem eigenen Tabellenblatt innerhalb der Datei.
- ▶ Ergebnisse werden auf einem dafür vorgesehenen Blatt aufgelistet und können via Verknüpfungen in anderen Berechnungen weiterverwendet werden.
- ▶ Einlesen zusätzlicher Daten (aktualisierte Statistik, Bevölkerungsentwicklung) erfolgt via Dateiverknüpfung in Excel mit anderen Dateien.
- ▶ Verschiedene Checksummen ermöglichen, Fehler zu identifizieren und zu korrigieren.

Räumliche Auflösung

Deutschland wird als Ganzes, ohne weitere räumliche Unterteilung abgebildet. NUTS 0 (Nationalstaaten)

Sektoren

Sektor 5 Abfallwirtschaft, Teilbereich 5.D. Deponien

Software

MS Excel

Techniken

Das Modell bildet keine Techniken ab, es beschreibt organische Abbauprozesse in Deponien.

Treibhausgasemissionen

Methan (CH₄)

Unsicherheit

Unsicherheiten werden nicht explizit quantifiziert. Das Modell bietet die Möglichkeit, bei Parametern, die für das betrachtete Gebiet nicht bekannt sind, auf Default-Werte zurückzugreifen, die für die wirtschaftlichen und klimatischen Bedingungen dieses Gebiets typisch sind.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Eine Visualisierung des Modells steht aktuell nicht zur Verfügung.

3.9 LaWiEnMod

Name

Landwirtschaftliches-Energie-Modell, Teilmodul des Landwirtschaftsmodells LISE (Livestock and Soil Emissions)

Version des Modells

Für jede Modellierungsrunde wird eine eigene Modellversion erstellt. Eine explizite Versionsnummerierung erfolgt nicht. Die neueste Modellversion ist die für die Projektionen 2025 im Rahmen des Projekts Politikszenerarien XII genutzte.

Betreibende Organisation

Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie

Zweck des Modells

- ▶ Die Entwicklung von LaWiEnMod verfolgte folgende Ziele:
 - Mit dem neuen Zuschnitt des Landwirtschaftssektors unter dem KSG wurden die energiebedingten Emissionen aus der stationären und mobilen Nutzung dem Landwirtschaftssektor zugeordnet. Früher wurde der Sub-Sektor 1.A.4.c unter den GHD-Sektoren mit modelliert und nicht separat ausgewiesen.
 - Separate Abbildung von Emissionsprojektionen für den Sub-Sektor 1.A.4.c in der CRF-Struktur des nationalen Treibhausgasinventars
 - Abbildung von Energieverbräuchen sowohl in der Struktur der deutschen Energiebilanzen als auch der Struktur des deutschen Treibhausgasinventars
 - Schließen von Modellierungslücken, da bisher die Entwicklung der energiebedingten Emissionen des Landwirtschaftssektors nicht separat modelliert werden konnte, sondern der Entwicklung des GHD-Sektors folgte. Durch das Modell wird nun eine separate Modellierung möglich, die auch auf Grund des KSG-Zuschnitts erforderlich ist.
- ▶ Das LaWiEnMod ist ein Teilmodul des am Öko-Institut genutzten Landwirtschaftsmodells LISE (Livestock and Soil Emissions). Das LaWiEnMod bildet den Energieverbrauch der landwirtschaftlichen Produktion für den stationären und den mobilen Bereich ab. Für den stationären Bereich wird der Wärmeverbrauch aus Gewächshäusern, Stallheizungen, Trocknungsanlagen und sonstigem (z. B. landwirtschaftliche Nutz- und Wohngebäude) berücksichtigt. Für den mobilen Bereich wird der Kraftstoffverbrauch des Landwirtschaftssektors, aber auch der Forstwirtschaft abgebildet. Im Bereich der Landwirtschaft wird dabei in den Kraftstoffverbrauch in der Innenwirtschaft und in der Außenwirtschaft unterschieden. Als dritter Sub-Sektor wird die Fischerei unter 1.A.4.c.iii berichtet.
- ▶ Mit dem LaWiEnMod können die Entwicklung des Energieverbrauchs und die Auswirkungen der Änderungen in der Energieträgerstruktur auf die Emissionen abgebildet werden.
- ▶ Primäre Modellergebnisse sind
 - Primärenergieverbrauch nach Energieträgern (TJ)
 - Endenergieverbrauch nach Sub-Sektoren (1.A.4.c.i – iii) und Energieträgern (TJ)
 - THG-Emissionen in CRF-Struktur (kt CO₂e)

- THG-Emissionen in KSG-Struktur (kt CO₂e)

Akteure

LaWiEnMod verfolgt keinen akteurs- oder agentenbasierten Modellierungsansatz.

Dokumentation

- ▶ PID/URL zur Benutzerdokumentation:
https://www.oeko.de//fileadmin/oekodoc/Modellbeschreibung_LISE.pdf
- ▶ PID/URL zum Git-Repository: Nicht vorhanden
- ▶ PID/URL zu einer Auswahl an Artikeln, in denen das Modell kritisch geprüft bzw. validiert wird: Es gibt bisher keine Artikel, in denen das Modell explizit kritisch geprüft bzw. validiert wird, da das Modell bisher nur für die Auftragsforschung entwickelt und angewendet wurde. Für entsprechende Publikationen war in den bisherigen Projekten kein Budget kalkulierbar. Im Kontext der jeweiligen Projektarbeit wird das Modell regelmäßig sorgfältig überprüft.

Räumliche Abdeckung

LaWiEnMod bildet die Energieverbräuche und Emissionen der Bundesrepublik Deutschland entsprechend der nationalen Energiebilanz und dem nationalen Treibhausgasinventar ab (Territorialprinzip).

Zeithorizont

- ▶ LaWiEnMod deckt den Zeitraum von 1990 bis 2050 ab.
- ▶ Startzeitpunkt (Basisjahr) ist ein Jahr vor dem Jahr, in dem die Modellierung stattfindet.

Zeitliche Auflösung

- ▶ Jährliche Auflösung
- ▶ In der Regel entspricht ein Modelljahr auch der tatsächlichen Auflösung. Sofern Inputdaten nur in gröberen Auflösungen vorliegen (z. B. Fünfjahresschritte), so wird linear interpoliert.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

- ▶ Das LaWiEnMod bildet die Entwicklung des Energieverbrauchs der Landwirtschaft ab. Als Inputdaten werden die Aktivitätsdaten aus der Landwirtschaftsmodellierung aus der CAPRI-Modellierung des Thünen-Instituts zu Grunde gelegt. Dazu zählen vor allem die Entwicklung der Tierzahlen und die Flächenbelegung (Ackerfrüchte, Ökolandbau, Biodiversitätsflächen). Zusätzlich können Maßnahmen zur Energieeffizienz und einem Brennstoffwechsel abgebildet werden.
- ▶ Das Modell kann die Auswirkungen von Energieeffizienz-Maßnahmen und einem Energieträgerwechsel in Bezug auf den Energieverbrauch und die Entwicklung der THG-Emissionen abbilden. Daneben wird auch der Einfluss der Entwicklung der Aktivitätsdaten (Rückgang Tierbestände – Verringerung der beheizten Stallfläche etc.) abgebildet. Durch Angaben zu Förderhöhen können Maßnahmen zur Energieeffizienz etc. abgebildet werden. Die Änderung des Energieträgermixes erfolgt in Anlehnung an die Entwicklung in den Sektoren GHD und Verkehr. Zusätzlich erfolgt eine Anpassung der Entwicklung an die Spezifika des Landwirtschaftssektors, da beispielsweise die großflächige Elektrifizierung der schweren Landmaschinen nicht möglich ist und hier eine andere Entwicklung als im Verkehrssektor vorausgesetzt wird. Sofern Annahmen dazu aus der Literatur verfügbar sind

(z. B. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft [KTBL], 2023), werden diese übernommen und eigene Annahmen zur Entwicklung in der Zeitreihe getroffen.

- Die Abbildung von Elastizitäten, z. B. eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs infolge steigender Kraftstoffpreise, ist theoretisch möglich. Derzeit fehlen allerdings Daten zu Elastizitäten für den Kraftstoffeinsatz in der Landwirtschaft. Eine aktuelle Zeitreihe für den Kraftstoffeinsatz von 1990 bis 2022 liegt vor (Umweltbundesamt [UBA], 2024). Der Kraftstoffverbrauch schwankt aber unabhängig von den Preisen auch auf Grund von Überschneidungswirkungen durch Witterung, Erntemengen und zudem der Berücksichtigung des Kraftstoffeinsatzes in der Forstwirtschaft.

► Literaturquellen:

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.) (2023). *Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen*.

https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Energie/Antriebsenergien/12643_Antriebssysteme.pdf [23.01.2025].

Umweltbundesamt (UBA) (2024). *CRF Tabellen 1990-2022 (EU submission)*.

<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen> [16.12.2025].

Methodischer/mathematischer Ansatz

LawiEnMod ist ein Bottom-up-Modell, Bottom-up-Abbildung der Energieeinsätze für den stationären Wärmeverbrauch:

1. Stallheizungen,
2. Trocknungsanlagen,
3. Gewächshäuser und
4. Sonstiges (landwirtschaftliche Wohn- und Nutzgebäude), sowie des mobilen Kraftstoffverbrauchs in der
5. Außenwirtschaft und in der
6. Innenwirtschaft.

Die Entwicklung der Energiesätze wird über die Änderungen der Aktivitätsdaten berechnet.

$$\text{Energieverbrauch gesamt} = \text{Aktivitätsdaten } y \cdot \text{Energieverbrauch pro Aktivität } y$$

Zudem wird die Energieeffizienz über jährliche Durchdringungsraten und die Energieeinsparung auf Ebene der sechs verschiedenen Kategorien berechnet.

$$\begin{aligned} & \text{Energieeinsparung gesamt} \\ &= \text{Jährlicher Durchdringungsfaktor Aktivität } y \\ & \cdot \text{Energieeinsparung pro Aktivität } y \end{aligned}$$

Der jährliche Durchdringungsfaktor wird auf Basis der verfügbaren Fördersummen ermittelt oder folgt der Entwicklung in anderen Sektoren (z. B. Sanierungsrate für landwirtschaftliche Nutz- und Wohngebäude in Abhängigkeit von Sanierungsrate im GHD-Sektor). Die Entwicklung der erneuerbaren Energien wird auf Basis der Anteile am gesamten Endenergieverbrauch berechnet. Die Entwicklung der Anteile orientiert sich an der Entwicklung im GHD- (Wärmeverbrauch), Verkehrs- (Kraftstoffeinsatz) und Stromsektor (Biogas).

OpenSource

LaWiEnMod ist eine proprietäre Eigenentwicklung des Öko-Instituts und derzeit nicht offen lizenziert. Das Öko-Institut unterstützt und fördert die Prinzipien von Open Data und Open Modelling. Für weitere Informationen, siehe Abschnitt 3.12 (PowerFlex).

Parameter

Die wichtigsten Parameter in LaWiEnMod umfassen die Energieverbräuche und die Energieträgereinsätze, die aus den nationalen Energiebilanzen und den Treibhausgasinventaren als Zeitreihen für die historischen Jahre vorliegen. Für LaWiEnMod sind die landwirtschaftlichen Aktivitätsdaten wie die Tierbestände und Flächenbelegung relevante Parameter im Modell. Diese werden aus der CAPRI-Modellierung übernommen.

Programmiersprache

Das Modell verwendet nur Standard-Excel-Funktionen ohne VBA-Funktionen oder Makros.

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

- ▶ Das Modell LaWiEnMod deckt den CRF-Sub-Sektor 1.A.4.c Landwirtschaft/Forstwirtschaft/Fischerei ab. Der Großteil des Energieeinsatzes ist auf die Landwirtschaft zurückzuführen. Die Teilmodule entsprechen den CRF-Kategorien 1.A.4.c.i = stationärer Energieverbrauch, 1.A.4.c.ii = mobiler Energieeinsatz, 1.A.4.c.iii = Fischerei.
- ▶ Schnittstellen zu anderen Modellen sind *die Aktivitätsdaten aus der Landwirtschaftsmodellierung* (z. B. Tierbestände, Flächenentwicklung) sowie die Entwicklung der *Energieträgeranteile im GHD- und Verkehrssektor*.
 - Die Schnittstelle für Input- und Outputdaten stellen in der Regel Excel-Dateien dar, in einigen Fällen auch andere Formate (z. B. CSV).
 - Schnittstellen zu anderen Modellen werden über sogenannte Interface-Dateien im Excel-Format realisiert.
 - In LaWiEnMod sind eine Vielzahl von Kontrollrechnungen implementiert, die Daten- und Berechnungsfehler aufzeigen. Dazu zählen:
 - Checksummen und -differenzen, die sicherstellen, dass keine Daten in einzelnen Verarbeitungsschritten verloren gehen.
 - Checks auf negative Werte bei Differenzenbildung.
 - Checks der Zeitreihen durch visuelle Darstellungen in Graphiken

Räumliche Auflösung

LaWiEnMod bildet Deutschland als Ganzes ab, ohne weitere räumliche Unterteilung. Die Modellierungsregion entspricht daher NUTS: DE.

Sektoren

- ▶ LaWiEnMod kann die Energie- und Emissionsdaten des GHD-Sub-Sektors 1.A.4.c abbilden.
- ▶ Unter 1.A.4.c sind 3 weitere Sub-Sektoren abgebildet, die in der folgenden Tabelle dargestellt werden:

Tabelle 3: Sub-Sektoren in LaWiEnMod

CRF-Sektor	KSG-Sektor	Detailgrad CRF
1.A.4.c.i	Stationäre Landwirtschaft	Detaillierung entsprechend der CRF-Tabellen (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)

CRF-Sektor	KSG-Sektor	Detailgrad CRF
1.A.4.c.ii	Mobile Landwirtschaft & Forstwirtschaft	Detaillierung entsprechend der CRF-Tabellen (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)
1.A.4.c.iii	Fischerei	Detaillierung entsprechend der CRF-Tabellen (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O)

Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

CRF: Common Reporting Format, genutzt in den Treibhausgasinventaren

Software

LaWiEnMod ist in Microsoft Excel implementiert.

Techniken

- ▶ LaWiEnMod bildet nicht einzelne Techniken ab, sondern Kategorien als Ganzes. Die Energieeinsparungen in den einzelnen Kategorien ((1.) Stallheizungen, (2.) Trocknungsanlagen, (3.) Gewächshäuser und (4.) Sonstiges (landwirtschaftliche Wohn- und Nutzgebäude), sowie des mobilen Kraftstoffverbrauchs in der (5.) Außenwirtschaft und in der (6.) Innenwirtschaft) stehen stellvertretend für das Energieeinsparpotenzial verschiedener Techniken wie z. B. Wärmerückgewinnung durch Wärmetauscher, doppelagiger Energieschirm, Reifendruckanlage etc., welche über die Ergebnisse der Leuchtturmprojekte aus dem Bundesprogramm Energieeffizienz und CO₂-Einsparung in Landwirtschaft und Gartenbau abgeleitet wurden.

- ▶ Literaturquelle:

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2025). *Leuchtturmprojekte*.
https://www.ble.de/DE/Projektfoerderung/Foerderungen-Auftraege/Ackerbaustrategie/Leuchtturmprojekte/Leuchtturmprojekte_node.html
 [16.12.2025.

Treibhausgasemissionen

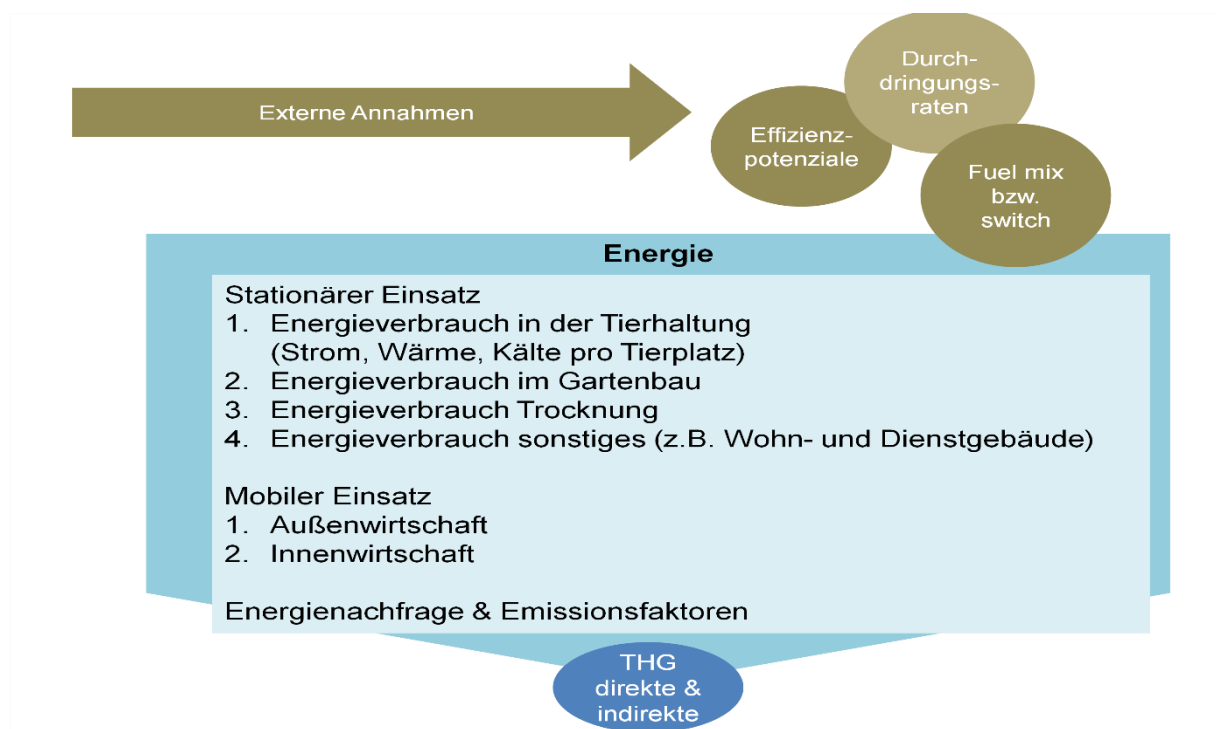
- ▶ Kohlendioxid (CO₂)
- ▶ Methan (CH₄)
- ▶ Distickstoffoxid/Lachgas (N₂O)

Unsicherheit

Es werden keine Unsicherheiten im Modell abgebildet. Sofern notwendig, kann die Abbildung von Unsicherheiten über Sensitivitätsrechnungen erfolgen.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 9: Visualisierung des LaWiEnMod Modells und dessen Funktionsweisen



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

3.10 LULUCFmod

Name

LULUCFmod

Version des Modells

1.3.1

Betreibende Organisation

Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei

Zweck des Modells

LULUCFmod ist das Berechnungsmodell zur nationalen Treibhausgasberichterstattung für den Sektor LULUCF (gemäß UN-Klimarahmenkonvention, Verordnung (EU) 2018/1999, Bundes-Klimaschutzgesetz). Es setzt IPCC-Richtlinien und andere Vorgaben (wie Beschlüsse der UNFCCC Conference of the Parties oder aus EU-Recht) um. Das Modell wurde erweitert um die Möglichkeit, Landnutzungsänderungstrends in die Zukunft zu extrapolieren und die Wirkung von Maßnahmen auf Landnutzungsänderungen und Emissionen abzubilden. Dadurch ist das Modell in der Lage, Zukunftsszenarien in sich konsistent für den LULUCF-Sektor abzubilden.

Akteure

Das Modell hat einen Flächenbezug. Akteure sind implizit die Flächeneigentümer und -bewirtschafter.

Dokumentation

Nationales Inventardokument, <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2024>

Räumliche Abdeckung

Landfläche Deutschlands

Zeithorizont

1990 - 2050, bestimmte Variablen gehen ab 1971 oder bis 2069 ein

Zeitliche Auflösung

Kalenderjahr

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

Das Modell ist räumlich explizit: Landnutzung, Landnutzungsänderungen, Kohlenstoffvorratsänderungen und Emissionen werden auf einem dreidimensionalen Raum-Zeit-Gitter (zwei Raumdimensionen gleich Koordinaten plus eine Zeitdimension) berechnet. Dieser Ansatz stellt räumliche und zeitliche Konsistenz sicher. Die Berechnungen an den Gitterpunkten sind räumlich unabhängig, aber zeitlich abhängig. Das Modell verwendet keine Optimierung: Ergebnisse werden nach Rechenregeln aus Inputdaten abgeleitet. Bestimmte Aktivitätsdaten sind am Punkt nicht verfügbar, sondern nur als aggregierte Flächenstatistiken. Das Modell verwendet einen stochastischen Ansatz, um Flächenstatistiken auf die einzelnen Punkte herunterzubrechen. Dabei werden die Bundesländer separat berechnet, um Konsistenz innerhalb der Bundesländer sicherzustellen. Die Projektion von Landnutzungsänderungen erfolgt über einen stochastischen Ansatz auf Basis der Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Landnutzungsänderungen in einer Referenzperiode. Diese Wahrscheinlichkeiten werden konstant in die Zukunft fortgeschrieben. Maßnahmen werden über die Modifikation der Landnutzungsänderungswahrscheinlichkeiten und/oder Modifikationen der Emissionsberechnung implementiert.

Methodischer/mathematischer Ansatz

Siehe Nationales Inventardokument (National Inventory Document).

Übergangswahrscheinlichkeiten der Landnutzung für die Zukunft werden abgeleitet als $P_{i,j} = \frac{n_{i,j}}{n_i}$ mit $P_{i,j}$ der gesuchten Wahrscheinlichkeit, $n_{i,j}$ der Anzahl von Punkten

mit Landnutzungskategorie i zu Beginn der fünfjährigen Referenzperiode und Landnutzungskategorie j am Ende der Periode, n_i der Anzahl von Punkten mit Landnutzungskategorie i zu Beginn der Referenzperiode.

