

universität freiburg

CO₂Map.de

Stündliche Emissionsintensitäten des Stromverbrauchs auf Bundeslandebene

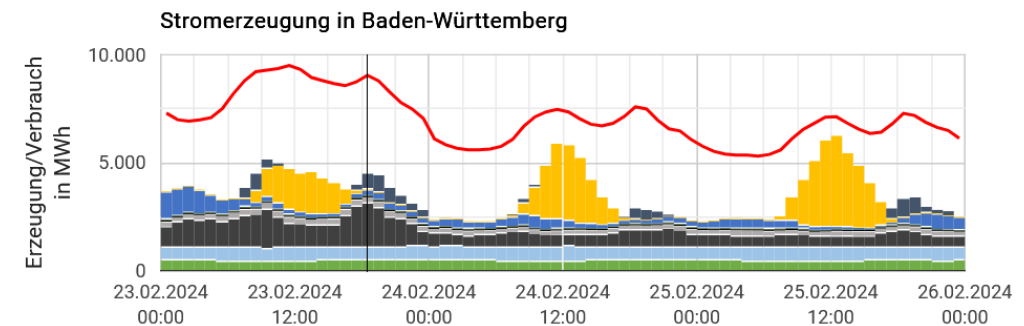
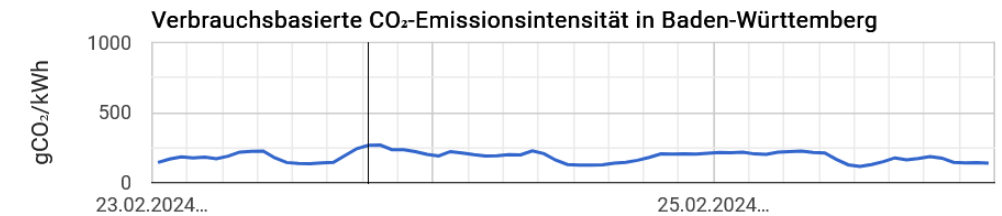
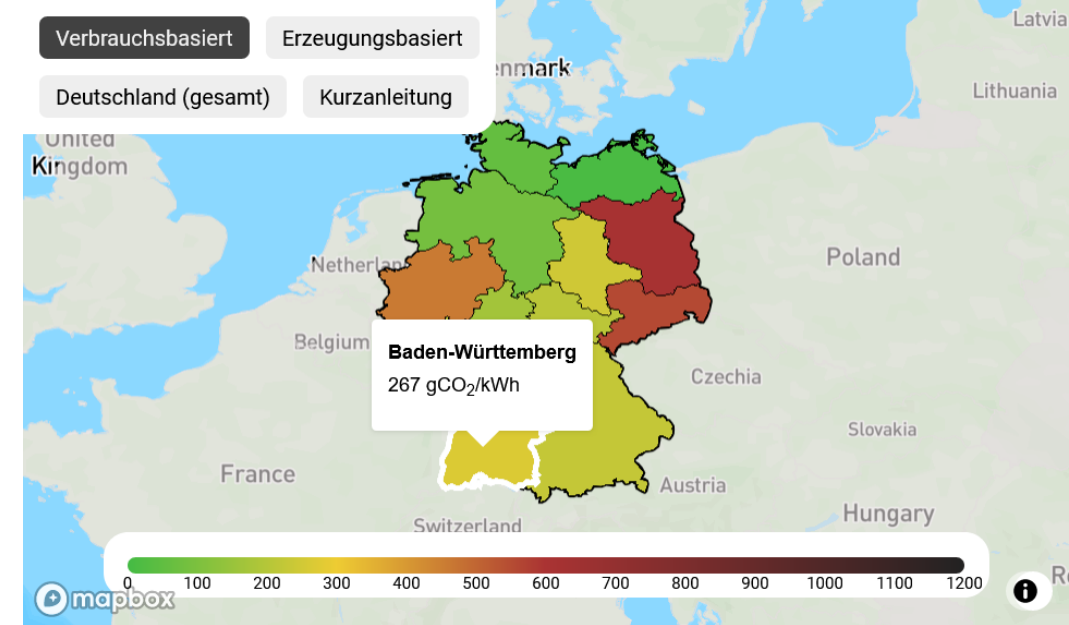
Professur für Technologien der Energieverteilung
INATECH – Institut für Nachhaltige Technische Systeme

Prof. Dr. Anke Weidlich, Dr. Mirko Schäfer, Robin L. Grether, Nick Harder, Tim Fürmann,
Rachana Tirumanyam, Johanna Adams, Ramiz Qussous