OpenSource

Das Modell ist bisher nicht Open Source. Es wären einige Vorarbeiten notwendig, um das Modell Open Source zu stellen. Dazu gehört die Bereitstellung einer Datenbank mit Input-Daten, die Sicherstellung von IT-Sicherheit (z. B. Prävention von SQL-Injection-Angriffen) und die Überarbeitung der Code-Dokumentation, um sie allgemeinverständlicher zu machen. Bisher standen dazu keine ausreichenden Ressourcen zur Verfügung.

Parameter

Parameter werden verwendet zur Beschreibung von Biomassewachstumskurven, zur Modellierung von Wasserstands-Emissions-Beziehungen in organischen Böden, zur Modellierung von Bodenkohlenstoff und -stickstoff in Mineralböden, etc. Die Parameter wurden in wissenschaftlichen Veröffentlichungen beschrieben oder aus solchen abgeleitet. Siehe Nationales Inventardokument (NID).

Programmiersprache

R, C++, Python, PostgreSQL

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

LULUCFmod hat eine (weitgehend) funktionale Struktur: Module sind als Funktionen implementiert. Datenimport und -export ist über eine Schnittstelle zu einer PostgreSQL-Datenbank implementiert. Schnittstellen zu anderen Modellen sind über diese Datenbank realisiert.

Räumliche Auflösung

100 m x 100 m Grid

Sektoren

Es wird ausschließlich der LULUCF-Sektor (CRT 4) modelliert.

Software

- ▶ Programmierungsumgebung: RStudio Server
- ▶ Versionskontrolle: GitLab
- ▶ Datenbank: PostgreSQL und pgadmin
- ▶ Zusammenstellung und Ausgabe von Ergebnissen: Microsoft Excel

Techniken

Definition auf LULUCF-Sektor nicht anwendbar

Treibhausgasemissionen

CO₂, CH₄, N₂O

Unsicherheit

Unsicherheiten entstehen strukturell durch die Modellansätze, durch die Eingangsdaten zur Landnutzung, durch Inter- und Extrapolation, durch die Unsicherheit der Eingangsdaten zur Emissionsberechnung (z. B. Emissionsfaktoren). Das Modell hat bisher aus Performancegründen noch keine eigene Unsicherheitsberechnung implementiert. Unsicherheiten werden für die Treibhausgasberichterstattung durch den vereinfachten IPCC-Ansatz (IPCC, 2006b, 3.2.3.1) fortgepflanzt.

Wesentliche endogene und exogene Strukturen/Variablen

Exogene Variablen:

- ▶ Kohlenstoffvorratsänderung der Waldbiomasse
- ▶ Flächenkulisse der organischen Böden
- ▶ Klimatische Wasserbilanz
- ▶ Räumliche Verortung von Entwässerungsgräben
- ▶ Fläche des Waldbrands (historisch)
- ▶ Produktionsstatistik Torf und Torfprodukte (historisch)
- ▶ Vorrat von Kohlenstoff und Stickstoff in Mineralböden
- ▶ Landnutzung (historisch)
- ▶ Emissionsfaktoren (teilweise)

Endogene Variablen:

- ▶ Landnutzungsänderungskategorien (ohne und mit 20 a Übergangszeit)
- ▶ Zeit seit Landnutzungsänderung
- ▶ Zeit seit Etablierung von mehrjähriger Biomasse außerhalb des Waldes
- ▶ Moorwasserstand
- ▶ Emissionsfaktoren (teilweise)
- ▶ THG-Emissionen (positiv = Quelle, negativ = Senke) für verschiedene Kohlenstoffpools bzw. Senken und Quellen

Wesentliche Konzepte und Annahmen

Das Modell unterstellt für die Zukunft zeitlich konstante Wahrscheinlichkeiten für spezifische (Brutto-) Landnutzungswechsel. Real sind diese Wahrscheinlichkeiten abhängig von politischen, rechtlichen und ökonomischen Rahmenbedingungen.

3.11 Matrix

Name

Matrix-Modell

Version des Modells

Aktuelle Version aus dem Jahr 2024

Betreibende Organisation

Thünen Institut für Waldökosysteme

Zweck des Modells

Simulation der Veränderung der Biomasse im Wald in definierten Klassen

Akteure

Das Modell verfolgt keinen akteurs- oder agentenbasierten Modellierungsansatz.

Dokumentation

- ▶ Thünen Working Paper 185: "National Forestry Accounting Plan for Germany – annotated and revised edition"
- ▶ Weitere Thünen Working Papers zum Thema

Räumliche Abdeckung

Deutschland

Zeithorizont

Der Zeithorizont ist variabel, für die Projektion wird bis 2055 gerechnet.

Zeitliche Auflösung

- ▶ Imulation von Inventuren alle 5 Jahre
- ▶ Ausgabe als Zustandswert zu einem bestimmten Zeitpunkt oder als Veränderung pro Jahr

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

- ▶ Stichprobenpunkte der Bundeswaldinventur (BWI) werden nach Baumarten/Altersklassen gruppiert, zu Klassen zusammengefasst und die Veränderungen zwischen zwei Aufnahmepunkten bestimmt.
- ▶ Aus den aggregierten Veränderungen werden Zuwächse, entnommene Holzmengen und die Veränderung des Kohlenstoffvorrates in situ und berichterstattungskonforme (siehe Link) Emissionsfaktoren hergeleitet.
- ▶ Richtlinien zur Berichterstattung: IPCC (2006a)

Methodischer/mathematischer Ansatz

Das Modell beschreibt die Entwicklung des Waldes basierend auf den Übergängen von Flächen aus einer Klasse (hier: in einer Baumarten-Altersklassen-Matrix) über die Zeit in andere Klassen. Die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Klassen werden als Übergangsmatrix zusammengestellt und aus zwei aufeinander folgenden Waldinventuren abgeleitet.

OpenSource

Das Modell ist bisher nicht Open Source. Es wären einige Vorarbeiten notwendig, um das Modell Open Source zu stellen. Bisher standen dazu keine ausreichenden Ressourcen zur Verfügung.

Parameter

Baumarten, Altersklassen und Periodenanzahl der Modellierung; alles andere sind Inventurergebnisse und Berechnungen daraus

Programmiersprache

plpgsql

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

Das Modell setzt sich zusammen aus:

- ▶ einer PostgreSQL-DB, in der die inventurbasierten Ergebnisse verarbeitet werden und die Projektion berechnet wird
- ▶ einer Excel-Datei als Schnittstelle für die Modelle lulucfmod und wood_carbon_monitor

Räumliche Auflösung

Der deutsche Wald wird als Ganzes, ohne weitere räumliche Unterteilung abgebildet.

Sektoren

Sektor 4 LULUCF, Teilbereich Forst 4 A

Software

- ▶ pgAdmin
- ▶ Excel

Techniken

Waldwachstum und Waldbewirtschaftung

Treibhausgasemissionen

CO₂

Unsicherheit

Unsicherheiten werden nicht explizit quantifiziert.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

- ▶ siehe Dokumentation
- ▶ Figure 1: Visualisation of transition vectors in the age class – volume class matrix in [Thünen Working Paper 185: "National Forestry Accounting Plan for Germany – annotated and revised edition"](#)
- ▶ [Weitere Thünen Working Papers zum Thema](#)

3.12 PowerFlex

Name

PowerFlex

Version des Modells

Für jede Modellierungsrunde wird eine eigene Modellversion erstellt. Für die Projektionen 2025 wird Version 1.2.1 verwendet.

Betreibende Organisation

Öko-Institut

Zweck des Modells

PowerFlex ist ein lineares Optimierungsmodell, mit dem für den europäischen Strommarkt der optimale Einsatz von Kraftwerken, Speichern und nachfrageseitigen Flexibilitätsoptionen, wie zum Beispiel Wärmepumpen oder Elektrofahrzeuge, bei der Deckung der Strom- und Fernwärmenachfrage sowie der Bereitstellung von Regelleistung berechnet wird. Der kostenoptimale Einsatz der Akteure ergibt sich aus ihrer Reihung in der Merit Order.

PowerFlex bildet den deutschen Kraftwerkspark inkl. KWK-Anlagen und nachfrageseitige Flexibilitätsoptionen in einer höheren Detailtiefe ab als die Anlagen der anderen modellierten europäischen Länder. Diese Detailtiefe, in der die physikalischen, technischen und ökonomischen Prozesse des Energiesystems abgebildet sind, machen PowerFlex zu einem Fundamentalmodell.

Aus den durch PowerFlex berechneten Kapazitäten, Einsatzprofilen und Schattenpreisen der Strom- und Fernwärmenachfrage können abhängig von der konkreten Fragestellung folgende Ergebnisse abgeleitet werden (vgl. auch Abbildung 10):

- ▶ CO₂-Emissionen
- ▶ Technologie- und Energieträgermix der Strom- und Fernwärmeerzeugung
- ▶ Import- und Exportbilanzen von Strom und Wasserstoff
- ▶ Benutzungsstunden, Volllaststunden und Deckungsbeiträge von Erzeugungsanlagen und Speichern
- ▶ Speicherverluste
- ▶ durchschnittliche Strom- und Fernwärmepreise

Seit mehr als zehn Jahren setzt das Öko-Institut PowerFlex in der Auftragsforschung ein, um langfristige Transformationsszenarien zu erstellen, den stundenscharfen Einsatz von Erzeugung und Flexibilitäten unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu analysieren wie beispielsweise in Bauknecht et al. (2024) oder Wirkungen und Wechselwirkungen von Politiken und Maßnahmen, z. B. im Rahmen der Klimaschutzszenarien (Repenning et al., 2015) abzubilden.

Akteure

In PowerFlex erfolgt eine Minimierung der Kosten aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive. Eine akteursbasierte Betrachtung erfolgt nicht.

Dokumentation

PID/URL zur Benutzerdokumentation:

- ▶ Eine öffentliche Benutzerdokumentation ist zurzeit nicht verfügbar.

PID/URL zum Git-Repository:

- ▶ nicht öffentlich

PID/URL zu Artikeln, in denen das Modell kritisch geprüft bzw. validiert wird:

- ▶ Bauknecht et al. (2024): The role of decentralised flexibility options for managing transmission grid congestions in Germany
- ▶ Pöstges et al. (2022): Phasing out coal: An impact analysis comparing five large-scale electricity market models
- ▶ Bucksteeg et al. (2022): The transformation of integrated electricity and heat systems—Assessing mid-term policies using a model comparison approach
- ▶ Hobbie et al. (2022): Impact of model parametrization and formulation on the explorative power of electricity network congestion management models - Insights from a grid model comparison experiment
- ▶ Syranidou et al. (2022): Development of an open framework for a qualitative and quantitative comparison of power system and electricity grid models for Europe
- ▶ Ruhnau et al. (2022): Why electricity market models yield different results: Carbon pricing in a model-comparison experiment
- ▶ Flachsbarth et al. (2021): Addressing the Effect of Social Acceptance on the Distribution of Wind Energy Plants and the Transmission Grid in Germany
- ▶ Ritter et al. (2019): Effects of a Delayed Expansion of Interconnector Capacities in a High RES-E European Electricity System
- ▶ Gils et al. (2019): Comparison of spatially and temporally resolved energy system models with a focus on Germany's future power supply
- ▶ Koch et al. (2015): Modellgestützte Bewertung von Netzausbau im europäischen Netzverbund und Flexibilitätsoptionen im deutschen Stromsystem im Zeitraum 2020–2050

Räumliche Abdeckung

In PowerFlex können alle Länder der EU-27 mit Ausnahme von Zypern und Malta sowie das Vereinigte Königreich, die Schweiz und Norwegen abgebildet werden. Je nach Aufgabenstellung

können Ausschnitte dieses Gesamtsystems betrachtet werden, indem einzelne Nationalstaaten aggregiert oder von der Modellierung ausgeschlossen werden.

Zeithorizont

In PowerFlex wird eine Stützjahresberechnung mit einem Optimierungszeitraum von einem Kalenderjahr durchgeführt. Damit ist der abgebildete Zeithorizont flexibel an die Projektanforderungen anpassbar. Typischerweise wird vom aktuellen Jahr (bei Bedarf inklusive eines historischen Kalibrierungsjahres) in frühen Jahren in Jahresschritten, in späten Szenariojahren in 5-Jahresschritten bis 2050 gerechnet.

Die Modellrechnungen decken also den gesamten Zeitraum bis zum anvisierten Erreichen der Klimaneutralität ab.

Zeitliche Auflösung

In PowerFlex wird eine stündliche Auflösung verwendet. Die stündliche Auflösung ist in der Energiesystemmodellierung üblich. Sie stellt einen Kompromiss zwischen Detailliertheit und Rechenaufwand dar. Zahlreiche Inputdaten liegen ebenfalls in stündlicher Auflösung vor.

Es werden alle 8760 Stunden eines Kalenderjahres modelliert, um den kostenoptimalen Einsatz von saisonalen Flexibilitäten, wie z. B. Speicherwasser, gut abbilden zu können.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

PowerFlex ist ein Optimierungsmodell, das den Einsatz von Kraftwerken und anderen Erzeugungs- und flexiblen Verbrauchsoptionen wie Speicher, Wärmepumpen und Elektromobilität kostenminimal aus der Perspektive eines sozialen Planers bestimmt. Das in der Energiesystemmodellierung gängige Konzept des sozialen Planers, welches erlaubt, eine Kostenminimierung über alle Akteure hinweg durchzuführen, wird beispielsweise in Schellong (2016) erläutert. In der Zielfunktion werden die variablen Betriebskosten minimiert.

Das Optimierungsproblem kann auf Investitionsentscheidungen ausgeweitet werden. Hierfür werden die fixen Betriebskosten und die Annuitäten in der Zielfunktion ergänzt. Im Projektionsbericht kommt das Investitionmodul nicht zum Einsatz.

Der Kostenminimierung entgegen wirken technische, regulatorische und ökonomische Restriktionen, welche so formuliert sind, dass ein lineares Optimierungsproblem (vgl. z. B. Hochstättler, 2017) gelöst werden kann. Diese Anforderung verursacht als Limitation, dass nichtlineare Zusammenhänge wie Unit Commitment, zubauabhängige Lernprozesse oder Nachfrageelastizitäten nicht abgebildet werden können.

Für die Kraftwerke und für Elektrolyseure ist ein modellendogener Zubau oder Rückbau möglich. Mit der Anzahl der Investitions- und Desinvestitionsoptionen steigt allerdings auch die Rechenintensität überproportional an, so dass Investitionsentscheidungen nur für besonders sensitive Systemkomponenten ermöglicht werden.

Detailliert abgebildet ist die Interaktion zwischen Strom- und Fernwärmesektor: KWK-Anlagen, Heizwerke sowie erneuerbare und elektrische Wärmeerzeuger werden verschiedenen Wärmebilanzräumen zugewiesen, innerhalb derer sie im Rahmen einer Merit Order kostenminimierend eingesetzt werden. Bei KWK-Anlagen werden dabei die Wirkungsgradverluste bei Auskopplung von Wärme berücksichtigt. Durch die Kopplung von Strom- und Wärmesektor wirken sich Strompreiseffekte direkt auf die Deckung der Fernwärmenachfrage aus.

Die anderen Sektoren werden in PowerFlex berücksichtigt, indem die flexibilisierbaren und inflexiblen Nachfragen und andere Parametrierungen über erprobte Schnittstellen integriert werden.

Methodischer/mathematischer Ansatz

PowerFlex ist ein in [GAMS](#) formuliertes lineares Optimierungsmodell, das in seiner Basisvariante den Einsatz (Dispatch) von Kraftwerken und anderen Erzeugungs- und flexiblen Verbrauchsoptionen wie Speicher, Wärmepumpen und Elektromobilität kostenminimal aus der Perspektive eines sozialen Planers bestimmt. Das Konzept des sozialen Planers wird beispielsweise in Schellong (2016) erläutert.

In der Zielfunktion werden die über alle Erzeugungseinheiten pp variablen Betriebskosten $varC_{pp}$ minimiert.

Sollen auch Investitionen optimiert werden, werden die leistungsabhängigen fixen Betriebskosten $fixC_{pp}$ und die mit der Zubauleistung $p_{pp}^{el,need}$ entstehenden Annuitäten $capC_{pp}$ in der Zielfunktion ergänzt:

$$\min c = \sum_{pp} varC_{pp} + p_{pp}^{el,need} \cdot capC_{pp} + fixC_{pp}$$

$$\min c = \sum_{pp} varC_{pp}$$

Die variablen Kosten sind ausbringungsmengenabhängig:

$$varC_{pp} = \sum_t (vc_{pp} \cdot q_{t,pp})$$

Die Fixkosten sind leistungsabhängig:

$$fixC_{pp} = fc_{pp} \cdot p_{pp}^{el}$$

Der Kostenminimierung entgegen wirken technische, regulatorische und ökonomische Restriktionen. Eine Nebenbedingung stellt sicher, dass die stündliche Stromeinspeisung $q_{t,pp}$ die installierte Leistung p_{pp}^{el} zu keinem Zeitpunkt überschreitet:

$$\forall t: q_{t,pp} \leq p_{pp}^{el}$$

p_{pp}^{el} setzt sich aus der Summe der bereits installierten Leistung $p_{pp}^{el,is}$ und der zu installierenden Leistung $p_{pp}^{el,need}$ zusammen:

$$P \cdot pp^{el} = P \cdot pp^{el,is} + p_{pp}^{el,need}$$

Die zentrale Nebenbedingung stellt sicher, dass die Last dem_t zu allen Zeitpunkten durch die Erzeugung $q_{t,pp}$ gedeckt ist:

$$\forall t: \sum_{pp} q_{t,pp} = dem_t$$

Aufgrund der Problemgröße wird angestrebt, auf Nichtlinearitäten zu verzichten und ein lineares Optimierungsproblem (vgl. Hochstättler, 2017) zu lösen. Technische und ökonomische Gegebenheiten werden entsprechend abstrahiert, um sie als lineare Zusammenhänge abzubilden. Weitere Nebenbedingungen sind entsprechenden Veröffentlichungen (Bauknecht et al., 2024) zu entnehmen.

OpenSource

Das Öko-Institut unterstützt und fördert die Prinzipien von Open Data und Open Modelling. Im Bereich Open Data besitzt das Institut Erfahrung mit der Bereitstellung von Daten unter offenen Lizenzen z. B. auf der [OpenEnergyPlatform](#) oder [zenodo](#).

Bei der Entwicklung der OpenEnergyPlatform und der Ontologie hat sich das Öko-Institut im Rahmen der BMWK-Projekte „Szenarien-Datenbank“ und „SIROP“ engagiert. Im Bereich Open Modelling kann das Öko-Institut auf Projekte verweisen, die auf Basis des Open-Source-Modellierungs-Frameworks pyPSA Tools zur Verfügung stellen, beispielsweise den PTX Business Opportunity Analyser für Agora Energiewende.

Das Energiesystemmodell PowerFlex ist hingegen eine proprietäre Eigenentwicklung des Öko-Instituts und bis zum aktuellen Zeitpunkt nicht offen lizenziert. Gegen eine Veröffentlichung spricht vor allem der hohe Aufwand, um den Code zugänglich und lesbar für Außenstehende zu machen.

Parameter

Im Wesentlichen kann unterschieden werden zwischen

1. Parametern, die als besonders sensitive Parameter aus den Annahmen der Rahmendaten der THG-Projektionen stammen:

- ▶ Brennstoffpreise
- ▶ CO₂-Preise

2. Daten, die Outputs anderer Modelle sind und an PowerFlex über eine etablierte Schnittstelle übergeben werden:

- ▶ Strom- und Fernwärmenachfrage
- ▶ Verbrauch synthetischer Kraftstoffe (PtL und H₂)
- ▶ Verfügbarkeit von Raffineriegas und anderen Sondergasen

3. Parameter, die eher technischer Natur sind:

- ▶ Der **Kraftwerkspark** der Bestandsanlagen wird mit Hilfe der laufend aktuell gehaltenen Kraftwerksdatenbank des Öko-Instituts abgebildet. In diese fließen Quellen wie die Kraftwerksliste der BNetzA (Bundesnetzagentur [BNetzA], 2025a) und das Markstammdatenregister (BNetzA, 2025b) kontinuierlich ein und werden durch Recherchen zu Angaben der Kraftwerksbetreiber über existierende und sich in Planung befindliche Kraftwerke sowie Expertenschätzungen des Öko-Instituts ergänzt.

4. Parameter, die durch politische Instrumente getrieben werden:

- ▶ Die durch politische Instrumente getriebenen Parameter werden in diesem Projekt abgestimmt und im Instrumentenpapier (Förster et al., 2024) festgehalten.
- ▶ Zu diesen Parametern zählt
 - der Ausbau der erneuerbaren Energien,
 - der Zubau von KWK-Anlagen im Rahmen der KWKG-Förderung,
 - der Ausbau von Elektrolyseurleistungen,
 - der Ausbau von Batteriespeichern und
 - der Zubau von H₂(-ready)- Kraftwerken.
- ▶ Zur Gewährleistung der Aktualität werden die aktuellen politischen Entwicklungen analysiert. Entsprechende Daten werden kurzfristig ausgewertet und in die

Parametrierung einbezogen. Als Beispiel wird das Vorgehen bei der Bestimmung des Ausbaupfads der erneuerbaren Energien erläutert:

- Der Ausbaupfad der erneuerbaren Energien wird im Instrumentenpapier abgestimmt.
- Zugrunde gelegt wird der Ausbaupfad nach den Ausschreibungen im EEG (EEG, 2023).
- Dieser wird abgeglichen mit dem Stand der installierten Leistungen nach AGEE-Stat 2023 (AGEE-Stat, 2023).
- Zudem werden vergangene Ausschreibungen, Angebote und Zuschläge ausgewertet und mit den realisierten Ausschreibungen des EEG abgeglichen (vgl. BNetzA (Bundesnetzagentur [BNetzA], 2024)).
- Sofern diese Auswertungen es nahelegen, wird vom vorgesehenen Pfad im EEG abgewichen.

Programmiersprache

PowerFlex ist in GAMS implementiert. Zum Lösen der Optimierungsprobleme werden die kommerziellen Solver CPLEX und GUROBI verwendet. Für Datenaufbereitung und automatisiertes Testen wird Python verwendet.

In Pre- und Postprocessing wird neben GAMS und Excel auch Python verwendet. Die Datenhaltung von Inputdaten und Modellergebnissen erfolgt größtenteils über eine SQL-Datenbank (Microsoft SQL Server).

Entwicklung, Versionsmanagement und Issue Tracking erfolgen über git. Die Repositories sind nicht öffentlich und werden auf einem internen GitLab-Server gehostet.

Programmetechnische Gestaltungsprinzipien

Technisch ist der Modell-Code in drei Komponenten aufgeteilt:

- ▶ Im **Preprocessing** erfolgt der Import und die Aufbereitung der Input-Daten. Die Inputdaten können im Zuge der Kalibrierung an dieser Stelle den Anforderungen gemäß angepasst werden.
- ▶ In der **Main**-Komponente wird das Gleichungssystem erstellt und gelöst. Die Main-Komponente besteht aus dem obligatorischen Kernmodell und optionalen Modulen, mit denen weitere Funktionalitäten eingebunden werden können. Zu den optionalen Funktionalitäten zählen das Investitionsmodul, die PV-Eigenverbrauchsoptimierung oder das Power-to-Gas-Modul.
- ▶ Im **Postprocessing** erfolgt die Aufbereitung der Ergebnisse. Die Variablenbelegungen werden in Ergebnisparameter geschrieben und zu Kennzahlen aggregiert. Die Ergebnisse werden in einer SQL-Datenbank abgelegt. Projektspezifische Anforderungen an Ergebnisdarstellungen können implementiert werden.

Die **Datenhaltung** (sowohl für Modell-Input als auch für die Ergebnisse) erfolgt zu größten Teilen in einer SQL-Datenbank. Je nach Schnittstelle, Datentyp und Anwendungsfall werden auch die Dateiformate *csv* und *Excel* verwendet.

Eine im Software-Bereich bewährte Methode zur **Qualitätssicherung** von Modellweiterentwicklungen ist das Unit Testing. Einzelne Module oder Funktionseinheiten einer Software werden isoliert getestet, um sicherzustellen, dass sie wie erwartet funktionieren. Da

PowerFlex mit GAMS nicht in einer funktionalen Programmiersprache codiert ist, ist ein echtes Unit Testing nicht möglich. Es werden allerdings mittels eines Python Wrappers und dem pytest Package automatisierte Tests und Konsistenz-Checks durchgeführt, die sicherstellen, dass bei Weiterentwicklung die Funktionalität des Modells gewahrt bleibt und Fehler frühzeitig identifiziert werden können. Beispielsweise wird getestet, dass das Modell in relevanten Szenarien vor und nach Modellweiterentwicklungen zu dem gleichen Optimierungsergebnis gelangt, wenn die Modellweiterentwicklung keinen Einfluss auf diese nehmen soll. Ebenso können Inputdaten und Ergebnisse auf Konsistenz geprüft werden. Beispielsweise wird die Einhaltung von Energiebilanzen und die erlaubte Spannbreite bei technologischen und ökonomischen Charakteristika von Kraftwerken geprüft.

PowerFlex wird eingesetzt, um zukünftige Entwicklungen des Energiesystems abzuschätzen und Transformationspfade zu analysieren. Bevor jedoch mit dem Modell in die Zukunft geblickt werden kann, ist es state of the art, zu überprüfen, ob das Modell die historische Entwicklung akkurat nachbilden kann. Daher wird den Szenariorechnungen in der Regel eine **Basisjahrkalibrierung** vorgeschaltet.

Im Rahmen der Basisjahrkalibrierung werden auf Grundlage statistischer Daten Modellrechnungen für ein historisches Jahr durchgeführt. Die Ergebnisse werden mit statistischen Daten der Energiewirtschaft, wie beispielsweise den Veröffentlichungen der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB), verglichen. Abweichungen können Hinweise auf notwendige Anpassungen der Input-Parameter geben.

Typische Modifikationen können beispielsweise die Anpassung von Emissionsfaktoren, Wirkungsgraden und technischen Verfügbarkeiten von einzelnen Kraftwerken oder Kraftwerkskategorien sein. Auch Wartungsfenster einzelner Kraftwerke können bei Bedarf an die historischen Gegebenheiten angepasst werden. Diese Modifikationen werden über die gesamte Projektdauer hinweg beibehalten, um die Vergleichbarkeit der Szenariorechnungen zu gewährleisten.

Die wichtigsten Indikatoren für die Basisjahrkalibrierung sind die Nettostromerzeugung, die Wärmeerzeugung und der Brennstoffeinsatz je Energieträger, sowie die Stromimportbilanz.

Räumliche Auflösung

Jeder Nationalstaat (NUTS 0 Ebene) wird als ein Bilanzraum mit einheitlichem Marktgebiet ohne interne Netzrestriktionen betrachtet. Innerhalb von Deutschland kann die regionale Auflösung bei Bedarf weiter erhöht werden. Innerdeutsche Regionen sind dann über das Transport-Modell (vgl. Domschke, 2014) miteinander verbunden, d. h. der Stromaustausch zwischen den Regionen ist beliebig einstellbar. Die Anzahl der Regionen ist frei wählbar. Klassischerweise wird Deutschland aber maximal in 16 Regionen unterteilt, was der administrativen Gliederung auf Bundeslandebene entspricht. Für regional disaggregiertere oder Stromnetzberechnungen ist PowerFlex an das institutseigene Netzmodell OptGrid (Modellbeschreibung z. B. hier: <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Grid-Model-Comparison-Experiment.pdf>) koppelbar.

Im Projektionsbericht wird Deutschland als ein einheitliches Marktgebiet modelliert.

Sektoren

PowerFlex modelliert die Stromerzeugung und die Erzeugung von Fernwärme und netzgebundener Wärme.

Eine Zuordnung zu CRF-Sektoren bzw. KSG-Sektoren erfolgt nachgelagert durch das Modell ENUSEM.

Techniken

Die folgenden Technologien werden in PowerFlex berücksichtigt:

- ▶ **Stromerzeugung:** Thermische Kraftwerke; Erneuerbare (Photovoltaik Windenergie an Land, Windenergie auf See, Laufwasser)
- ▶ **Stromspeicher:** PV-Batteriespeicher, Großbatteriespeicher, Pumpspeicher, Speicherwasser
- ▶ **Wärmeerzeugung (Fernwärmenetze):** Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), Heizwerke und Spitzenlastkessel, Wärmepumpen, Elektrodenheizkessel, Solarthermie, Geothermie, Abwärme
- ▶ **Wärmespeicher:** Pufferspeicher / Tagesspeicher, Saisonale Speicher
- ▶ **Nachfrageseitige Flexibilität:** Demand Side Management für Industrie und GHD, Dezentrale Wärmepumpen (Objektversorgung), Elektromobilität (detaillierte Verfügbarkeits- und Fahrleistungsprofile für verschiedene Fahrzeugkategorien für flexibles Laden und Vehicle-to-Grid)
- ▶ **Wasserstoff und strombasierte Energieträger:** Elektrolyseure, Rückverstromung in Wasserstoffkraftwerken und Wasserstoff-KWK-Anlagen, Deckung der Nachfrage an strombasierten Energieträgern durch Erzeugung und Import

Für Deutschland werden thermische Kraftwerke bis zu einer Leistung von 10 MW blockscharf modelliert, um etwa differenzierte Wirkungsgrade, Mindestanfahrrestriktionen und spezifische Wartungsinformationen berücksichtigen zu können. Kleinere Anlagen, z. B. BHKWs, werden zu alters-, brennstoff- und regionsspezifischen Aggregaten zusammengefasst. Im Ausland werden alle Anlagentypen, unabhängig von der Blockgröße, zu alters- und brennstoffspezifischen Aggregaten zusammengefasst.

Treibhausgasemissionen

In PowerFlex werden ausschließlich CO₂-Emissionen berücksichtigt. Weitere Treibhausgasemissionen der Energiewirtschaft werden nachgelagert in ENUSEM ergänzt.

Die CO₂-Emissionen ergeben sich direkt aus dem durch PowerFlex ermittelten kraftwerksspezifischen Brennstoffeinsatz. Sie werden in der Ergebnisaufbereitung nach Nationalstaat und Energieträger, für Deutschland differenziert nach EU-ETS und nEHS, aggregiert. Die Einteilung der Energieträger orientiert sich an den AGEB-Energiebilanzen.

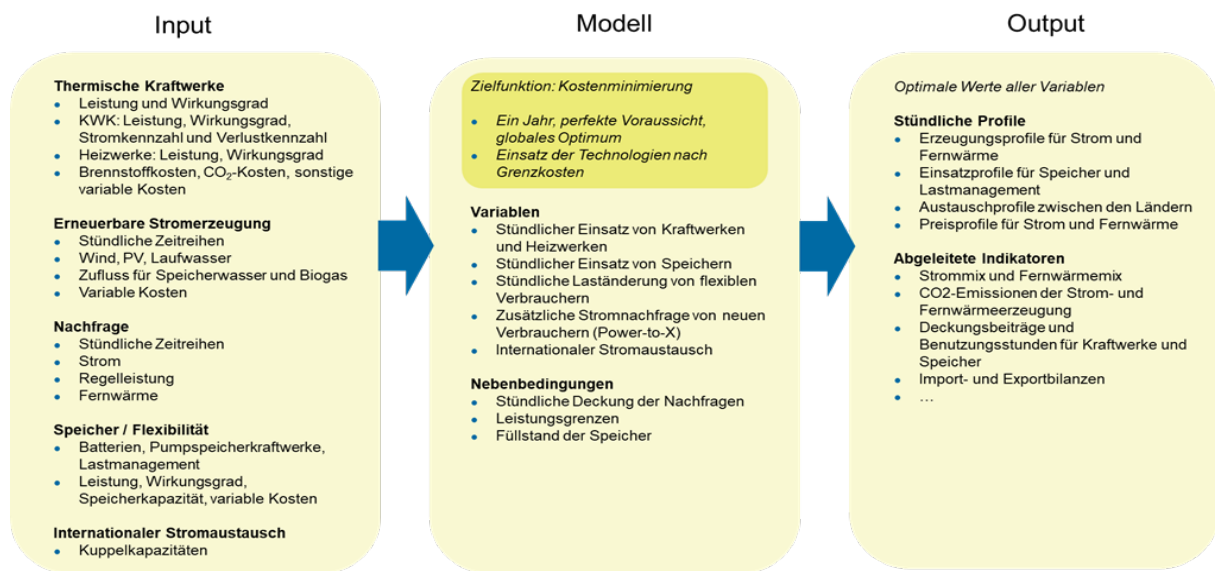
Unsicherheit

PowerFlex ist ein deterministisches Modell: Über den Planungshorizont eines Jahres besteht perfekte Voraussicht. Um bestehende Unsicherheiten zu berücksichtigen, wird in deterministischen Modellen auf Szenariorechnungen und Sensitivitätsanalysen zurückgegriffen: Um die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen abzubilden, werden entsprechende Szenarien gebildet und berechnet. Wirken Parameter stark auf die Modellergebnisse und ist ihre Entwicklung unsicher, so können entsprechende Sensitivitätsrechnungen durchgeführt werden. Ein standardisierter Modellierungsprozess erleichtert dabei das Durchführen und Auswerten von Sensitivitätsanalysen.

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse und zur Identifikation von robusten Aussagen eignet sich auch ein interinstitutioneller Vergleich von Modellierungsergebnissen. Im hier beschriebenen Vorhaben wird im Bereich der Wärmeerzeugung und im europäischen Verbund ein Vergleich der Modellergebnisse mit den Arbeiten von Prognos durchgeführt.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 10: Visualisierung des PowerFlex Modells und dessen Funktionsweisen



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

3.13 ProFI

Name

Projektionsmodell für F-Gas-Emissions-Inventare

Version des Modells

Für jede Modellierungsrunde wird eine eigene Modellversion erstellt. Eine explizite Versionsnummerierung erfolgt nicht.

Betreibende Organisation

Öko-Institut e.V.

Zweck des Modells

Zweck des Modells ProFI (Projektionsmodell für F-Gas-inventare) ist die Erstellung von Projektionen der im deutschen Treibhausgasinventar (THG-Inventar) abgebildeten Emissionen an fluorierten Treibhausgasen (F-Gasen).

Entsprechend dem THG-Inventar erfolgt eine Differenzierung der F-Gas-Emissionen in verschiedene Gase/Gasgruppen und verschiedene Inventarkategorien.

F-Gase werden im Modell differenziert in HFKW (summarisch für im Inventar berichtete teilfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe), FKW (summarisch für im Inventar berichtete perfluorierte Fluorkohlenwasserstoffe), SF₆ (Schwefelhexafluorid), NF₃ (Stickstofftrifluorid) sowie eine aus Vertraulichkeitsgründen nicht spezifizierte Mischung an fluorierten Treibhausgasen.

Die komplette Bandbreite der im THG-Inventar enthaltenen F-Gas-Emissionen aus allen emittierenden Anwendungsbereichen und Produktionsprozessen wird abgebildet.

Der Modellierungsansatz unterscheidet sich signifikant zwischen den verschiedenen abgebildeten Emissionsquellgruppen und Gasen/Gasgruppen und reicht von Trendextrapolationen zu Stock-change-Modellierung.

Die primären Ergebnisse des Modells (Modeloutput) sind Projektionen von F-Gas-Emissionen in Deutschland in der Einheit Tonne CO₂-Äquivalent.

Akteure

ProFI verfolgt keinen akteurs- oder agentenbasierten Modellierungsansatz.

Dokumentation

Eine öffentlich verfügbare Dokumentation des Modells liegt derzeit nicht vor. Für die genutzten Berechnungsmethoden gemäß Inventarrichtlinien siehe 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (<https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>) Für die Dokumentation der THG-Inventarstruktur siehe UNFCCC Beschlüsse: Decision 24/CP.19 (<https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf>) und (https://unfccc.int/sites/default/files/resource/CMA2021_L10a2E.pdf) Es gibt bisher keine Artikel, in denen das Modell explizit kritisch geprüft bzw. validiert wird, da das Modell bisher nur für die Auftragsforschung entwickelt und angewendet wurde. Für entsprechende Publikationen war in den bisherigen Projekten kein Budget kalkulierbar. Im Kontext der jeweiligen Projektarbeit wird das Modell regelmäßig sorgfältig überprüft. Zu den Kontrollmechanismen gehört einerseits das 4-Augen-Prinzip und andererseits der systematische Einsatz von Prüfsummen, um die Konsistenz von Teilergebnissen zu überprüfen.

Räumliche Abdeckung

ProFI deckt das Territorium der Bundesrepublik Deutschland ab, konsistent zum Territorialprinzip der THG-Inventare.

Zeithorizont

ProFI deckt den Zeitraum von 1990 bis 2050 ab. Startzeitpunkt (Basisjahr) ist in der Regel zwei Jahre vor dem Jahr, in dem die Modellierung für die THG-Projektionen stattfindet.

Zeitliche Auflösung

ProFI nutzt eine jährliche Auflösung. In der Regel entspricht ein Modelljahr auch der tatsächlichen Auflösung. Sofern Inputdaten nur in gröberen Auflösungen vorliegen (z. B. Fünfjahresschritte), so wird eine lineare Interpolation modelliert.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

Modul 1: HFKW

Für HFKW beinhaltet ProFI kein detailliertes Modell der in Geräten in den diversen HFKW-Anwendungssektoren (insbesondere Klimatisierung & Kühlung) enthaltenen Gasmengen („Bank“) und der während Betrieb und Entsorgung anfallenden Emissionen und ist hier davon abhängig, extern (z. B. im Modell AnaFgas) modellierte Emissionstrends zu übernehmen. Für AnaFgas (Analysis of Fluorinated greenhouse gases) vgl. Joint Research Center (o.J.). In externen Modellierungsprojekten für verschiedene Szenarien ermittelte relative Emissionstrends für HFKW können spezifisch für verschiedene Inventarquellgruppen nach ProFI übernommen werden, um aus den im Inventar enthaltenen Zeitreihen der historischen HFKW-Emissionen von Projektionen abzuleiten.

Modul 2: SF₆ aus Schaltanlagen

ProFI enthält ein Modell der bei der Herstellung von elektrischen Schaltanlagen eingefüllten Mengen SF₆, dem Export und Bestand von Schaltanlagen sowie Schaltanlagen zur Entsorgung und den bei Befüllung, im Betrieb und bei der Entsorgung anfallenden Emissionen an SF₆. Die Emissionen werden über Emissionsfaktoren aus den jeweiligen Aktivitäten Befüllung, Bestand und Entsorgung berechnet. Annahmen zu Emissionsfaktoren für die Projektionsjahre können

über Fortschreibung historischer, aus dem THG-Inventar abgeleiteter Emissionsfaktoren oder durch Expertenschätzungen getroffen werden.

Modul 3: SF₆ aus Schallschutzfenstern

Die Berechnung von SF₆-Emissionen aus Schallschutzfenstern funktioniert vergleichbar zum Modul 2 (SF₆ aus Schaltanlagen). Angesichts des Verbots der Neubefüllung ist für die Projektion nur noch die Modellierung des Rückgangs des Restbestands an Schallschutzfenstern mit SF₆ und der damit zusammenhängenden Emission aus der Entsorgung relevant.

Modul 4: FKW aus Aluminiumproduktion

Für FKW-Emissionen aus der Aluminiumproduktion werden in ProFI aus historischen Daten aus den THG-Inventaren spezifische Emissionen pro Tonne erzeugtem Primäraluminium berechnet. Für die Projektion der Emissionen wird angesichts der im jeweiligen Szenario hinterlegten Maßnahmen/Instrumente eine Expertenschätzung für die Entwicklung der spezifischen Emissionen erstellt und mit extern im Modellverbund modellierten Ergebnissen zur Entwicklung der Aluminiumproduktion verknüpft.

Modul 5: Sonstige F-Gas-Emissionen

Sonstige Quellgruppen / F-Gase sind quantitativ wenig bedeutend und können konstant oder proportional zum angenommenen Wirtschaftswachstum extrapoliert werden.

Methodischer/mathematischer Ansatz

ProFI ist ein Accounting Modell, welches nur mathematische Grundoperationen benötigt:

- ▶ Multiplikation von Aktivitätsraten mit Emissionsfaktoren
- ▶ Trendfortschreibung von Basisjahremissionen durch Multiplikation mit Trendfaktoren
- ▶ Modellierung von Bestandsänderungen durch Addition von Neuanlagen und Subtraktion von entsorgten Anlagen

OpenSource

ProFI stellt durch seine Implementierung einerseits ein Modell und andererseits eine Datenbank dar. Da auch nicht frei verfügbare und zum Teil vertrauliche Daten enthalten sind, ist eine Open-Source-Veröffentlichung derzeit nicht möglich.

Parameter

Wo nötig, werden Parameter anhand von Literaturquellen oder Expertenschätzungen abgeschätzt:

- ▶ Gschrey, B. & Schwarz, W. (2011). *Projektionen zu den Emissionen von HFKW, FKW und SF₆ für Deutschland bis zum Jahr 2050* (Climate Change 21/2011). <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4226.pdf> [13.06.2023].
- ▶ Gschrey, B., Behringer, D., Kleinschmidt, J., Jörß, W., Liste, V., Ludig, S., Wissner, N., Birchby, D., Dubey, J. & Hekman, J. (2022). *Support contract for an Evaluation and Impact Assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases: Impact assessment final report*. <https://doi.org/10.2834/934036>

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

Die Strukturierung des Modells gemäß der THG-Inventare baut auf den im Rahmen der UNFCCC international vereinbarten Inventartabellen (UNFCCC-Beschlüsse: Decision 24/CP.19 und

Decision 5/CMA.3) auf. In den Modulen 2 & 3 (SF₆ in Schaltanlagen und in Schallschutzfenstern) werden zudem THG-Berechnungsmethoden gemäß den 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories benutzt (IPCC, 2006a).

Das Modell ist in Excel implementiert und enthält grundsätzlich Zeitreihen von 1990-2050. Die wesentlichen Schnittstellen betreffen

- ▶ das Einlesen von Daten der historischen THG-Inventare, um die Zeitreihenkonsistenz sicherzustellen (alle Module)
- ▶ das Einlesen der im Modellverbund modellierten Projektionen der primären Aluminiumproduktion (Modul 4)
- ▶ das Einlesen von Emissionstrends und Modellierungsergebnisse externer Studien/Modelle (Modul 1). Differenziert nach den Modulen werden die Projektionen der Emissionen aus Extrapolationen der jeweiligen modellierungsrelevanten Parameter ermittelt.

Räumliche Auflösung

ProFI bildet Deutschland als Ganzes ab, ohne weitere räumliche Unterteilung. Die Modellierungsregion entspricht daher NUTS: DE.