20. März 2024

Agenda

1. Inhaltlicher Überblick, kurze Tour durch die Webseite (14:00 – 14:25 Uhr)
 2. Erste Fragerunde (14:25 – 14:40 Uhr)
 3. Deep Dive Methodik (14:40 – 15:10 Uhr)
 4. Zweite Fragerunde und Abschluss (15:10 – 15:30 Uhr)
- Während des Webinars können durchgehend Fragen im F&A-Bereich geschrieben werden
 - In der Fragerunde bitte über die Funktion in Zoom melden, wir geben dann Ihr Mikrofon frei (müssen Sie ggf. bestätigen)



Team und Unterstützung



Prof. Dr. Anke Weidlich, Dr. Mirko Schäfer, Nick Harder, Tim Fürmann, Robin L. Grether, Johanna Adams, Rachana Tirumanyam, Ramiz Qussous

Kontakt: Dr. Mirko Schäfer und Nick Harder, contact@co2map.de

Die Erstellung der CO₂Map wurde finanziell gefördert von den Elektrizitätswerken Schönau

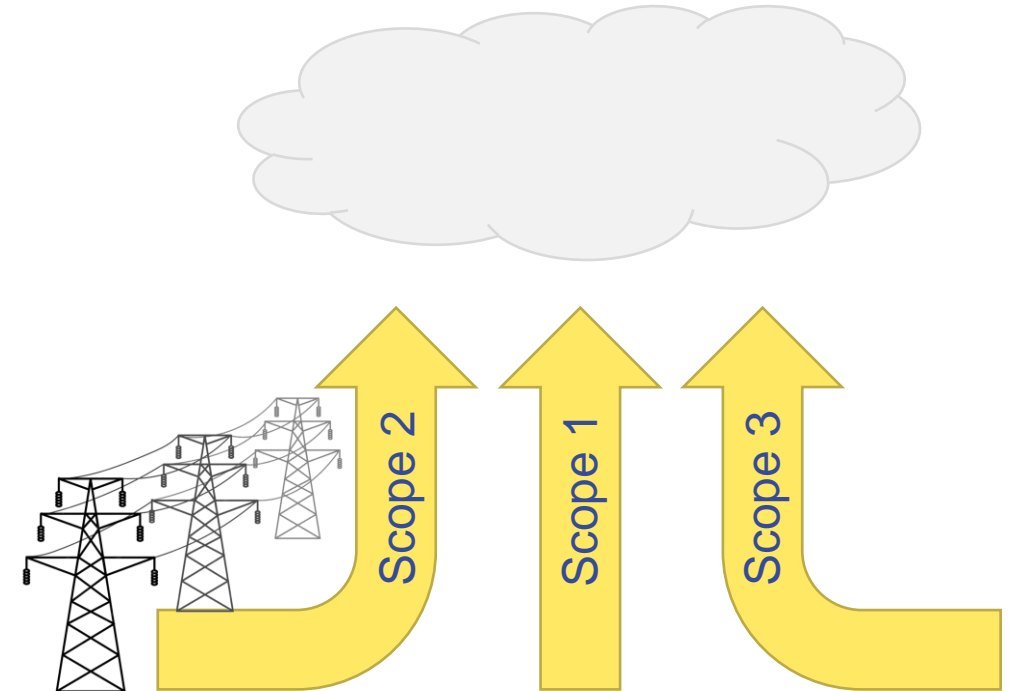
Wir danken den EWS herzlich für die Unterstützung!

Emissionsintensitäten des Stromverbrauchs

Zeitlich und räumlich hoch aufgelöst

Anwendungsbeispiele

- **Scope 2-Emissionsbilanzierung**
 - Granulare Verbrauchsdaten und Emissionsfaktoren
 - Zeitlich aufgelöste Lastgänge
 - Regionale zeitlich aufgelöste Emissionsfaktoren
- **Monitoring der Emissionsintensität**
 - Zeitliche Entwicklung
 - Regionale Unterschiede
- **Prognose und Flexibilisierung**
 - Reduzierung der bilanzierten Emissionen, z.B. durch Lastverschiebung



Welche Daten stellen wir bereit?