Sektoren

ProFI bildet die Entwicklung aller im deutschen THG-Inventar berichteten fluorierten Treibhausgase (F-Gase) ab, dies betrifft aktuell die folgenden Inventarkategorien:

- ▶ CRT 2.B.9 Fluorchemische Produktion
- ▶ CRT 2.C.3 Aluminium-Produktion
- ▶ CRT 2.C.4 Magnesium-Produktion
- ▶ CRT 2.E.1 Halbleiterproduktion
- ▶ CRT 2.E.3 Photovoltaikproduktion
- ▶ CRT 2.F.1 Kälte- und Klimaanlage
- ▶ CRT 2.F.2 Schaumherstellung
- ▶ CRT 2.F.3 Feuerlöschanlagen
- ▶ CRT 2.F.4 Aerosole (differenziert zwischen medizinischen Dosiersprays und anderen Aerosolen)
- ▶ CRT 2.F.5 Lösemittel
- ▶ CRT 2.G.1 Elektrische Anlagen
- ▶ CRT 2.G.2 SF₆ / FKW aus anderem Produktgebrauch (differenziert zwischen Schallschutzfenstern und anderen Anwendungen)
- ▶ CRT 2.G.4 andere (ORC-Anlagen)

Software

ProFI ist in Microsoft Excel implementiert.

Techniken

ProFI bildet keine einzelnen Techniken ab, sondern die jeweiligen Inventarquellgruppen als Ganzes.

Treibhausgasemissionen

ProFI bildet die Entwicklung aller im deutschen THG-Inventar berichteten fluorierten Treibhausgase (F-Gase) ab:

- ▶ HFKW (teilfluorierte Kohlenwasserstoffe - in Summe)
- ▶ FKW (perfluorierte Kohlenwasserstoffe - in Summe)
- ▶ SF₆ (Schwefelhexafluorid)
- ▶ NF₃ (Stickstofftrifluorid)
- ▶ aus Vertraulichkeitsgründen im deutschen THG-Inventar nicht spezifizierte fluorierte Treibhausgase

Unsicherheit

Unsicherheiten werden nicht quantifiziert.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Eine Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweise liegt derzeit nicht vor.

3.14 Py-GAS-EM

Name

Py-GAS-EM

Version des Modells

Commit 3c936950 im branch "projection_report_2025" im Thuenen Gitlab repository "pygasem" (nicht öffentlich).

Betreibende Organisation

Thünen-Institut für Agrarklimaschutz

Zweck des Modells

Py-GAS-EM ist das Berechnungsmodell zur nationalen Treibhausgasberichterstattung für den Sektor Landwirtschaft (gemäß UN-Klimarahmenkonvention, Verordnung (EU) 2018/1999 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1999>, Bundes-Klimaschutzgesetz). Es setzt IPCC-Richtlinien (IPCC 2006: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>, IPCC 2019: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>) und andere Vorgaben (wie Beschlüsse der UNFCCC Conference of the Parties oder aus EU-Recht) um.

Akteure

Py-GAS-EM modelliert keine Akteure, sondern Emissionen von Luftschadstoffen und Treibhausgasen aus der Landwirtschaft.

Dokumentation

- ▶ Nationales Inventardokument, <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2024>

- Methodenwiki, <https://git-dmz.thuenen.de/vos/emissionsagriculture2025/-/wikis/home> (zugänglich ab 15.03.2025)

Räumliche Abdeckung

Das Modell deckt Deutschland ab und rechnet auf der Ebene von Landkreisen.

Zeithorizont

Der Zeithorizont ist variabel. Für die Emissionsberichterstattung werden die Emissionen zurück bis in das Jahr 1990 berechnet. Die Projektionen mit Py-GAS-EM werden momentan bis zum Jahr 2050 berechnet.

Zeitliche Auflösung

Der Zeitschritt in Py-GAS-EM beträgt ein Jahr. Prozesse auf kürzeren Zeitskalen (wie z. B. interannuelle Schwankungen von Tierbeständen oder die witterungsabhängige Ausbringung von Wirtschaftsdünger) können mangels differenzierterer Daten nicht abgebildet werden. Die jahresübergreifende Vorratshaltung synthetischer Dünger wird durch eine zeitlich übergreifende Mittelung der Eingangsdaten approximiert.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

Py-GAS-EM ist ein Programm zur Berechnung gas- und partikelförmiger Emissionen aus Tierhaltung und Pflanzenbau in der Landwirtschaft.

Die Eingangsdaten und Ergebnisse der Berechnungen werden in einer PostgreSQL-Datenbank gehalten.

Zur Emissionsberechnung mit dem Py-GAS-EM-Modell wird das System Landwirtschaft im Sinne der IPCC-Berichterstattung definiert. Es umfasst die Bereiche „Nutztierhaltung“ (Emissionen aus Verdauung und Wirtschaftsdünger-Management) sowie „landwirtschaftlich genutzte Böden“. Die Methoden zur Emissionsberechnung beruhen auf den Vorgaben der entsprechenden Konventionen und den aktuellen Regelwerken: IPCC 2006: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>, IPCC 2019: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html>, EMEP 2023: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/emep-eea-guidebook-2023>

Bei der Berechnung folgt das Modell dem Massefluss durch das System Landwirtschaft: Vom Energiebedarf der Nutztiere über die Futteraufnahme, die Ausscheidungen im Stall, die Lagerung des Wirtschaftsdüngers, sowie die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern, Gärresten und Mineraldüngern.

Methodischer/mathematischer Ansatz

Siehe Nationales Inventardokument, Kapitel 5.1.2 (National Inventory Document <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2024>). Für ausführliche Beschreibung, siehe Methodenwiki (<https://git-dmz.thuenen.de/vos/emissionsagriculture2025/-/wikis/home>, verfügbar ab 15.03.2025).

Die Berechnung der Emissionen folgt dem Massefluss durch das System Landwirtschaft, wobei bei jedem Zwischenschritt Emissionen entstehen.

OpenSource

Das Modell ist bisher nicht Open Source. Es wären einige Vorarbeiten notwendig, um das Modell Open Source zu stellen. Dazu gehört die Bereitstellung einer Datenbank mit Input-Daten, die Sicherstellung von IT-Sicherheit (z. B. Prävention von SQL-Injection-Angriffen) und die Überarbeitung der Code-Dokumentation, um sie allgemeinverständlicher zu machen. Bisher

standen dazu keine ausreichenden Ressourcen zur Verfügung. Des Weiteren sind einige der bisherigen Eingangsdaten vertraulich.

Parameter

Parameter werden generell konform zu den IPCC Guidelines gewählt (IPCC, 2006c, 2019). In einigen Fällen wurden Parameter in wissenschaftlichen Studien abgeleitet. Eine Dokumentation aller verwendeten Parameter findet sich im Methodenwiki (<https://git-dmz.thuenen.de/vos/emissionsagriculture2025/-/wikis/home>).

Programmiersprache

Python

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

Das Modell Py-GAS-EM deckt den CRT Sektor 3 Landwirtschaft ab. Die Teilmodule entsprechen den CRT Kategorien 3A = Emissionen aus enterischer Fermentation, 3B = Emissionen aus dem Wirtschaftsdüngermanagement, 3D = Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Böden. Schnittstellen zu anderen Modellen sind die Aktivitätsdaten aus der Abfallmodellierung (Kompostmengen, die auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht werden) sowie die Nutzung organischer Böden aus dem LULUCF-Sektor.

Datenimport und -export ist über eine Schnittstelle zu einer PostgreSQL-Datenbank implementiert.

Räumliche Auflösung

Das Modell rechnet räumlich auf der Ebene von Landkreisen.

Sektoren

Es wird ausschließlich der Landwirtschafts-Sektor (CRT 3) modelliert.

Software

- ▶ Programmierumgebung: VS Code
- ▶ Versionskontrolle: GitLab
- ▶ Datenbank: PostgreSQL und pgadmin
- ▶ Zusammenstellung und Ausgabe von Ergebnissen: Microsoft Excel

Techniken

Es wird der gesamte Landwirtschafts-Sektor (CRT 3) modelliert, mit Ausnahme von: Lachgasemissionen aus Mineralisierung von SOC in landwirtschaftlichen Böden (CRT 3.D.a.5, CRT 3.D.a.6, Teil von CRT 3.D.b.2), diese werden von LULUCFmod modelliert und an Py-GAS-EM übergeben.

Treibhausgasemissionen

CO₂, CH₄, N₂O

Unsicherheit

Unsicherheiten entstehen strukturell durch die Modellansätze, durch die Eingangsdaten zur Tierhaltung und Flächennutzung, durch Inter- und Extrapolation, durch die Unsicherheit der Eingangsdaten zur Emissionsberechnung (z. B. Emissionsfaktoren). Das Modell hat bisher aus Performancegründen noch keine eigene Unsicherheitsberechnung implementiert.

Unsicherheiten werden für die Treibhausgasberichterstattung durch die vereinfachten IPCC-Ansätze fortgeplant.

Wesentliche endogene und exogene Strukturen/Variablen

Exogene Variablen:

- ▶ Tierzahlen Nutztiere
- ▶ Leistung Nutztiere
- ▶ Haltungsverfahren Nutztiere
- ▶ Lagerungsverfahren Wirtschaftsdünger
- ▶ Ausbringungsverfahren Wirtschaftsdünger
- ▶ Anbauflächen
- ▶ Mineraldüngerverkäufe
- ▶ Emissionsfaktoren (teilweise)

Endogene Variablen:

- ▶ Energiebedarf Nutztiere
- ▶ Futteraufnahme Nutztiere
- ▶ N-Ausscheidung Nutztiere
- ▶ Treibhausgasemission
- ▶ Luftschadstoffemission
- ▶ Emissionsfaktoren (teilweise)

Wesentliche Konzepte und Annahmen

Die Landwirtschaftlichen Subsysteme umfassen:

- ▶ Subsystem „Boden/Pflanze“: Primärproduktion;
- ▶ Subsystem „Tier“: Stoffwechsel-Vorgänge im Tier;
- ▶ Subsystem „Wirtschaftsdünger-Management“: Stallungen, Lagerung von Wirtschaftsdüngern und deren Aufbereitung (z. B. Biogas-Anlagen);
- ▶ Subsysteme „Oberflächen und Grundwässer“ sowie landwirtschaftlich beeinflusste Subsysteme „natürliche und naturnahe Flächen“.

Flüsse von Futtermitteln zwischen dem Subsystem „Boden/Pflanze“ und dem Subsystem „Tiere“ werden im Modell nicht explizit berechnet; bei der Tierfütterung wird davon ausgegangen, dass die erforderlichen Futtermengen vorhanden sind.

Einstreu wird als Stroh angesehen; die im Subsystem „Tiere“ durch Einstreu eingebrachten N-Mengen werden im Subsystem Boden/Pflanze abgezogen. N-Einträge auf und in Böden führen zu N-Flüssen in nicht-landwirtschaftliche Systeme: Oberflächenabfluss in Oberflächenwässer und durch Auswaschung in Oberflächen- und Grundwässer. Sie verursachen dort z. B. die Bildung von N₂O. Die Konventionen ordnen diese indirekten Emissionen der Landwirtschaft als

Quelle zu. Die Emissionen reaktiver N-Verbindungen (NH₃, NO) werden über die Luft verfrachtet, deponiert und greifen dort in die N-Dynamik der Böden ein. Sie führen dort schließlich zur Bildung von N₂O. Auch diese indirekten N₂O-Emissionen werden der Quelle „Landwirtschaft“ zugeordnet.

3.15 TEMPS

Name

Transport Emissions and Policy Scenarios

Version des Modells

PB25_1.43 - das Modell wird eigens für den Projektionsbericht jährlich weiterentwickelt, die Versionierung beginnt für jeden Bericht neu.

Betreibende Organisation

Öko-Institut e.V.

Zweck des Modells

- ▶ Das am Öko-Institut entwickelte Modell TEMPS (Transport Emissions and Policy Scenarios) ermöglicht es, den Endenergiebedarf und die (Treibhausgas-) Emissionen des Verkehrs für unterschiedliche Szenarien auf nationaler Ebene zu quantifizieren und einzelne Politikinstrumente zu bewerten. Das Modell hat seinen Ursprung in der Politikberatung und besteht aus den drei Komponenten Verkehrsnachfrage, Neuzulassungsmodellierung und Bestand, Energie- und Treibhausgasbilanz. Somit lassen sich Projektionen für die zukünftige Entwicklung von u. a. Fahrzeugflotte, Energieverbrauch und Emissionen abbilden.
- ▶ Das Modell betrachtet die Verkehrsemissionen in Deutschland nach Sektordefinition des Klimaschutzgesetzes sowie bei Bedarf ausgehende internationale Verkehre.
- ▶ Berücksichtigt wird die Verkehrsleistung nach dem Inlandsprinzip, der Fahrzeugbestand nach dem Inländerprinzip.
- ▶ Mithilfe von TEMPS lässt sich die Wirkung von sowohl ökonomischen Politikinstrumenten als auch von Ordnungsrecht abbilden. Darüber hinaus werden nationale und globale technologische Trends berücksichtigt. Beispielsweise die Entwicklung von Technologiekosten, wie die der Fahrzeuge oder der Batterien.
- ▶ Beispiele an konkreten Forschungsfragen:
 - Wie ist die Wirkung von Politikinstrumenten auf die Flottenzusammensetzung, den Energiebedarf und die THG-Emissionen?
 - Wie ist die Wirkung von technologischen Trends/ Pfaden auf die Flottenzusammensetzung, den Energiebedarf und die Emissionen?
 - Wie groß ist die Erfüllungslücke bei den THG-Emissionen bezogen auf das Klimaschutzgesetz beim aktuellen Umsetzungsstand der Klimapolitik?
 - Welche Instrumente führen zur Einhaltung des Sektorziels im Verkehr?
 - Zusätzlich können über nachgelagerte Berechnungen und Modellkopplungen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:
 - Wie groß ist der Bedarf an Ladeinfrastruktur für Nutzfahrzeuge?

- Wie groß sind Investitionen im Verkehrssektor bzw. was sind die volkswirtschaftlichen Auswirkungen der Szenarien?
- Verteilungswirkungen: Wen treffen die Kosten für die Transformation?
- Welchen Effekt haben Flexibilitätspotenziale der Elektromobilität auf den Strommarkt? (Kopplung mit dem Modell Powerflex, s. Abschnitt 3.12)

Akteure

Die Kaufentscheidung wird für einzelne Akteure anhand von rund 2400 Nutzerprofilen simuliert. Die Profile basieren für Pkw auf Analysen von den Studien Mobilität in Deutschland (MiD) und Deutsches Mobilitätspanel (MOP) und sind nach Haltergruppe (kommerzielle Halter, private Halter und Carsharing-Dienstleister), Fahrleistung (numerischer Wert aus entsprechenden MOP/MiD-Profilen), Regionstyp (urban, suburban, ländlich) und Fahrzeuggrößenklasse (klein, mittel, groß) differenziert. Für Lkw sind zudem Reichweitenanforderungen bzw. durchschnittliche Wegelängen auf Basis der Studie Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland (KiD) durch Profildifferenzierung hinterlegt. Die Modellierung des Verhaltens der Akteure beruht auf der Annahme, dass die Nutzenden sich in Zukunft so verhalten, wie die dem Modell zugrunde liegenden Daten es vorhersagen. Dabei werden Trends, welche eine Verhaltensänderung erkennen lassen, fortgeschrieben (bspw. bei der Popularität von E-Fahrzeugen). Es ist möglich, „perfect foresight“ im Modell anzunehmen, aufgrund realer Entwicklungen wird dies in den Szenarien im Normalfall nicht angewendet (so auch im Projektionsbericht).

Dokumentation

Unter folgendem Link ist eine ausführliche Dokumentation des Modells verfügbar. Es gibt bisher keine Artikel, in denen das Modell explizit kritisch geprüft bzw. validiert wird, da das Modell bisher nur für die Auftragsforschung entwickelt und angewendet wurde (z B. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/StratES-Szenarien-Elektrifizierung-Strassengueterverkehr.pdf>).

Räumliche Abdeckung

- ▶ Alle Szenarien beziehen sich primär auf die nationale Ebene (Deutschland). Berücksichtigt wird dabei die Verkehrsleistung nach dem Inlandsprinzip sowie der Fahrzeugbestand nach dem Inländerprinzip.
- ▶ Internationale Verkehre, ausgehend von Deutschland, werden im Projektionsbericht ebenfalls abgebildet (Personenflugverkehr, Güterflugverkehr, Güterseeverkehr) und nachrichtlich ausgewiesen.

Zeithorizont

- ▶ Das Modell TEMPS rechnet jahresscharf bis zum Jahr 2050.
- ▶ Startzeitpunkt der Modellierung ist typischerweise das jeweils aktuelle Jahr. Die Kalibrierung des Modells erfolgt auf das Jahr mit einem vollständigen Datensatz (Energiebilanz, Zulassungsdaten, Verkehrsnachfrage, u. a.). Dies ist zumeist das vorausgehende Jahr. Der Endpunkt der Modellierung kann flexibel angepasst werden.
- ▶ Im Projektionsbericht 2025 wird auf das Jahr 2023/2024 kalibriert und bis 2050 gerechnet.

Zeitliche Auflösung

Das Modell rechnet in ganzen Jahresschritten.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

Mit dem Modell TEMPS lassen sich relevante Politikinstrumente im Verkehrssektor abbilden. Dazu gehören: ökonomische Instrumente (bspw. Steuererhöhungen, Kaufprämien, Pkw-Maut), Ordnungsrechtinstrumente (bspw. Tempolimit, EU-CO₂-Flottenzielwerte) sowie Infrastrukturmaßnahmen (bspw. Deutschlandtakt, Radverkehrsförderung). Wechselwirkungen werden modellendogen berücksichtigt, da alle Instrumente gleichzeitig auf Kosten, Verhalten und Kaufentscheidung der Nutzer*innen wirken.

Methodischer/mathematischer Ansatz

TEMPS ist ein Simulationsmodell, welches die Neuzulassungs- und Bestandsstruktur bottom-up auf Basis des ökonomischen Ansatzes der Total Costs of Ownership (TCO) in Kombination mit einem statistischen Logit-Modell berechnet. Anhand von Ist-Daten (z. B. Monitoring-Daten der EU) werden die Logit-Faktoren kalibriert und somit die Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeit von Pkw- Antrieben um nicht-ökonomische Faktoren ergänzt. Die Gesamtfahrleistung und der Gesamtenergiebedarf werden ebenfalls an Ist-Daten (AG Energiebilanzen, Verkehr in Zahlen, etc.) kalibriert. Eine detaillierte Beschreibung von TCO- und Logit-Modell inklusive mathematischer Gleichungen findet sich in der Modelldokumentation Kapitel 4.1 und 4.2.

OpenSource

TEMPS ist eine proprietäre Eigenentwicklung des Öko-Instituts und derzeit nicht offen lizenziert. Eine schrittweise Öffnung befindet sich in Planung. Das Öko-Institut unterstützt und fördert zudem die Prinzipien von Open Data und Open Modelling.

Parameter

Um Prognosen und Werte zwischen Stützjahren abzuschätzen, werden Interpolationsverfahren genutzt. Für die Berechnung der Neuzulassungen wird ein Logit-Modell angewendet.

Programmiersprache

Python

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

Das Modell besteht aus einem Neuzulassungsmodul, einem Bestandsmodul, einem Verkehrsnachfragemodul, einem Kraftstoffmodul sowie dem THG- und Endenergienachfragemodul. Die genannten Module sind direkt miteinander gekoppelt und werden in der Regel nacheinander ausgeführt. Eine detaillierte Beschreibung befindet sich in der Modelldokumentation Kapitel 4.1 bis 4.7. Es bestehen auch Abhängigkeiten, die Iterationsrechnungen notwendig machen, z. B. die Erfüllung der THG-Quote und deren Einfluss auf die Kilometerkosten. Darüber hinaus gibt es ein Investitionsmodul, ein Verteilungswirkungsmodul und ein Ladeinfrastrukturmodul, welche bei Bedarf im Anschluss an die Berechnung des Szenarios ausgeführt werden können. Die Kalibrierung an Ist-Daten (Abgleich von Modellergebnis mit real zu beobachtenden Entwicklungen) und das kontinuierliche Nachführen dieser Daten sobald verfügbar, stellt eine Kurzfristvalidierung der Modellierung sicher. TEMPS hat außerdem eine Schnittstelle zu PowerFlex (Öko-Institut, Abschnitt 3.12) und der Energiemodellierung ENUSEM (Öko-Institut, Abschnitt 3.3). Die Datenübergabe erfolgt mittels Excel-Dateien und csv-Dateien.

Räumliche Auflösung

Räumliche Variablen sind entlang der Verstädterungsgradkategorien (DEGURBA) von Eurostat in urban, suburban und ländlich unterteilt. Im Verlauf der Rechnungen werden Ergebnisse auf nationaler Ebene aggregiert.

Sektoren

TEMPS bildet die THG-Emissionen des nationalen Verkehrssektors nach Definition des Bundes-Klimaschutzgesetzes ab sowie die realen Emissionen.

Software

- ▶ Python
- ▶ Excel
- ▶ Git

Techniken

Das Modell bildet den Verkehrssektor mit den dazugehörigen Technologien ab. Dazu gehören öffentliche und private Kraftfahrzeuge sowie der Rad- und Fußverkehr. Teilweise können auch Aussagen über Verkehrsinfrastrukturen abgeleitet werden. Pkw werden nach den KBA-Segmenten in drei Kategorien (klein, mittel, groß) eingeteilt. Die Klassifizierung von Lkw sowie allen anderen Verkehrsmitteln (Rad, Fuß und öffentlicher Verkehr) erfolgt entlang der Einteilung im Modell TREMOD des Instituts Ifeu. Kosten und Entwicklung der Technologien sind in einer internen Technologiedatenbank hinterlegt (Entwicklung von Technologiekosten der Fahrzeuge und Komponenten sowie Effizienztechnologien). Diese ist derzeit nicht öffentlich zugänglich. Die zugrundeliegenden Quellen werden veröffentlicht (z. B. Primes/TREMOVE).

Treibhausgasemissionen

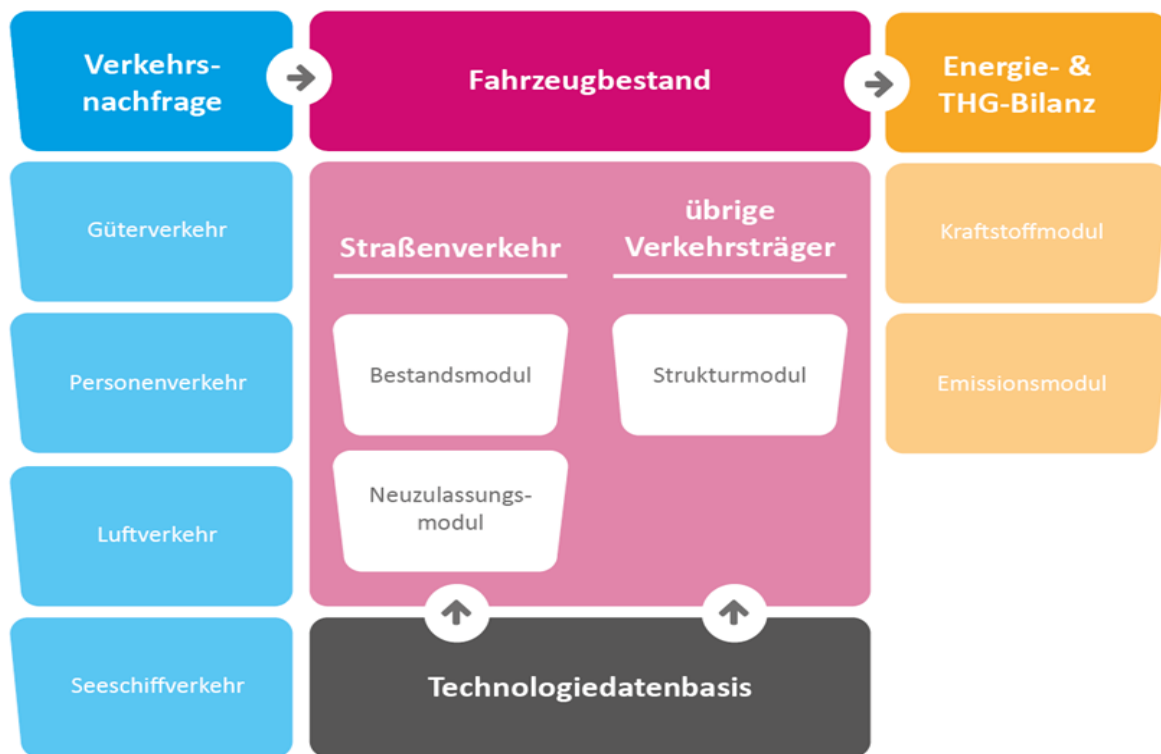
Das Modell bildet CO₂, N₂O, CH₄ sowie Nicht-CO₂-Effekte im Luftverkehr ab.

Unsicherheit

Unsicherheiten in der Modellierung können sich aus notwendigen Vereinfachungen der Wirkungsketten ergeben. Da die Komplexität eines Modells begrenzt ist aufgrund von Laufzeit und Kontrollierbarkeit, ergeben sich zwangsläufig Vereinfachungen der Wirkungsketten gegenüber der Realität. Hieraus ergeben sich nicht vermeidbare Unsicherheiten. Zudem begrenzt teilweise die Verfügbarkeit von Input-Daten die Genauigkeit der Ergebnisse. Für einige zentrale Parameter gibt es keine empirisch ableitbaren Daten (z. B. die zukünftige Akzeptanz von alternativen Antriebstechnologien oder Preiselastizitäten für sehr hohe Kraftstoffbesteuerung). Da hier mit Annahmen gearbeitet werden muss, entstehen Unsicherheiten. In TEMPS werden Unsicherheiten durch eine Kurzfristvalidierung des Modells, eine Kalibrierung an Ist-Daten sowie Sensitivitätsrechnungen minimiert.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 11: Visualisierung des TEMPS Modells und dessen Funktionsweisen



Quelle: Eigene Darstellung, Öko-Institut

Wesentliche Konzepte und Annahmen

► Neuzulassungsmodellierung:

- Die Neuzulassungsmodellierung basiert auf einem TCO-Modell (Total Costs of Ownership), in welchem die Kosten (Investitions- und Betriebskosten) über die gesamte Haltedauer für rund 2400 Nutzerprofile berechnet werden (siehe Modelldokumentation [TCO-Modell](#) und [Nutzerprofile](#)). Bei der Antriebswahl für Pkw werden darüber hinaus nicht-ökonomische Verhaltensweisen über ein kalibriertes Logit-Modell berücksichtigt, da die Realität zeigt, dass Fahrzeugkäufer den Antrieb nicht per se nach ökonomischen Kriterien wählen (siehe Modelldokumentation [Logit-Modell](#)). Zusätzlich zu ökonomischen Einflüssen können ordnungsrechtliche Instrumente die technologische Zusammensetzung der Neuzulassungen beeinflussen, insbesondere die EU-CO₂-Flottenzielwerte (Verordnung 2019/631 und 2019/1242). Die absolute Höhe des Pkw-Bestands fließt als Inputgröße in das Modell und wird anhand von Bevölkerungsprognosen jahresscharf fortgeschrieben. Der Fahrzeugbestand in TEMPS wird nach dem Inländerprinzip ausgewiesen, was bedeutet, dass nur in Deutschland gemeldete Fahrzeuge berücksichtigt werden.

► Verkehrsnachfrage

- Im Projektionsbericht 2025 wird die Verkehrsnachfrage und -verlagerung durch das Modell ASTRA-M modelliert. Hierzu wurde eine eigene Datenschnittstelle eingerichtet, um Änderungen der Kilometerkosten an ASTRA-M und die daraus resultierenden Effekte der Verkehrsnachfrage an TEMPS zu übergeben. Änderungen der Kilometerkosten im Szenario ergeben sich durch Politikinstrumente (z. B. Änderung der Besteuerung von

Kraftstoffen, Maut) sowie durch technologische Trends, wie Elektrifizierung (sinkende Kilometerkosten durch effizientere Antriebe). TEMPS verfügt ebenfalls über Methodiken zur Berechnung von Verkehrsverlagerung, -induktion und -vermeidung, welche in diesem Projekt jedoch nicht angewandt werden (Preis- und Kreuzpreiselastizitäten). Die Verkehrsnachfrage basiert grundsätzlich auf dem Inlandsprinzip - dies bedeutet, dass die innerhalb der geografischen Grenzen Deutschlands erbrachte Verkehrsleistung berücksichtigt wird, unabhängig von der Nationalität der Fahrzeuge.

► Ladeinfrastruktur

- Informationen über Fahrtenketten und Fahrtenweiten ermöglichen die modellendogene Kopplung von Infrastruktur und Nutzung der Fahrzeuge (siehe Modelldokumentation Energieinfrastruktur). Zur Modellierung müssen jedoch Annahmen zum Infrastrukturoberlauf getroffen werden. Es wird davon ausgegangen, dass die Elektrifizierung der Pkw-Flotte zu einem bedarfsgerechten Ausbau der Ladeinfrastruktur führt, da hier neue Märkte erschlossen werden können. Für Lkw wird ein Oberlauf bis 2040 angenommen.

► Endenergie und THG-Emissionen

- Die Berechnung des Endenergieverbrauchs erfolgt entlang des spezifischen Verbrauchs der Fahrzeuge der Bestandsflotte und umfasst die tatsächlich eingesetzte Energie ohne Berücksichtigung von Umwandlungs- oder Übertragungsverlusten, die bei der Erzeugung und Verteilung der Energie bis zur Tankstelle auftreten. Ladeverluste von Batteriefahrzeugen werden berücksichtigt. Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen werden Emissionsfaktoren auf Basis des Energieinventars der AG Energiebilanzen genutzt. Neben CO₂-Emissionen werden Lachgas- und Methanemissionen berechnet. Zudem werden für den Straßenverkehr auch Luftschadstoffemissionen nach HBEFA ermittelt.

Wesentliche endogene/exogene Strukturen/Variablen

► Endogene Strukturen:

- Kaufentscheidung
- Neuzulassungsstruktur
- Bestandszusammensetzung
- Energie- und THG-Emissionen

► Endogene Variablen (u. a.):

- Anzahl der Fahrzeuge (Neuzulassungen und Bestand) nach Antrieben
- Verkehrsleistung nach Verlagerungen (für alle Verkehrsträger) in pkm/tkm
- Effizienz und spezifischer Energieverbrauch von Straßenfahrzeugen in MJ/km
- THG-Emissionen in t CO₂-Äquivalenten
- Gesamtinvestitions- und Nutzungskosten in €2010
- Endenergieverbrauch in MJ

► Exogene Variablen:

- Bevölkerungsentwicklung
- Energieverbrauch anderer Verkehrsträger (ÖPNV, Schiene, Schiff, Flugzeug)
- Emissionsfaktoren
- Schienenkapazität
- Ladeinfrastruktur
- Referenzverkehrsnachfrage
- Nutzerprofile
- Kraftstoffkosten
- Fahrzeugpreise / Betriebskosten

3.16 VIEW

Name

Weltwirtschaftsmodell VIEW

Version des Modells

Keine Differenzierung nach Versionen

Betreibende Organisation

Prognos AG

Zweck des Modells

- ▶ Modellierung gesamtwirtschaftlicher und branchenspezifischer Dynamiken in Deutschland (u. a. Bruttoinlandsprodukt, Verwendungskomponenten, Bruttowertschöpfung und Produktionswert nach Wirtschaftsbereichen)
- ▶ Erstellung von Projektionen und Szenarien, in welchen Schocks implementiert und ihre Konsequenzen abgebildet werden
- ▶ Es können alle im Modell enthaltenen endogen berechneten Variablen – sofern diese nicht durch definitorische Zusammenhänge resultieren – mit einem Schock versehen werden. Mikroökonomische Schocks können nicht implementiert werden.
- ▶ Modelloutput: ökonomische Zeitreihen (u. a. Bruttoinlandsprodukt, Verwendungskomponenten, Bruttowertschöpfung und Produktionswert nach Wirtschaftsbereichen)

Akteure

Das Modell bildet die Sektoren der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung (nichtfinanzielle Kapitalgesellschaften nach 72 Wirtschaftsbereichen, private Haushalte, Staat) für Deutschland ab.

Dokumentation

- ▶ Für das Weltwirtschaftsmodell VIEW siehe <https://www.prognos.com/de/view>
- ▶ Für das hier verwendete Satellitenmodell liegt keine ausführliche Modelldokumentation vor.

Räumliche Abdeckung

- Für das Weltwirtschaftsmodell VIEW: 37 Nationalstaaten (EU27, weitere Industrieländer, wichtigste Schwellenländer), 88 weitere Länder in einem Satellitenmodul. Details zu in VIEW enthaltenen Ländern siehe Tabelle 1 in Prognos (o.J.).
https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-07/VIEW_Factsheet_2021.pdf

- Für das für den Projektionsbericht verwendete Satellitenmodell: Deutschland

Zeithorizont

Simulationszeitraum bis 2060

Zeitliche Auflösung

Jährlich

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

- VIEW ist das Weltwirtschaftsmodell der Prognos AG, welches die gesamtwirtschaftliche Entwicklung von insgesamt 125 Ländern im Simulationszeitraum jährlich fortschreibt (aktuell bis 2060). Über Handelsbeziehungen und Preisrelationen erfolgt eine Interaktion der Länder untereinander. Die Wertschöpfung und die Zahl der Erwerbstätigen der Wirtschaftsbereiche werden in nachgelagerten Satellitenmodellen in Abhängigkeit von der durch VIEW vorgegebenen gesamtwirtschaftlichen Dynamik bestimmt.
- Das Satellitenmodell der Wirtschaftsbereiche für Deutschland kann in einen eigenständigen Modus gesetzt werden: Das Modell bildet in diesem Fall den kompletten volkswirtschaftlichen Kreislauf aus Entstehung, Verteilung und Verwendung des Bruttoinlandsprodukts selbstständig ab. Die Importnachfrage und Preise der übrigen Welt sind im eigenständigen Modus exogene Größen, welche vorab im VIEW-Modell bestimmt werden.
- Kern des Satellitenmodells ist eine nach 72 Produktionsbereichen differenzierte Input-Output-Tabelle, wie sie für das Stützjahr (hier: 2021) durch das Statistische Bundesamt bereitgestellt wird. Alle im Modell abgebildeten Größen entsprechen im Stützzeitraum (1995 bis 2023) den entsprechenden Werten der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung des Statistischen Bundesamtes. Im Simulationszeitraum werden sowohl die Struktur als auch die Aggregate der Input-Output-Tabelle jahresweise dynamisiert.
- Das Modell wird für die Erstellung der ökonomischen Rahmendaten des Projektionsberichts eingesetzt, da es die Statistik bis zum aktuellen Rand berücksichtigt, die für die energiewirtschaftlichen Sektormodelle relevanten Rahmendaten in einer hohen Branchenauflösung bereitstellt und es zudem mit vergleichsweise wenig Aufwand die kurzfristige konjunkturelle Entwicklung (2024 bis 2026) gemäß der Herbstprojektion der Bundesregierung nachzeichnen kann.
- Zentrale ökonomische Größen wie die Lohn- und Preisdynamik, der technische Fortschritt, der Außenhandel sowie die Nachfrage nach Arbeit und Investitionsgütern werden auf der Ebene der 72 Produktionsbereiche modelliert. Im einzelnen gestalten sich die funktionalen Zusammenhänge wie nachfolgend beschrieben.
- Bei einer exogen gegebenen Bevölkerung im erwerbsfähigen Alter werden im Modell die Erwerbsquoten nach Geschlecht und Altersgruppen differenziert gemäß den historischen Trends sowie den Knappheitsverhältnissen am Arbeitsmarkt entsprechend fortgeschrieben. Demographisch bedingte Rückgänge der Erwerbstätigen in den Produktionsbereichen

versuchen die Unternehmen mittels Neueinstellungen aus dem Pool der Erwerbslosen zu kompensieren. Über- und Unterauslastungen hinsichtlich der branchenspezifischen Normalarbeitszeit gleichen die Unternehmen auf der Basis eines Fehlerkorrekturterms sukzessive durch eine entsprechende Anpassung der Erwerbstätigen aus. Geplante Neueinstellungen realisieren sich umso weniger, je mehr sich die gesamtwirtschaftliche Erwerbslosenquote einem exogen gegebenen Mindestwert annähert (3 %).

Nachfrageschocks wirken sich in der Konsequenz primär auf die Arbeitszeit aus, und die Anpassung der Erwerbstätigen folgt verzögert.

- ▶ Der technische Fortschritt ist im Modell kapitalgebunden: neue Investitionsgüter weisen eine höhere Kapitalproduktivität (Wertschöpfung je Kapitalstock) und ein höheres Faktoreinsatzverhältnis (Kapitalstock je Erwerbstätigen) auf als der jeweilige Bestand einer Branche. In Abhängigkeit von der Erneuerungsrate des Kapitalstocks erhöht sich entsprechend die branchenspezifische Arbeitsproduktivität (Wertschöpfung je Arbeitsstunde). Für die technische Fortschrittsrate der neuen Investitionsgüter gehen wir von einem internationalen Konvergenzprozess aus: technisch zurückliegende Länder respektive Branchen weisen hier höhere Zuwachsraten auf, und der vermehrte Import von Investitionsgütern aus technisch führenden Ländern beschleunigt den technischen Fortschritt in dem betreffenden Land bzw. Wirtschaftsbereich zusätzlich. Gemäß dem technisch determinierten Faktoreinsatzverhältnis wird der Kapitalstock an den neuen Beschäftigtenstand über eine entsprechende Investitionsnachfrage angepasst. Eine demographisch bedingte Limitierung der angestrebten Beschäftigungsausweitung dämpft damit auch die Investitionstätigkeit der Unternehmen.
- ▶ Die von der Verwendungsseite ausgehenden und über die Input-Output-Tabelle vermittelten Produktionserfordernisse an die jeweiligen Wirtschaftsbereiche werden im Modell limitiert, wenn bei einem kurzfristig gegebenen Stand der Technik und der Arbeitskräfte die Produktionskapazitäten überfordert werden. Zudem erhöhen sich in diesem Fall die Importquoten zugunsten anderer Länder respektive Branchen umso stärker, je niedriger für diese Branchen das Produkt aus Preis und Auslastung ausfällt.
- ▶ Die nominalen Stundenlöhne und die Preise werden branchenspezifisch am Anfang einer Periode (i. e. eines Jahres) festgelegt. Für den Ausgang der impliziten Lohnverhandlungen sind die historischen Produktivitätsfortschritte, die erwartete Inflationsrate und die Knappheit des Arbeitsangebotes maßgeblich. Die Firmen geben Kostenimpulse verzögert an ihre Preise weiter, und ein Fehlerkorrekturterm in der Preisfunktion sorgt für die trendmäßige Übereinstimmung zwischen dem realisierten und dem durch die Unternehmen angestrebten Gewinnaufschlag auf die durchschnittlichen Produktionskosten (mark-up).
- ▶ Lohneinkommen fließen direkt an die privaten Haushalte. Die residual bestimmten Bruttobetriebsüberschüsse des Unternehmenssektors werden anteilig an die privaten Haushalte ausgeschüttet. Letztere streben eine exogen gegebene Relation zwischen ihrem Vermögensbestand und ihrem erwarteten trendmäßigen Einkommen an (Buffer-stock-Regel). Für die Erreichung ihres gewünschten Vermögensbestands teilen sie ihr Einkommen entsprechend in Konsumausgaben und Sparen auf. Die Konsumausgaben des Staates werden in Abhängigkeit von der Zahl seiner Beschäftigten und ihres Stundenlohnes auf der Verwendungsseite bestimmt.
- ▶ Preis- und Kostenrelationen, historische Trends und exogene Setzungen beeinflussen neben der Auslastung der Produktionskapazitäten die Entwicklung der Nachfrage- und Produktionsstrukturen in der Input-Output-Tabelle.

Methodischer/mathematischer Ansatz

VIEW ist ein dynamisches Input-Output-Modell.

OpenSource

Die Prognos AG finanziert sich vollständig über Projekte (keine Fremdfinanzierung). Das Modell wurde in Eigenleistung erstellt und ist Firmeneigentum. Geteilt werden Annahmen, Inputs und Ergebnisse, jedoch nicht der Modellcode.

Parameter

Eigene Regressionsschätzungen, Literatur (u. a. Ahmad & Riker, 2020), exogene Setzungen

Programmiersprache

VBA, Eviews

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

Die Daten des Stützzeitraums werden in Excel auf- und vorbereitet und im Simulationszeitraum mittels VBA-Codes dynamisiert.

Räumliche Auflösung

Deutschland, übrige Welt exogen gegeben durch VIEW-Modell

Software

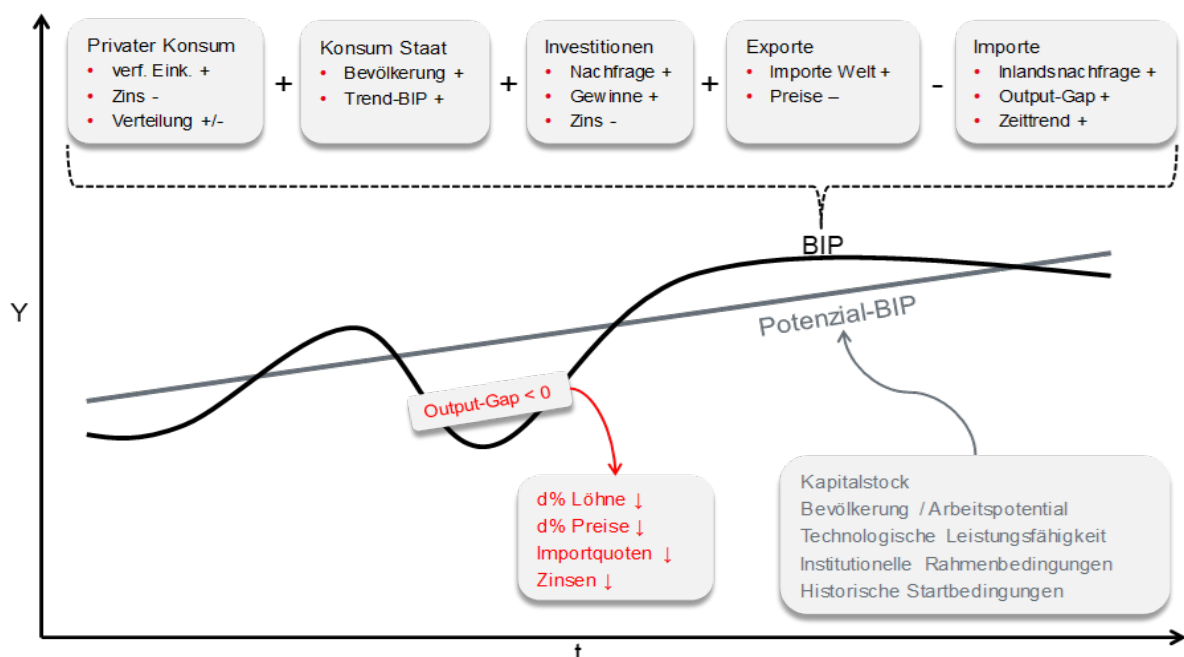
Excel, Eviews (ökonometrische Spezialsoftware)

Unsicherheit

Das Modell wird deterministisch gelöst.