Stündliche Erzeugungs- und Lastdaten auf Bundeslandebene

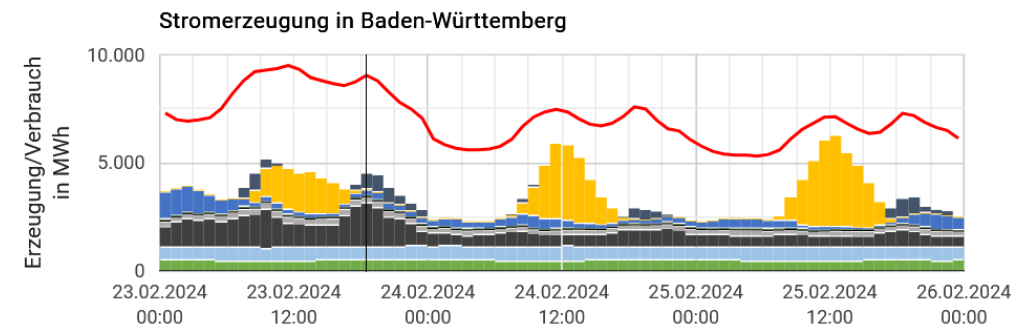
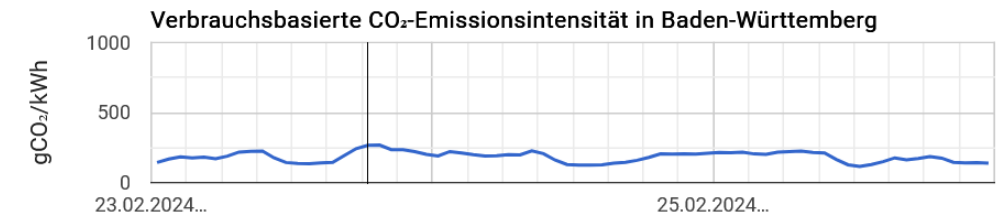
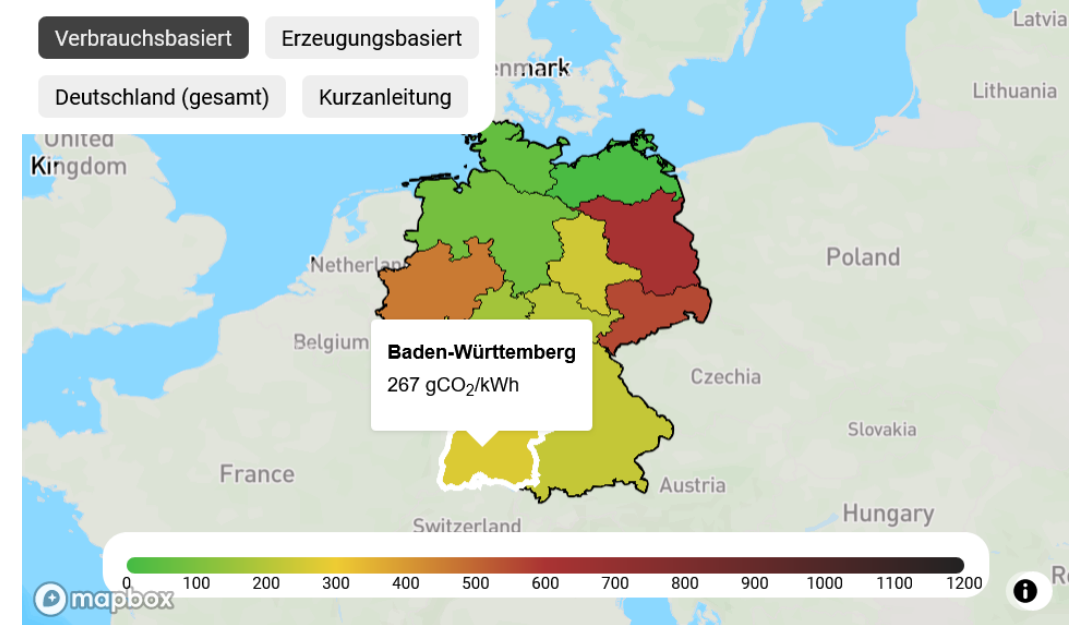
- Stadtstaaten sind umliegenden Flächenstaaten zugeordnet

Stündliche Emissionsintensitäten auf Bundeslandebene

- Erzeugungsbasiert (lokale Erzeugung)
- Verbrauchsbasiert (Berücksichtigung von Importen)