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Abbildung 12: Visualisierung des VIEW Modells und dessen Funktionsweisen



Quelle: Eigene Darstellung, Prognos

3.17 Winfra

Name

Wärme-Infrastrukturmodell

Version des Modells

Aktuelle Version aus dem Jahr 2024

Betreibende Organisation

Prognos AG

Zweck des Modells

- ▶ Zweck des Winfra-Modells besteht darin bottom-up:
 - räumliche Wärmebedarfe [A] zu analysieren,
 - erneuerbare Potenziale zu identifizieren,
 - deren Einbindung zu simulieren und
 - den notwendigen Ausbau von Wärmenetzen auf kommunaler und Landesebene zu simulieren.
- ▶ Das Wärmeinfrastrukturmodell berücksichtigt räumlich hochaufgelöste Wärmebedarfe (GIS) in den Sektoren private Haushalte, GHD, Industrie und öffentliche Liegenschaften.
- ▶ Daneben werden Erneuerbare und Abwärmepotenziale berücksichtigt.
- ▶ Das Modell kombiniert die Potenziale mit den Bedarfen und identifiziert so darauf aufbauend Wärmeversorgungsmöglichkeiten, um Wärmeversorgungsszenarien ableiten zu können [B].
- ▶ Mögliche Outputs aus dem Modell sind:
 - Abbildung der Wärmedichte auf unterschiedliche Ebenen (Gemeinde, Kreis, Land, Bund etc.)
 - theoretisches Potential [C] einer erneuerbaren Wärmequelle auf unterschiedlichen Ebenen (Gemeinde, Kreis, Land, Bund etc.)
 - technisches Potential [D] einer erneuerbaren Wärmequelle unter Berücksichtigung deren Einbindung (Abdeckung einer räumlich nahen Wärmesenke)
 - Identifikation potenzieller Fernwärmegebiete
 - Erreichbarer EE-Anteil in der Fernwärme auf unterschiedlichen Ebenen (Gemeinde, Kreis, Land, Bund etc.)

Anmerkungen:

[A] Der Wärmebedarf bezeichnet die theoretisch erforderliche Energiemenge pro Jahr, um – in diesem Kontext – ein Gebäude auf eine festgelegte Raumtemperatur zu beheizen. Die Wärmenachfrage hingegen beschreibt die tatsächlich verbrauchte Energiemenge. In diesem Zusammenhang wird der Begriff Wärmebedarf verwendet, da die primäre Quelle diese Energiemenge liefert. Anschließend erfolgt eine Nachbearbeitung (Post-Processing), um den Wärmebedarf auf die tatsächlich nachgefragte Energiemenge umzurechnen (basierend auf

einem Top-Down-Ansatz, der überwiegend auf öffentlichen Statistiken, insbesondere der AGEB, beruht).

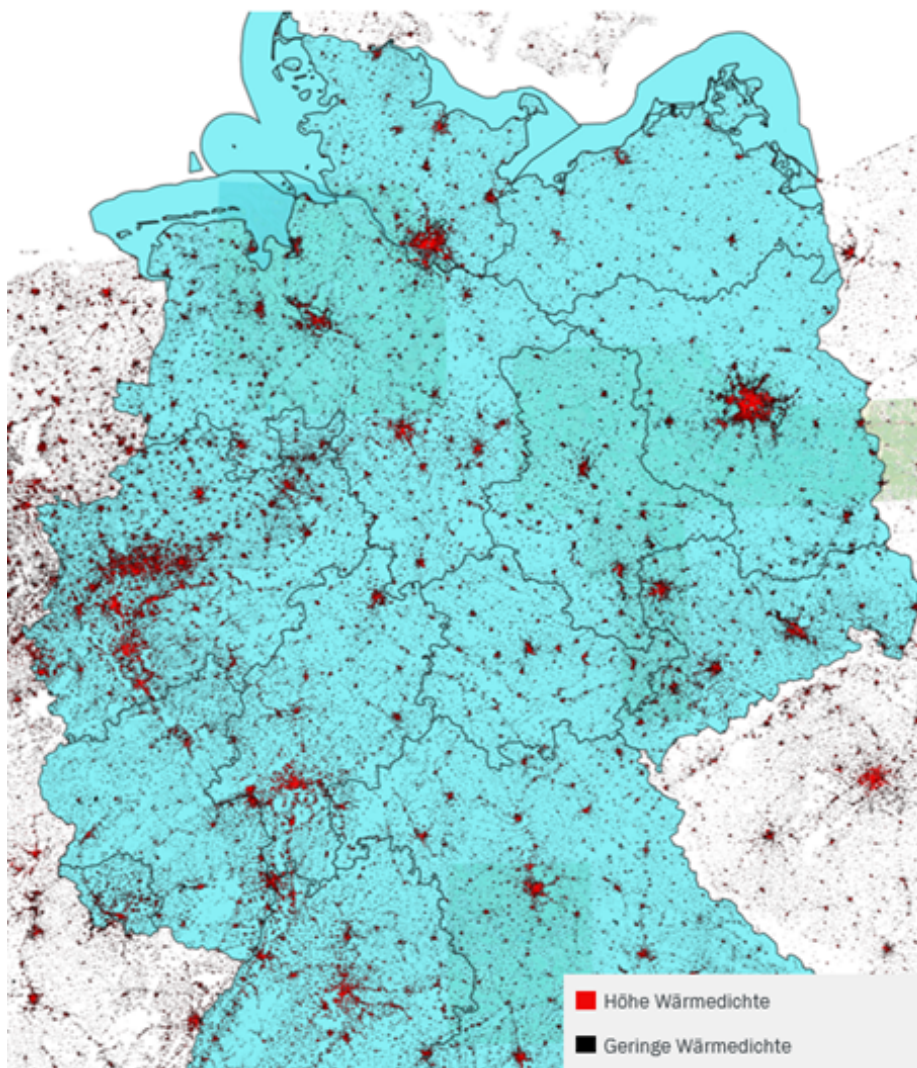
[B] Die Methodik basiert auf einer räumlichen Analyse, die nach dem Bottom-up-Ansatz durchgeführt wird. Ausgangspunkt ist die Gemeindeebene in Deutschland, auf der die vorhandenen Wärmebedarfe sowie die potenziellen erneuerbaren Energiequellen (EE-Quellen) ermittelt werden. Im ersten Schritt werden die Wärmebedarfe und die theoretischen EE-Potenziale für jede Gemeinde spezifisch identifiziert. Anschließend erfolgt eine detaillierte räumliche Analyse, bei der z. B. Abstandsanalysemethoden eingesetzt werden, um die theoretischen EE-Potenziale den jeweiligen Bedarfen zuzuordnen. Dadurch können technische Potenziale abgeleitet werden.

[C] Das theoretische Potenzial bezeichnet die gesamte von der Quelle zur Verfügung stehende Energiemenge, ohne dabei weitere Parameter zu berücksichtigen. Dazu gehören beispielsweise die Nähe zu Wärmesenken, die Höhe der benachbarten Wärmenachfrage, lokale Gegebenheiten, die die Nutzung der Quelle einschränken könnten, Wärmeverluste und andere relevante Faktoren.

[D] Das technische Potenzial gibt an, welche Energiemenge unter Berücksichtigung technischer und örtlicher Gegebenheiten tatsächlich zu den Wärmesenken geliefert werden kann.

Folgende Abbildung visualisiert hochaufgelöst Wärmebedarfe - dargestellt durch Rasterzellen mit einer Größe von 100m x 100m:

Abbildung 13: Räumliche Darstellung der Wärmebedarfe in Deutschland auf Basis eines 100 m × 100 m Rasters



Quelle: Eigene Darstellung, Prognos, erstellt in QGIS, auf Grundlage der Wärmebedarfsdaten von Hotmaps (Müller et al., 2019)

Dokumentation

- Es handelt sich um ein Modell der Prognos AG, dessen Dokumentation nicht öffentlich verfügbar ist.
- Nach unserem Wissensstand gibt es keine wissenschaftlichen Artikel, in denen das Modell kritisch geprüft bzw. validiert wurde. Dies dürfte darauf zurückzuführen sein, dass das Modell für die Auftragsforschung entwickelt wurde und bisher ausschließlich für diese genutzt wurde. Im Kontext der jeweiligen Projektarbeit wird das Modell regelmäßig überprüft.

Räumliche Abdeckung

Das Modell kann grundsätzlich für verschiedene geografische Abgrenzungen genutzt werden und ist für den Einsatz auf Ebene einzelner Bundesländer, Landkreise und Gemeinden geeignet.

Zeithorizont

Das Modell WInfra orientiert sich an der aktuellen Bestandssituation des Wärmebedarfs und berücksichtigt verschiedene Wärmeversorgungsoptionen auf Basis der verfügbaren Wärmepotenziale (die theoretisch vorhanden, aber technisch noch nicht erschlossen sind). Eine Betrachtung des Wärmebedarfs mit einem zukünftigen Zeithorizont liegt derzeit nicht vor.

Konzeptionelle Gestaltungsprinzipien

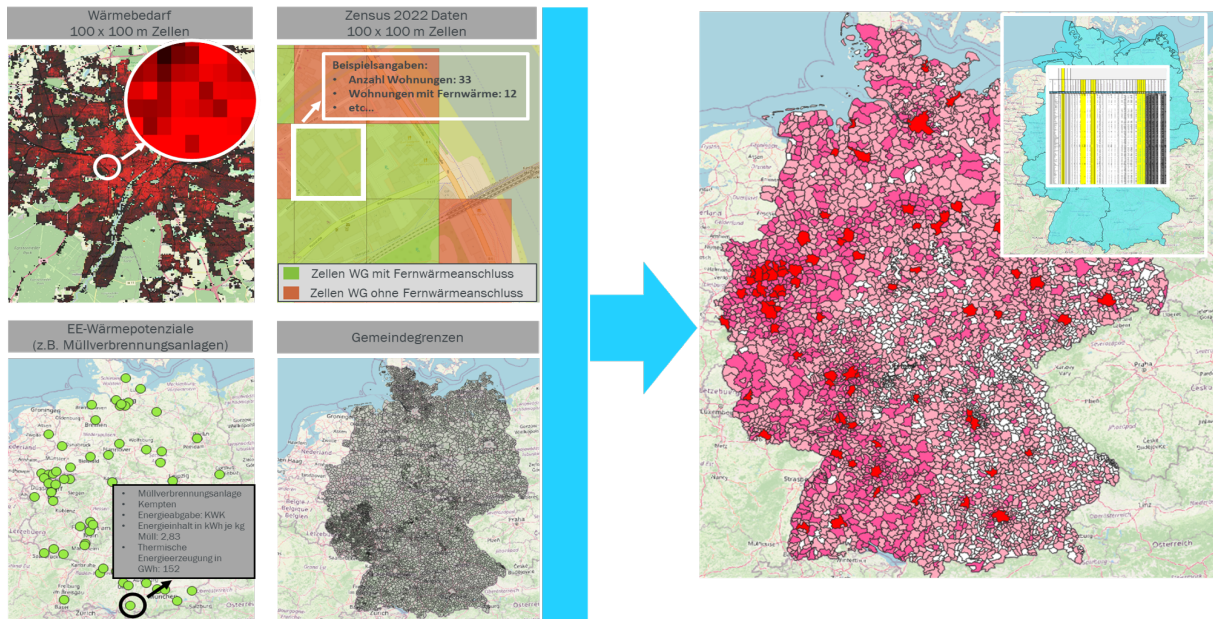
- ▶ Das Modell WInfra nutzt öffentlich verfügbare Daten zum Wärmebedarf (Müller et al., 2019; Statistisches Bundesamt [Destatis], 2025) und den Wärmepotenzialen (Flamme et al., 2018; Manz et al., 2023; Mueller, 2019; Ortner et al., 2021; sEEnergies Open Data, 2021) sowie aktuelle Informationen aus vorangegangenen Projektarbeiten (Ortner et al., 2021). Diese Daten werden mit GIS-Geometriedaten (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie [BKG], 2025) kombiniert, um eine GIS-Analyse zu ermöglichen. Auf diese Weise können Wärmebedarfe und -potenziale auf verschiedenen geografischen Ebenen (Gemeinde, Kreis, Land, Bund usw.) dargestellt werden.
- ▶ Bottom-up-Ansatz: Die Möglichkeiten der Wärmeversorgung aus Wärmepotenzialen werden in detaillierten räumlichen Kontexten mithilfe einer GIS-gestützten Analyse untersucht. Hierbei erfolgt eine räumliche Clusterung der Wärmebedarfsgebiete (z. B. auf Gemeindeebene) sowie eine Identifizierung und Zuordnung naheliegender Wärmepotenziale. Dann erfolgt ein Abgleich der Wärmemenge im Wärmebedarfsgebiet mit den nahegelegenen Wärmepotenzialen. Daraufhin erfolgt eine Zuweisung der Wärmepotenziale zur Deckung des Wärmebedarfs in dem identifizierten Gebiet.
- ▶ Hochrechnung auf der gewünschten Ebene: Hierbei wird ein iterativer Prozess angewendet, bei dem die GIS-Analyse für jedes Wärmeversorgungsgebiet durchgeführt wird. Ein solches Gebiet kann eine Stadt sein oder, für eine detailliertere Betrachtung, mehrere Wärmebedarfsgebiete innerhalb einer Stadt.
- ▶ Die Ergebnisse werden in verschiedenen Darstellungsformen (z. B. Karten und/oder Tabellen) präsentiert: hochauflösend oder aggregiert je nach gewünschter Ebene.

Methodischer/mathematischer Ansatz

- ▶ WInfra ist ein Bottom-up-Modell, das detaillierte räumliche GIS-basierte Analysen ermöglicht. Es arbeitet mit einer Bottom-up-Rechnung, die auf Rasterzellen im Hektarmaßstab von 100 m x 100 m und Punktdaten basiert. Diese feingranulare Analyse auf Zellebene erlaubt es, die Daten präzise zu aggregieren und anschließend auf höhere Verwaltungsebenen hochzurechnen. WInfra ist flexibel und skalierbar konzipiert, um sowohl lokale als auch regionale und nationale Analyseanforderungen abzudecken.
- ▶ Modellierung: Das Modell führt eine räumliche Analyse durch, indem es alle relevanten Datensätze verknüpft, um hochauflösende raumbezogene Fragen zu beantworten.
- ▶ Es fließen 4 Hauptdatenmodule im Modell ein:
 - Die Wärmebedarfe in einer räumlichen Auflösung von 100 x 100 m Zellen
 - Zensus-Daten in einer räumlichen Auflösung von 100 x 100 m Zellen
 - Wärmepotenziale in verschiedenen räumlichen Auflösungen: Punktdaten, 100 x 100 m Zellen, 1 km x 1 km, auf Gemeindeebene
 - Verwaltungsgrenzen: auf Gemeinde-, Kreis-, Landesebene

Folgende Abbildung zeigt die Inputdaten und Datenaggregation des WInfra Modells:

Abbildung 14: Übersicht der Inputdaten und der Datenaggregation im WInfra-Modell

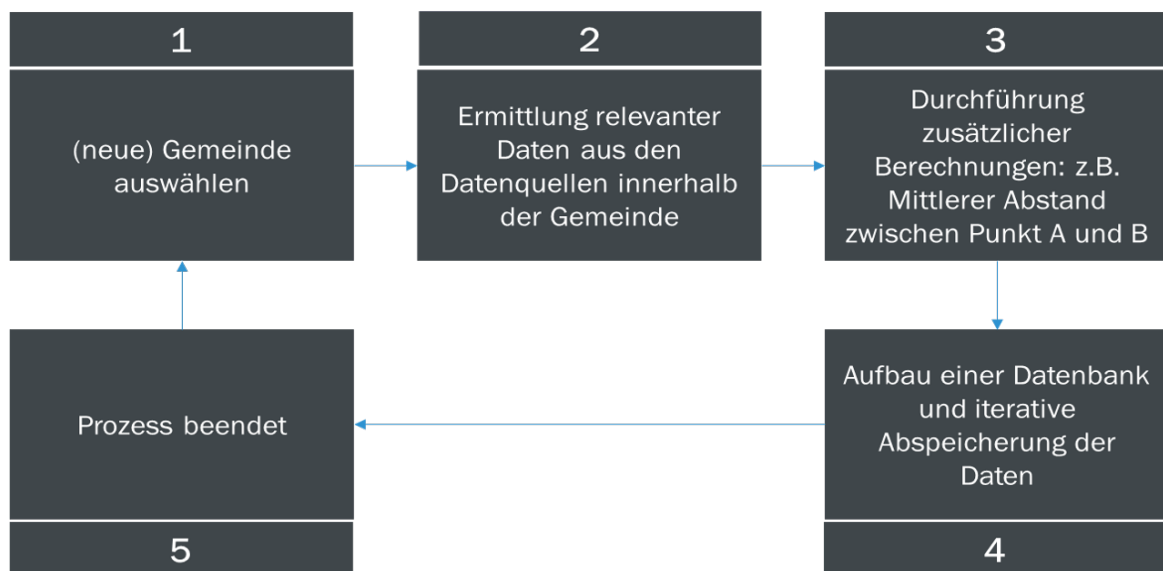


Quelle: Eigene Darstellung, Prognos, auf Basis von Müller et al. (2019), Destatis (2025), BKG (2025) und Flamme et al. (2018)

► Geographisch referenzierte Datensätze werden bearbeitet, um eine konsistente geografische Referenzierung sicherzustellen. Abhängig vom ausgewählten Detaillierungsgrad der Ergebnisse bildet die jeweilige administrative Grenze den Startpunkt für die Modellierung. Die Modellierung wird folgendermaßen abgewickelt, in Form eines zyklischen Prozesses:

1. In der ersten Phase wird eine (neue) Gemeinde ausgewählt.
2. Im nächsten Schritt der Iteration werden die relevanten Daten aus verschiedenen Datenquellen innerhalb der geografischen Grenzen der gewählten Gemeinde erfasst.
3. Anschließend werden zusätzliche Kalkulationen durchgeführt. Das können beispielsweise Berechnungen wie der durchschnittliche Abstand zwischen Punkt A und B sein.
4. Die so ermittelten Daten werden daraufhin in einer Datenbank strukturiert, die Schritt für Schritt mit den generierten Daten gefüllt wird.
5. Nach Abschluss der Datensammlung wird der Prozess beendet und für die nächste Gemeinde wieder von Neuem begonnen und so fortgesetzt, bis alle Gemeinden erfasst sind.

Folgende Abbildung beschreibt den Modellierungsprozess des WInfra Modells:

Abbildung 15: Modellierungsprozess in Wlnfra

Quelle: Eigene Darstellung, Prognos

- ▶ **Output/Ergebnisse:** Die resultierenden Daten werden als Excel-Datei bereitgestellt, welche die (Gemeinde-) Ergebnisse aufzeigt und spezifische Fragen beantwortet, wie z. B. „Wie hoch ist der Wärmebedarf in Wohn- und Nicht-Wohngebieten?“ oder „Welches Fernwärmepotenzial besteht für Wohnungen in Wohngebieten ohne Fernwärmeanschluss?“.
- ▶ **Post-Processing:** Im Post-Processing werden die Ergebnisse auf Deutschlandebene konsolidiert, um eine Gesamtansicht und Validierung zu ermöglichen. Eine Kalibrierung erfolgt fortlaufend auf Basis aktueller öffentlicher Daten und Veröffentlichungen (z. B. von AGEb). Zudem werden zusätzliche Analysen auf verschiedenen Ebenen durchgeführt.

OpenSource

- ▶ Es handelt sich um ein Modell der Prognos AG, das Modell ist nicht Open Source.
- ▶ Die Prognos AG finanziert sich zu 100 % über Projekte (keine Fremdfinanzierung). Das Modell wurde in Eigenleistung erstellt und ist Firmeneigentum.
- ▶ Geteilt werden Annahmen, Inputs und Ergebnisse, jedoch nicht der Modellcode.

Parameter

- ▶ **Wärmebedarfsdichte**
 - Räumliche Auflösung: 100m x 100m geografische Gitterzellen
 - Einheit: Wärmebedarf pro Hektar
- ▶ **Zensus 2022 Heizungsdaten mit einer räumlichen Auflösung von 100m x 100m geografischen Gitterzellen. Beinhalten Informationen über**
 - die Anzahl der Wohnungen bzw. Gebäude je nach Heizungsart je Gitterzelle
 - die Anzahl der Wohnungen bzw. Gebäude je nach Energieträger je Gitterzelle
 - die durchschnittliche Wohnfläche je Gitterzelle

- die durchschnittliche Eigentumsquote der Gebäude je Gitterzelle
- die Anzahl Gebäude je nach Baualtersklasse je Gitterzelle

► **Erneuerbare Wärmepotenziale**

- Freiflächen Solarthermie
 - Räumliche Auflösung: 100m x 100m geografische Gitterzellen
 - Einheit: Wärmepotenzial in MWh je Hektar
- Industrielle Abwärme auf Basis industrieller Standorte
 - Räumliche Auflösung: Punktdaten
 - Einheit: Abwärmepotenzial in MWh je Standort bzw. Punkt
- Müllverbrennungsanlagen:
 - Räumliche Auflösung: Punktdaten
 - Einheit: Thermische Energieerzeugung in MWh je Standort bzw. Punkt
- Geothermie:
 - Räumliche Auflösung: 1km x 1km Gitterzelle
 - Einheit: Wärmepotenzial in TWh je Gitterzelle
- Großwärmepumpen und weitere Potenziale
 - Räumliche Auflösung: Verwaltungsgemeinde (ca. 4.650 Verwaltungsgemeinden in Deutschland)
 - Einheit: Wärmepotenzial in MWh/GWh/TWh je Gemeinde

► **Geografische Verwaltungsgrenzen**

- Räumliche Gemeindegrenzen als Polygone
- Weitere räumliche Verwaltungsgrenzen (wie Kreisgrenzen und Bundesländergrenzen) als Polygone

Programmiersprache

Python

Programmtechnische Gestaltungsprinzipien

► Das Modell besteht aus 3 Hauptmodulen:

- Modul 1: Identifizierung des untersuchten Gebiets und Durchführung einer Wärmebedarfsanalyse [A], einschließlich einer räumlichen Unterteilung des identifizierten Gebiets in kleinere Clustergebiete [B]
- Modul 2: Durchführung einer GIS-Analyse zur Identifizierung der Wärmepotenziale unter Berücksichtigung räumlicher Bedingungen. In diesem Modul erfolgt - anhand einer räumlichen GIS-Analyse gekoppelt mit einer Bottom-up-Berechnung - auch der Abgleich

der Wärmebedarfe und -potenziale im identifizierten Gebiet sowie die quantitative Bestimmung der Möglichkeiten zur Wärmeversorgung.

- Modul 3: Hochrechnung auf der gewünschten Ebene, um die Ergebnisse entsprechend darzustellen

► Es erfolgt eine Visualisierung in Form von Karten auf der gewünschten Ebene.

Anmerkungen:

[A] Dies umfasst die Analyse auf Gemeindeebene, um Leitfragen zu beantworten: Wie hoch ist der Wärmebedarf pro Cluster (Gemeinde)? Wie sieht das aggregierte Bild für Deutschland aus? Wie verhält sich dies im Vergleich zu veröffentlichten Statistiken, wie beispielsweise denen der AGEb? Ist eine Nachbearbeitung und Kalibrierung erforderlich? Dabei erfolgt auch eine Verknüpfung mit den Zensusdaten 2022, um den Wärmebedarf in Wohngebieten mit dem in Wärmenetzgebieten zu vergleichen, und weitere ähnliche Fragestellungen zu klären.

[B] Zunächst wird allgemein betrachtet, welche Cluster erforderlich sind: Beispielsweise kann ein Cluster pro Gemeinde definiert werden, um den gesamten Wärmebedarf der jeweiligen Gemeinde abzubilden, oder Gebiete mit bestehenden Wärmenetzen können als eigenständiges Cluster betrachtet werden. Diese Clusterbildung wird anschließend programmatisch umgesetzt, und die Ergebnisse werden entsprechend in geeigneten Formaten wie Excel, Karten oder Tabellen erstellt.

Räumliche Auflösung

Das Modell verfügt über eine räumliche Auflösung, es bildet 100m x 100m Wärmebedarfsdaten ab. Zum Einsatz kam es auch bereits für einzelne Bundesländer, Kreise und Gemeinden.

Software

- Anaconda
- Spyder
- Excel
- QGIS

Unsicherheit

WInfra ist ein Modell zur Abbildung der Wärmeversorgungsmöglichkeiten nach Wärmebedarfsgebieten. Der Wärmebedarf wird anhand vorhandener Daten mit hoher Auflösung (100m x 100m) so genau wie möglich dargestellt. Zur Verbesserung der Genauigkeit können aktuelle öffentliche Energiebilanzen (Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen [AGEb], 2025) zur Kalibrierung verwendet werden.

3.18 WoodCarbonMonitor

Name

WoodCarbonMonitor

Version des Modells

Aktuelle Version aus dem Jahr 2024 (v2.0)

Betreibende Organisation

Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei; Thünen-Institut für Holzforschung

Zweck des Modells

Abschätzung biogener CO₂-Emissionen und ihrer Einbindung in den Kohlenstoffspeicher in Holzprodukten sowie Berechnung von THG-Emissionen, die mit der Nutzung von Holz als Energieträger und Rohstoff in verschiedenen Verwendungsbereichen (z. B. Gebäudesektor) verbunden sind.

Das Modell:

- berechnet die CO₂-Bilanz der Quellgruppe "Holzprodukte" für das deutsche Treibhausgasinventar (UNFCCC Decision 24/CP.19)
- schätzt im Rahmen nationaler und internationaler Projekte einen möglichen Beitrag der Verwendung von Holz zur Emissionsminderung ab (vgl. Rüter, 2023; Rüter et al., 2016)

Primäre Modellergebnisse sind

- CO₂-Emissionen und ihre Einbindung in CRF-Tabelle 4.Gs1

Dokumentation

Eine detaillierte Dokumentation ist in

<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1295127/1295127.pdf> (Rüter, 2017) enthalten. Weitere Informationen sind zu finden im Nationalen Inventardokument (UNFCCC, 2024).

Mit dem Berechnungsmodell WoodCarbonMonitor wurde bereits 2011 der Beitrag von Holzprodukten zum Referenzwert für die zweite Verpflichtungsperiode unter dem Kyoto-Protokoll auch für weitere EU-Mitgliedsstaaten ermittelt. Nach einem Abgleich mit nationalen Daten und z. T. vorhandenen Modellen verwendeten 16 weitere Länder die Daten zur Submission an das Klimasekretariat (Belgien, Bulgarien, Dänemark, Estland, Frankreich, Griechenland, Italien, Lettland, Litauen, Niederlande, Polen, Rumänien, Slowakei, Spanien, Tschechische Republik und Ungarn), wo sie in der Folge zusammen mit dem Modell und den zugrundeliegenden Annahmen von einem internationalen Expertenteam evaluiert wurden (vgl. Rüter, 2011 und UNFCCC, 2011).

Die Funktionsweise und Dokumentation des Modells lieferte eine wesentliche Grundlage für die Erstellung bzw. Aktualisierung der für diese Quellgruppe relevanten IPCC-Berichterstattungsrichtlinien (vgl. IPCC, 2019, Chapter 12 Harvested Wood Products, bzw. IPCC, 2014). Im Zusammenhang mit der Erstellung und Veröffentlichung dieser IPCC-Richtlinien durchliefen die im Modell hinterlegten Algorithmen und Parameter mehrere kritische Begutachtungsrunden (vgl. Kapitel 12.4.2 "Tier 1: 'first order decay' method" in IPCC, 2019, Chapter 12, bzw. Anhang in Rüter, 2017).

Im Rahmen der Evaluierung der Referenzwert-Projektionen der EU-Mitgliedsstaaten gemäß VO 2018/841 (Verordnung (EU) 2018/841, 2018) wurde das Modell 2019 wiederholt in Kombination mit dem Modell G4M der IIASA verwendet, um im Auftrag der EU-Kommission einen Abgleich der länderspezifischen Holzprodukte-Berechnungen inklusive der zugrundeliegenden Daten und Annahmen vornehmen zu können (s.

<https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/5ef89b70-8fba-11e8-8bc1-01aa75ed71a1/language-en>N. Forsell et al., 2018 und Nicklas Forsell et al., 2019).

Weitere Validierungen werden jährlich im Rahmen der allgemeinen und kategoriespezifischen Qualitätskontrolle und eine Qualitätssicherung durch die für die THG-Berichterstattung der

Quellgruppe "Holzprodukte" zuständige Fachseite und durch die Nationale Koordinierungsstelle gemäß den Anforderungen des QSE-Handbuchs bzw. dessen mitgeltenden Unterlagen durchgeführt (vgl. Kapitel 6.1.3 "Qualitätssicherung und -kontrolle" sowie Kapitel 6.10 "Holzprodukte" des jährlichen Inventardokumentes (UNFCCC, 2024) bzw. der jährlichen Berichte zur "Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen", Umweltbundesamt, diverse Jahrgänge).

Räumliche Abdeckung

Entsprechend der internationalen und europäischen Vorgaben der THG-Berichterstattung für die Quellgruppe "Holzprodukte" (vgl. UNFCCC Decision 24/CP.19, UNFCCC Decision 18/CMA.1) werden die CO₂-Emissionen der Quellgruppe "Holzprodukte" auf Basis des "Produktionsansatzes" ermittelt, wonach ausschließlich Holz aus heimischem Einschlag berücksichtigt wird. Die Berechnung umfasst folglich sowohl biogene CO₂-Emissionen und ihre Einbindung, die mit der inländischen Nutzung in Deutschland eingeschlagenen Holzes verbunden ist, als auch Holz, das nach seiner Weiterverarbeitung zu Holzhalbwaren (d. h. Schnittholz, Holzwerkstoffe und Papier und Pappe) exportiert wurde. Weitere Details zu den auch der Berechnung der Projektionen zugrundeliegenden Systemgrenzen finden sich in den Berechnungsvorgaben des IPCC (IPCC, 2019, Kapitel 12) wie auch in der aufgeführten Literatur zur Modelldokumentation.

Zeithorizont

bis 2100 möglich

Zeitliche Auflösung

Jährlich

Methodischer/mathematischer Ansatz

Siehe Dokumentation des Modells.

OpenSource

Der WoodCarbonMonitor stellt durch seine Implementierung als Daten und Funktionalität integrierende Excel-Dateien einerseits ein Modell und andererseits eine Datenbank dar. Aus urheberrechtlichen Gründen ist eine Open-Source-Veröffentlichung nicht möglich.

Parameter

Rohholzsortimente und Holzhalbwarenkategorien

Programmiersprache

MS Excel und VBA

Räumliche Auflösung

Die Kohlenstoffspeicheränderung in Holzprodukten wird gemäß der Vorgaben der Berichterstattung und der methodischen Leitlinien des IPCC (IPCC, 2019, Kapitel 12) untergliedert in Holzhalbwaren (Schnittholz, Holzwerkstoffe und Papier und Pappe) die entweder heimisch verbraucht (d. h. in Deutschland genutzt) oder als exportierte Holzprodukte in anderen Ländern in verschiedenen Anwendungsbereichen stofflich genutzt bzw. zu Fertigwaren weiterverarbeitet werden. Eine weitere räumliche Auflösung ist nicht vorgesehen.

Sektoren

WoodCarbonMonitor bildet die CO₂-Emissionsdaten der Kategorie "Holzprodukte" im Sektor LULUCF ab.

Software

MS Excel und VBA

Unsicherheit

Unsicherheiten werden nicht explizit quantifiziert. Detaillierte Informationen zu den mit der Modellierung der verzögerten Freisetzung biogener CO₂-Emissionen durch die stoffliche Holznutzung verbundenen Unsicherheiten mit dem WoodCarbonMonitor, der die methodischen Vorgaben des IPCC auf Basis eines Tier2-Ansatzes umsetzt, finden sich in den entsprechenden Kapiteln 6.10.3 der jährlichen Inventardokumente (Umweltbundesamt, diverse Jahrgänge), in den Kapiteln 5 und 6 von Rüter (2017) sowie in Kapitel 12.7 des IPCC (2019, Kapitel 12).

Visualisierung des Modells und dessen Funktionsweisen

Eine detaillierte Dokumentation ist in Rüter (2017) enthalten.

Wesentliche endogene und exogene Strukturen/Variablen

Exogene Variablen:

- ▶ Inventurdaten zu Abgang und Nutzung von Rohholz (historisch und projiziert)
- ▶ LULUCF-Submission 2025

Endogene Variablen:

- ▶ THG-Emissionen (positiv = Quelle, negativ = Senke) für den Kohlenstoffpool Holzprodukte

4 Faktenblätter zu den Daten

Gemäß der Dokumentationskategorien wurden für Datensätze aus der Modellierung der THG-Projektionen Datenfaktenblätter erstellt. Diese Faktenblätter sind online verfügbar⁸ und dort gemäß des Metadatenmodells DCAT-AP.de (Version 2.0) dokumentiert. Sofern bekannt und möglich, haben die Modellierenden einen Link zur ursprünglichen Onlinequelle des Datensatzes im Faktenblatt angegeben.

⁸ <https://thg-projektionen2025-daten-modell-dokumentation-788cd5.usercontent.opencode.de/Datensatz/>

5 Zugang zu zentralen Daten der Treibhausgas-Projektionen 2025

Auf seinem Datenportal Data Cube veröffentlicht das Umweltbundesamt folgende Datensätze zu den Treibhausgas-Projektionen 2025:

- ▶ Rahmendaten für die Treibhausgas-Projektionen 2025 (Datentabelle) (Prognos, 2025a)
- ▶ Datentabelle zu den Treibhausgas-Projektionen 2025 (Öko-Institut e. V. et al., 2025)
- ▶ Endverbrauchspreise der Energieträger für die Treibhausgas-Projektionen 2025 (Prognos, 2025b)

Auf der Webseite "Aktuelle Treibhausgas-Projektionen"⁹ des Umweltbundesamtes können folgende Datensätze heruntergeladen werden:

- ▶ Instrumentenausgestaltung für die Treibhausgas-Projektionen 2025 (Datentabelle) (UBA, 2025b)
- ▶ Treibhausgasminderungswirkung der Instrumente der Treibhausgas-Projektion 2025 für Deutschland (Datentabelle) (UBA, 2025c)

⁹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-fuer-die-klimaschutz-energiepolitik/integrierte-energie-treibhausgasprojektionen>

6 Data Cube des Umweltbundesamtes

Der Data Cube des Umweltbundesamtes (UBA, 2025a) basiert auf der komponentenbasierten Open-Source Plattform ".stat Suite"¹⁰, welche durch die Statistical Information System Collaboration Community (SIS-CC) betrieben wird. Die .stat Suite ermöglicht die effiziente Produktion und Verbreitung statistischer Tabellendaten und stellt diese über eine interaktive Weboberfläche öffentlich bereit. Die Daten werden durch das SDMX Format¹¹ (Statistical Data and Metadata Exchange) standardisiert und sind in der Weboberfläche individuell filterbar, anpassbar, sowie über eine API anbindbar. Die Daten können zusätzlich durch ein ausgewähltes Set an Graphen visualisiert werden. Das verwendete SDMX Format stellt die Daten nach dem ISO 17369 Standard bereit.

In Zusammenarbeit mit dem Öko-Institut hat das Umweltbundesamt einen Prozess für die Überführung der Daten in den Data Cube entwickelt. Das Öko-Institut hat die Daten in einem standardisierten Excel-Format über ein GitLab Repository bereitgestellt. Die in den Daten enthaltenen Informationen hat das Umweltbundesamt gemäß des SDMX Formats in Dimensionen und Annotation gegliedert. Dimensionen beschreiben in diesem Zusammenhang Größen, welche genutzt werden, um statistische Reihen oder Einzelbeobachtungen zu identifizieren. Unter Annotationen sind Informationen zu verstehen, welche zusätzliche Informationen zu statistischen Reihen oder Einzelbeobachtungen beinhalten. Für die identifizierten Dimensionen haben Umweltbundesamt und Öko-Institut, falls möglich und nötig, Codelisten erstellt. Codelisten beschreiben definierte Listen valider Dateneinträge für die einzelnen Dimensionen. Basierend auf diesen Grundlagen hat das Umweltbundesamt die Daten über einen Transformationsprozess in das Zielformat umgewandelt und stellt diese über den Data Cube bereit. Für diesen Prozess hat das UBA die statistische Programmiersprache R genutzt. Die Nutzenden des Data Cube können die Datensätze im Excel- oder CSV-Format herunterladen und zusätzlich Informationen für die jeweiligen Datenstrukturen über eine XML-Datei erhalten. Die Daten sind, wie bereits erläutert, auf Basis des DCAT-AP.de Metadatenmodells dokumentiert. Die Metadaten sind ebenfalls über den Data Cube erhältlich.

¹⁰ <https://sis-cc.gitlab.io/dotstatsuite-documentation/>

¹¹ <https://sdmx.org/>

7 Quellenverzeichnis

- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Leopoldina & Union der deutschen Akademien der Wissenschaften (Hrsg.) (2015). *Mit Energieszenarien gut beraten: Anforderungen an wissenschaftliche Politikberatung: Stellungnahme des Akademienprojekts „Energiesysteme der Zukunft“*. <https://energiesysteme-zukunft.de/publikationen/stellungnahme-energieszenarien> [30.09.2025]
- AGEE-Stat. (2023). *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland: Stand: Februar 2023*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/372/dokumente/entwicklung_der_ee_in_deutschland_2022.xlsx [30.09.2025]
- Ahmad, S. & Riker, D. (2020). *Updated Estimates of the Trade Elasticity of Substitution* (Economics Working Paper 2020-05-A). https://www.usitc.gov/publications/332/working_papers/ahmad_and_riker_eos_2020.pdf [10.11.2025]
- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen (AGEB) (2025). *Auswertungstabellen zur Energiebilanz 1990 bis 2024*. <https://ag-energiebilanzen.de/daten-und-fakten/auswertungstabellen/> [31.10.2025]
- Bauknecht, D., Flachsbarth, F., Koch, M. & Vogel, M. (2024). The role of decentralised flexibility options for managing transmission grid congestions in Germany. *The Electricity Journal*, 37(1), 107363. <https://doi.org/10.1016/j.tej.2023.107363>
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T. & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723–739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) (2025). *Verwaltungsgebiete*. <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/verwaltungsgebiete.html> [22.10.2025]
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) (2025). *Leuchtturmprojekte*. https://www.ble.de/DE/Projektfoerderung/Foerderungen-Auftraege/Ackerbaustrategie/Leuchtturmprojekte/Leuchtturmprojekte_node.html [16.12.2025]
- Bundesnetzagentur (Hrsg.). (2024). *Ausschreibungen zur Ermittlung der finanziellen Förderung von Windenergieanlagen an Land*. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Ausschreibungen/Wind_Onshore/start.html [15.12.2025]
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (2025a). *Kraftwerksliste der Bundesnetzagentur: Aktuelle Erzeugungsanlagen* [Datenstand: 3. November 2025]. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/start.html> [15.12.2025]
- Bundesnetzagentur (BNetzA) (2025b). *Marktstammdatenregister*. <https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR> [28.11.2025]
- Cao, K.-K., Cebulla, F., Gómez Vilchez, J. J., Mousavi, B. & Prehofer, S. (2016). Raising awareness in model-based energy scenario studies—a transparency checklist. *Energy, Sustainability and Society*, 6(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s13705-016-0090-z>
- CEN (2013). *Methode zur Berechnung und Deklaration des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen bei Transportdienstleistungen (Güter- und Personenverkehr)* (EN 16258:2013-3). <https://dx.doi.org/10.31030/1894795>
- Department for Transport (Hrsg.) (2022). *Econometric Models to Estimate Demand Elasticities for the National Air Passenger Demand Model*. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6235a5378fa8f540edba36f5/econometric-models-to-estimate-demand-elasticities-for-the-national-air-passenger-demand-model.pdf> [09.12.2025]

Bundes-Klimaschutzgesetz vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I S. 2513), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 15. Juli 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 235) geändert worden ist (2024). <https://www.gesetze-im-internet.de/ksg/KSG.pdf> [17.12.2025]

Dieckhoff, C., Appelrath, H.-J., Fishedick, M., Grunwald, A., Höffler, F., Mayer, C. & Weimer-Jehle, W. (2014). *Zur Interpretation von Energieszenarien* (Energiesysteme der Zukunft). https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Analyse_Energieszenarien.pdf [27.01.2015]

Dios Ortúzar, J. de & Willumsen, L. G. (1990). *Modelling Transport*. Wiley. <https://books.google.de/books?id=XzVPAAAAMAAJ> [17.12.2025]

Domschke, W. (2014). *Logistik: Transport: Grundlagen, lineare Transport- und Umladeprobleme* (5., überarbeitete Aufl.). De Gruyter. <https://doi.org/10.1524/9783486843521>

Durchführungsverordnung (EU) 2022/2299 der Kommission vom 15. November 2022 mit Durchführungsbestimmungen zur Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Struktur, des Formats, der technischen Einzelheiten und des Verfahrens für die integrierten nationalen energie- und klimabezogenen Fortschrittsberichte (2022). http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2022/2299/oj [17.12.2025]

Ecke, L., Vallée, J., Chlond, B. & Vortisch, P. (2023). *Deutsches Mobilitätspanel (MOP) – Wissenschaftliche Begleitung und Auswertungen Bericht 2022/2023: Alltagsmobilität und Fahrleistung*. <https://doi.org/10.5445/IR/1000164704>

Ellenbeck, S. & Lilliestam, J. (2019). How modelers construct energy costs: Discursive elements in Energy System and Integrated Assessment Models. *Energy Research & Social Science*, 47, 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.08.021>

Elsland, R. (2016). *Long-term energy demand in the German residential sector: Development of an Integrated Modelling Concept to Capture Technological Myopia*. Nomos. <https://doi.org/10.5771/9783845267487>

Emele, L. & Moosmann, L. (2025). *Modellbeschreibung ENUSEM*. https://www.oeko.de/uploads/oeko/das_institut/institutsbereiche/energie-klimaschutz/OEKO-ENUSEM.pdf [01.10.2025]

Durchführungsverordnung (EU) 2020/1208 der Kommission vom 7. August 2020 über die Struktur, das Format, die Verfahren für die Vorlage und die Überprüfung der von den Mitgliedstaaten gemäß der Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates gemeldeten Informationen und zur Aufhebung der Durchführungsverordnung (EU) Nr. 749/2014 der Kommission (2020). http://data.europa.eu/eli/reg_impl/2020/1208/oj [17.12.2025]

Verordnung (EU) 2018/1999 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz, zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 663/2009 und (EG) Nr. 715/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 94/22/EG, 98/70/EG, 2009/31/EG, 2009/73/EG, 2010/31/EU, 2012/27/EU und 2013/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, der Richtlinien 2009/119/EG und (EU) 2015/652 des Rates und zur Aufhebung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 des Europäischen Parlaments und des Rates, ABl. L 328 (2018). <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/1999/oj> [17.12.2025]

Verordnung (EU) 2018/841 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 über die Einbeziehung der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft in den Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030 und zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 525/2013 und des Beschlusses Nr. 529/2013/EU, ABl. L 156 vom 19.6.2018 (2018). <http://data.europa.eu/eli/reg/2018/841/oj> [17.12.2025]

European Environment Agency (Hrsg.) (2024). *Monitoring of CO₂ emissions from passenger cars Regulation (EU) 2019/631: Datahub*. <https://www.eea.europa.eu/en/datahub/datahubitem-view/fa8b1229-3db6-495d-b18e-9c9b3267c02b> [07.08.2024]

Eurostat. (o.J.). *Metadaten - Übersicht*. <https://ec.europa.eu/eurostat/de/web/metadata> [15.12.2025]

Eurostat (2023). *ESS Quality Glossary*.

https://showvoc.op.europa.eu/#/datasets/ESTAT_ESS_QUALITY_GLOSSARY/data [19.12.2025]

Expertenrat für Klimafragen (Hrsg.). (2024). *Gutachten zur Prüfung der Treibhausgas-Projektionsdaten 2024: Sondergutachten gemäß § 12 Abs. 4 Bundes-Klimaschutzgesetz*. https://expertenrat-klima.de/fileadmin/ERK/Berichte/ERK2024_Sondergutachten-Pruefung-Projektionsdaten-2024.pdf [15.12.2025]

Flamme, S., Hanewinkel, J., Quicker, P. & Weber, K. (2018). *Energieerzeugung aus Abfällen: Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030*. Umweltbundesamt (Hrsg.). <https://doi.org/10.60810/openumwelt-5614>

Fleiter, T., Rehfeldt, M., Herbst, A., Elsland, R., Klingler, A.-L., Manz, P. & Eidelloth, S. (2018). A methodology for bottom-up modelling of energy transitions in the industry sector: The FORECAST model. *Energy Strategy Reviews*, 22, 237–254. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.09.005>

Forrester, J. W. (1968). *Principles of systems*. Pegasus Communications, Inc.

Forsell, N., Korosuo, A., Federici, S., Gusti, M., Rincón-Cristóbal, J.-J., Rüter, S., Sánchez-Jiménez, B., Dore, C., Brajterman, O. & Gardiner, J. (2018). *Guidance on developing and reporting Forest Reference Levels in accordance with Regulation (EU) 2018/841*. <https://doi.org/10.2834/782602>

Forsell, N., Korosuo, A., Gusti, M., Rüter, S., Havlik, P. & Obersteiner, M. (2019). Impact of modelling choices on setting the reference levels for the EU forest carbon sinks: how do different assumptions affect the country-specific forest reference levels? *Carbon Balance and Management*, 14(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0125-9>

Förster, H., Repenning, J., Braungardt, S., Bürger, V., Görz, W. K., Harthan, R. O., Hermann, H., Jörß, W., Kasten, P., Ludig, S., Matthes, F. C., Mendelevitch, R., Scheffler, M., Bei der Wieden, M., Wiegmann, K., Blömer, R., Brugger, H., Eckstein, J., Fleiter, T., . . . Stepanyan, D. (2024). *Instrumente für die Treibhausgas-Projektionen 2025*. Umweltbundesamt (Hrsg.). <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7632>

Frey, C., Penman, J., Hanle, L., Monni, S. & Ogle, S. (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Chapter 3: Uncertainties*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/1_Volume1/V1_3_Ch3_Uncertainties.pdf [05.11.2025]

Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2023) (2023). *Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 23 des Gesetzes vom 18. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 347) geändert worden ist*. https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html [15.12.2025]

Graebner, C. (2018). How to Relate Models to Reality? An Epistemological Framework for the Validation and Verification of Computational Models. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 21(3), Artikel 8. <https://doi.org/10.18564/jasss.3772>

Grimm, V., Railsback, S. F., Vincenot, C. E., Berger, U., Gallagher, C., DeAngelis, D. L., Edmonds, B., Ge, J., Giske, J., Groeneveld, J., Johnston, A. S., Milles, A., Nabe-Nielsen, J., Polhill, J. G., Radchuk, V., Rohwäder, M.-S., Stillman, R. A., Thiele, J. C. & Ayllón, D. (2020). The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 23(2), 7. <https://doi.org/10.18564/jasss.4259>

- Grunwald, A. (2011). Energy futures: Diversity and the need for assessment. *Futures*, 43(8), 820–830. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2011.05.024>
- Gschrey, B., Behringer, D., Kleinschmidt, J., Jörß, W., Liste, V., Ludig, S., Wissner, N., Birchby, D., Dubey, J. & Hekman, J. (2022). *Support contract for an Evaluation and Impact Assessment for amending Regulation (EU) No 517/2014 on fluorinated greenhouse gases: Impact assessment final report*. <https://doi.org/10.2834/934036>
- Gschrey, B. & Schwarz, W. (2011). *Projektionen zu den Emissionen von HFKW, FKW und SF6 für Deutschland bis zum Jahr 2050* (Climate Change 21/2011). Umweltbundesamt (Hrsg.). <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4226.pdf> [13.06.2023]
- Hall, L. M. & Buckley, A. R. (2016). A review of energy systems models in the UK: Prevalent usage and categorisation. *Applied Energy*, 169, 607–628. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.044>
- Harthan, R. O., Förster, H., Borkowski, K., Braungardt, S., Bürger, V., Cook, V., Emele, L., Görz, C. W., Hennenberg, K., Jansen, L. L., Jörß, W., Kasten, P., Loreck, C., Ludig, S., Matthes, F. C., Mendelevitch, R., Moosmann, L., Nissen, C., Repenning, J., . . . Vos, C. (2024). *Technischer Anhang der Treibhausgas-Projektionen 2024 für Deutschland (Projektionsbericht 2024)* (Treibhausgas-Projektionen für Deutschland). Umweltbundesamt (Hrsg.). <https://doi.org/10.60810/openumwelt-7510>
- Hochstättler, W. (2017). *Lineare Optimierung*. Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54425-9>
- Infras (Hrsg.) (2023). *The Handbook of Emission Factors for Road Transport*. <https://www.hbefa.net/> [09.12.2025]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (o.J.). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Glossary*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/0_Overview/V0_2_Glossary.pdf [19.12.2025]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2006a). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/> [29.10.2023]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2006b). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 1 General Guidance and Reporting*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol1.html> [16.12.2025]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2006c). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html> [22.11.2021]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2014). *2013 Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto Protocol (KP Supplement)*. http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/home/2013KPSupplementaryGuidance_inv.html [24.11.2025]
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.) (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use*. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/vol4.html> [16.12.2025]
- Joint Research Center (JRC) (o.J.). *Analysis of Fluorinated greenhouse gases (AnaFgas)*. <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-anafgas/> [23.10.2025]
- Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (fortlaufend). *Bestand an Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Produktkatalog/produkte/Fahrzeuge/fz13_b_uebersicht.html [06.11.2025]
- Kuramochi, T., Ramírez, A., Turkenburg, W. C. & Faaij, A. (2012). Comparative assessment of CO2 capture technologies for carbon-intensive industrial processes. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(1), 87–112. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2011.05.001>

- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (Hrsg.) (2023). *Verwendung erneuerbarer Antriebsenergien in landwirtschaftlichen Maschinen*.
https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Energie/Antriebsenergien/12643_Antriebssysteme.pdf [23.01.2025]
- Langreder, N., Lettow, F., Sahnoun, M., Kreidelmeyer, S., Wunsch, A., Lengning, S., Lübbers, S., Thamlin, N., Ziegenhagen, I., Wunsch, M., Ortner, S., Paar, A., Johannsen, L., Mellwig, P., Ott, B., Radgen, P. & Deac, G. (2024). *Leitfaden Wärmeplanung - Begleitdokument Technikkatalog*.
https://www.ifeu.de/fileadmin/uploads/Leitf%C3%A4den_und_Brosch%C3%BCren/Leitfaden_Waermeplanung_Begleitdokument/Begleitdokument_Technikkatalog_final_17.09.2024_geschuetzt.pdf [17.12.2025]
- Mandel, T., Kranzl, L., Popovski, E., Sensfuß, F., Müller, A. & Eichhammer, W. (2023). Investigating pathways to a net-zero emissions building sector in the European Union: what role for the energy efficiency first principle? *Energy Efficiency*, 16(4), 1–29. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10100-0>
- Manz, P., Billerbeck, A. & Fallahnejad, M. (2023). *Spatial analysis of renewable and excess heat potentials for climate-neutral district heating in Europe*. Fraunhofer ISI (Hrsg.).
<https://fordatis.fraunhofer.de/handle/fordatis/341.5> [19.12.2025]
- McGregor, S. E. (2021). *Practical Python Data Wrangling and Data Quality: Getting Started with Reading, Cleaning and Analyzing Data*. O'Reilly Media. <https://www.oreilly.com/library/view/practical-python-data/9781492091493/> [17.12.2025]
- Morrison, R. (2018). Energy system modeling: Public transparency, scientific reproducibility, and open development. *Energy Strategy Reviews*, 20, 49–63. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.010>
- Mueller, A. (2019). *Restricted solar thermal energy open field energy potential for the EU28 + Switzerland, Norway and Iceland for the year 2012*. TU Wien.
https://gitlab.com/hotmaps/potential/potential_solarthermal_collectors_open_fieldhttps://gitlab.com/hotmaps/potential/potential_solarthermal_collectors_open_field [21.10.2025]
- Müller, A., Hummel, M., Kranzl, L., Fallahnejad, M. & Büchele, R. (2019). Open Source Data for Gross Floor Area and Heat Demand Density on the Hectare Level for EU 28. *Energies*, 12(24).
<https://doi.org/10.3390/en12244789>
- Nobis, C. & Kuhnimhof, T. (2018). *Mobilität in Deutschland 2017 - MiD Ergebnisbericht: Im Auftrag des Bundesministers für Verkehr und digitale Infrastruktur (FE-Nr. 70.904/15)*. https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Ergebnisbericht.pdf [17.04.2024]
- Öko-Institut e. V., Fraunhofer ISI, IREES, Prognos, M-Five & Thünen-Institut (2025). *Datentabelle für die Treibhausgas-Projektionen 2025 (ehemals Kernindikatoren)*. Umweltbundesamt.
[https://datacube.uba.de/vis?lc=de&df\[ds\]=dc-release&df\[id\]=DF_CROSS_PROJECTION_REPORT_CORE_INDICATORS_25&df\[ag\]=UBA&df\[vs\]=1.0&av=true&dq=...&pd=2025,&to\[TIME_PERIOD\]=false&pg=0](https://datacube.uba.de/vis?lc=de&df[ds]=dc-release&df[id]=DF_CROSS_PROJECTION_REPORT_CORE_INDICATORS_25&df[ag]=UBA&df[vs]=1.0&av=true&dq=...&pd=2025,&to[TIME_PERIOD]=false&pg=0) [13.11.2025]
- Ortner, S., Pehnt, M., Blömer, S., Auberger, A., Steinbach, J., Deurer, J., Popovski, E., Lösch, O., Langreder, N., Thamling, N., Sahnoun, M. & Rau, D. (2021). *Analyse des wirtschaftlichen Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung: Beitrag zur Berichtspflicht EnEff-RL, Artikel 14 - Anhang VIII*. Abschlussbericht. Umweltbundesamt (Hrsg.). <https://doi.org/10.60810/openumwelt-2852>
- Pfenninger, S., Hirth, L., Schlecht, I., Schmid, E., Wiese, F., Brown, T., Davis, C., Gidden, M., Heinrichs, H., Heuberger, C., Hilpert, S., Krien, U., Matke, C., Nebel, A., Morrison, R., Müller, B., Pleßmann, G., Reeg, M., Richstein, J. C., . . . Wingenbach, C. (2018). Opening the black box of energy modelling: Strategies and lessons learned. *Energy Strategy Reviews*, 19, 63–71. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2017.12.002>

Prognos (Hrsg.) (o.J.). *Weltwirtschaftsmodell VIEW: Das globale Simulationsmodell von Prognos*.
https://www.prognos.com/sites/default/files/2021-07/VIEW_Factsheet_2021.pdf [21.10.2025]

Prognos (2025a). *Rahmendaten für die Treibhausgas-Projektionen 2025 - Datentabelle*. Umweltbundesamt.
https://datacube.uba.de/vis?lc=de&df%5Bds%5D=dc-release&df%5Bid%5D=DF_CROSS_PROJECTION_REPORT_BASIC&df%5Bag%5D=UBA&df%5Bvs%5D=1.0&av=true&dq=...&pd=2025%2C&to%5BTIME_PERIOD%5D=false&pg=0 [13.11.2026]

Prognos (2025b). *Treibhausgas-Projektionen 2025 für Deutschland - Endverbrauchspreise der Energieträger*. Umweltbundesamt. [https://datacube.uba.de/vis?tm=enverbraucherpreise&pg=0&snb=1&df\[ds\]=ds-dc-release&df\[id\]=DF_CROSS_PROJECTION_REPORT_FINAL_CONSUMER_PRICES&df\[ag\]=UBA&df\[vs\]=1.0&dq=...&pd=2025.&to\[TIME_PERIOD\]=false](https://datacube.uba.de/vis?tm=enverbraucherpreise&pg=0&snb=1&df[ds]=ds-dc-release&df[id]=DF_CROSS_PROJECTION_REPORT_FINAL_CONSUMER_PRICES&df[ag]=UBA&df[vs]=1.0&dq=...&pd=2025.&to[TIME_PERIOD]=false) [13.11.2026]

Rehfeldt, M., Fleiter, T. & Toro, F. (2018). A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry. *Energy Efficiency*, 11(5), 1057–1082. <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9571-y>

Rehfeldt, M., Fleiter, T. & Worrell, E. (2018). Inter-fuel substitution in European industry: A random utility approach on industrial heat demand. *Journal of Cleaner Production*, 187, 98–110.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.179>

Repenning, J., Emele, L., Blanck, R., Böttcher, H., Dehoust, G., Förster, H., Greiner, B., Harthan, R. O., Henneberg, K., Hermann, H., Jörß, W., Loreck, C., Ludig, S., Scheffler, M., Schumacher, K., Zell-Ziegler, C., Braungardt, S., Eichhammer, W., Elsland, R., . . . Ziesing, H.-J. (2015). *Klimaschutzszenario 2050: 2. Endbericht*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.
<https://www.oeko.de/oekodoc/2451/2015-608-de.pdf> [16.12.2025]

Rüter, S. (2011). *Projection of net-emissions from harvested wood products in European countries: For the period 2013-2020* (Work Report of the Institute of Wood Technology and Wood Biology 2011/1) Johann Heinrich von Thünen Institut (Hrsg.). https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn048901.pdf [17.10.2025]

Rüter, S. (2017). *Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz: Das Modell WoodCarbonMonitor* [Dissertation]. Technische Universität München, München.
https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn058534.pdf [09.08.2023]

Rüter, S. (2023). *Abschätzung von Substitutionspotentialen der Holznutzung und ihre Bedeutung im Kontext der Treibhausgas-Berichterstattung* (Thünen Working Paper Nr. 214). Johann Heinrich von Thünen-Institut (Hrsg.).
<https://doi.org/10.3220/WP1685603200000>

Rüter, S., Werner, F., Forsell, N., Prins, C., Vial, E. & Levet, A.-L. (2016). *ClimWood2030 - Climate benefits of material substitution by forest biomass and harvested wood products: Perspective 2030: Final Report* (Thünen-Report Nr. 42). <https://doi.org/10.3220/REP1468328990000>

Savvidis, G., Siala, K., Weissbart, C., Schmidt, L., Borggreffe, F., Kumar, S., Pittel, K., Madlener, R. & Hufendiek, K. (2019). The gap between energy policy challenges and model capabilities. *Energy Policy*, 125, 503–520.
<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.033>

Schade, W., Haug, I., Emmerich, J., Berthold, D., Oehme, R., Streif, M., Khanna, A., Emmerich, C., Krail, M., Anstett, P., Walther, C. & Waßmuth, V. (2023). *Gestaltung des MKS-Referenzszenarios für die Periode 2022 bis 2050 (REF-2050): Arbeitspapier im Auftrag des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV)*.
<https://m-five.de/publikationsartikel/gestaltung-des-mks-referenzszenarios-fuer-die-periode-2022-bis-2050-ref-2050> [17.04.2024]

Schellong, W. (2016). Energiesystemanalyse. In W. Schellong (Hrsg.), *Analyse und Optimierung von Energieverbundsystemen* (1. Auflage, S. 145–208). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49463-9_4

- Schmid, C., Wartecker, G., Dauwe, T., van Maris, K., Brook, R., Raoult, J., Förster, H [Hannah], Gores, S., Bouman, E., Esparrago, J. & Jóźwicka-Olsen, M. (2024). *Guidance for reporting on GHG projections under Regulation (EU) 2018/1999 on the Governance of the Energy Union and Climate Action: Version 5.1*. https://www.eionet.europa.eu/reportnet/docs/govreg/projections/2021_reporting_guidance-ghg_projections_govregart18_v4-1.pdf/@download/file/2024_Reporting_guidance-GHG_Projections_GovRegArt18_v5.1.pdf [05.11.2025]
- Schnell, R., Hill, P. B. & Esser, E. (2018). *Methoden der empirischen Sozialforschung* (11., überarbeitete Auflage). De Gruyter Studium. De Gruyter Oldenbourg.
- Schubert, M., Kluth, T., Nebauer, G., Ratzenberger, R., Kotzagiorgis, S., Butz, B., Schneider, W. & Leible, M. (2014). *Verkehrsverflechtungsprognose 2030: Schlussbericht*. <https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/verkehrsverflechtungsprognose-2030-schlussbericht-los-3.pdf> [06.11.2025]
- sEEnergies Open Data (2021). *D5 1 Industry Dataset*. <https://s-energies-open-data-euf.hub.arcgis.com/maps/a6a1e8e95514413a90bbb2e40515fdb2> [15.12.2025]
- Statistisches Bundesamt (Destatis). (o.J.). *Qualitätssicherung: Methoden*. <https://www.destatis.de/DE/Methoden/Qualitaet/sicherung-datenqualitaet.html> [15.12.2025]
- Statistisches Bundesamt (Destatis) (2025). *Zensus 2022: Wohnungen nach überwiegender Heizungsart in Gitterzellen*. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Zensus2022/Publikationen/Downloads-Publikationen/Gitterdaten/datensatzbeschreibung_wohnungen_nach_heizungsart.xlsx [15.12.2025]
- Steinbach, J. (2016). *Modellbasierte Untersuchung von Politikinstrumenten zur Förderung erneuerbarer Energien und Energieeffizienz im Gebäudebereich: Dissertation zur Erlangung des akademischen Grads eines Doktors der Wirtschaftswissenschaften bei der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)*. Fraunhofer Verlag. https://irees.de/wp-content/uploads/2020/04/urn_nbn_de_0011-n-3855541.pdf. [17.12.2025]
- Sterman, J. (2000). *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. McGraw-Hill Higher Education. Irwin/McGraw-Hill. <https://books.google.de/books?id=CCKCQgAACAAJ> [17.12.2025]
- Thompson, E. (2022). *Escape from Model Land - How mathematical models can lead us astray and what we can do about it*. Basic Books. <https://www.jasss.org/26/1/reviews/1.html> [17.12.2025]
- Umweltbundesamt (UBA) (2024). *CRF Tabellen 1990-2022 (EU submission)*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen> [16.12.2025]
- Umweltbundesamt (2025a). *Data Cube: Daten zur Umwelt*. <https://datacube.uba.de/> [13.11.2025]
- Umweltbundesamt (UBA) (2025b). *Instrumentenausgestaltung für die Treibhausgas-Projektionen 2025: Datentabelle*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-fuer-die-klimaschutz-energiepolitik/integrierte-energie-treibhausgasprojektionen> [07.03.2025]
- Umweltbundesamt (UBA) (2025c). *THG-Minderungswirkung der Instrumente für die Treibhausgas-Projektionen 2025*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/dokumente/20250416_pam2025_voe2.xlsx [19.12.2025]
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (o.J.). *Use of the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories and revision of the UNFCCC reporting guidelines for Annex I Parties to the Convention | UNFCCC*. <https://unfccc.int/process-and-meetings/transparency-and-reporting/reporting-and->

[review-under-the-convention/greenhouse-gas-inventories-annex-i-parties/reporting-requirements/use-of-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories-and-revision-of-the-unfccc](#) [10.11.2025]

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2011). *Forest management reference levels*. <https://unfccc.int/topics/land-use/workstreams/land-use--land-use-change-and-forestry-lulucf/forest-management-reference-levels> [21.10.2025]

United Nations Framework Convention on Climate Change (Hrsg.) (2013). *Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013. Addendum: Decisions adopted by the Conference of the Parties: Decision 24/CP.19 Revision of the UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention*. <https://unfccc.int/resource/docs/2013/cop19/eng/10a03.pdf> [14.05.2025]

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2021). *Common Reporting Tables (CRT) on NIRs | UNFCCC*. <https://unfccc.int/documents/311076> [10.11.2025]

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (2024). *National Inventory Submissions 2024*. <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2024> [21.10.2025]

Verordnung (EG) Nr. 1099/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 22. Oktober 2008 über die Energiestatistik, ABl. L 304 vom 14.11.2008 (2008). <http://data.europa.eu/eli/reg/2008/1099/oj> [17.12.2025]

Vogl, V., Ahman, M. & Nilsson, L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, 736–745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.279>

Walker, W. E., Harremoës, P., Rotmans, J., van der Sluijs, J. P., van Asselt, M., Janssen, P. & Krayen von Krauss, M. P. (2003). Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment*, 4(1), 5–17. <https://doi.org/10.1076/iaij.4.1.5.16466>

Wermuth, M., Neef, C., Wirth, R., Hanitz, I., Löhner, H., Hautzinger, H., Stock, W., Pfeifer, M., Fuchs, M., Lenz, B., Ehrler, V., Schneider, S. & Heinzmann, H.-J. (2012). *Kraftfahrzeugverkehr in Deutschland 2010 (KiD 2010): Schlussbericht*. <https://daten.clearingstelle-verkehr.de/240/9/KiD2010-Schlussbericht.pdf> [17.04.2024]

Wiese, F., Hilpert, S., Kaldemeyer, C. & Pleßmann, G. (2018). A qualitative evaluation approach for energy system modelling frameworks. *Energy, Sustainability and Society*, 8(1), 13. <https://doi.org/10.1186/s13705-018-0154-3>