Historische Werte bis „close-to-real-time“

- Nach vier Stunden
- Stündlich aktualisiert
- Ab 2020



Methodik

Regionalisierung

Mehr dazu im *Deep Dive* zur Methodik

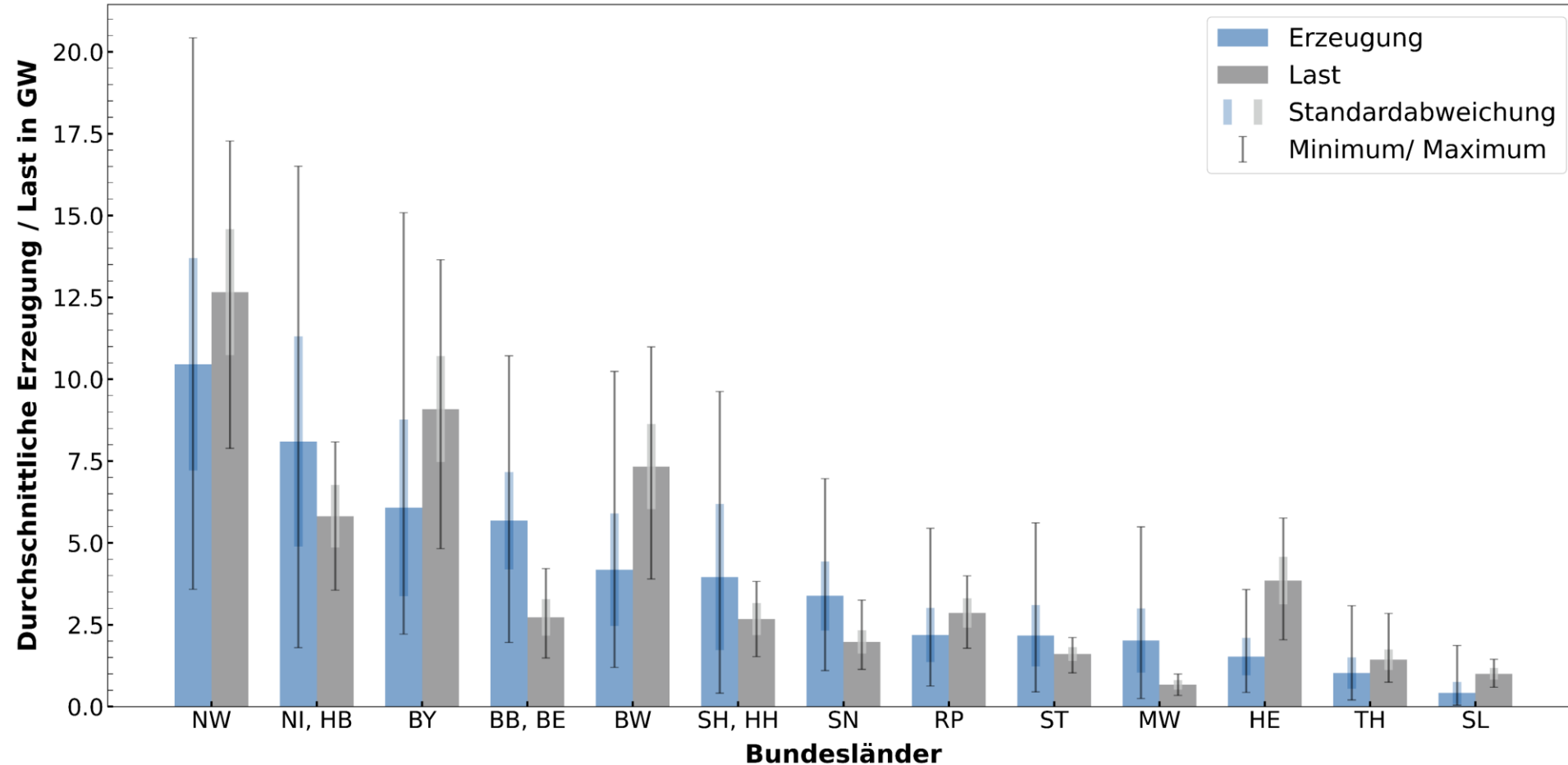
Eingangsdaten: Erzeugungs- und Lastdaten von ENTSO-E auf nationaler Ebene

Stündliche Regionalisierungsfaktoren

- **Stromverbrauch:** Modellbasierter historischer regional aufgelöster Datensatz
- **Erzeugung aus Wind und Solar:** Modellierung der regionalen stündlichen Erzeugung über Wetterdaten und installierte Erzeugungskapazitäten
- **Sonstige Erzeugung (Braunkohle, Steinkohle, Gas,...):** Verwendung blockscharfer Erzeugungsdaten von ENTSO-E, Regionalisierung der verbleibenden Erzeugung basierend auf der regionalen Verteilung der jeweiligen Erzeugungskapazitäten

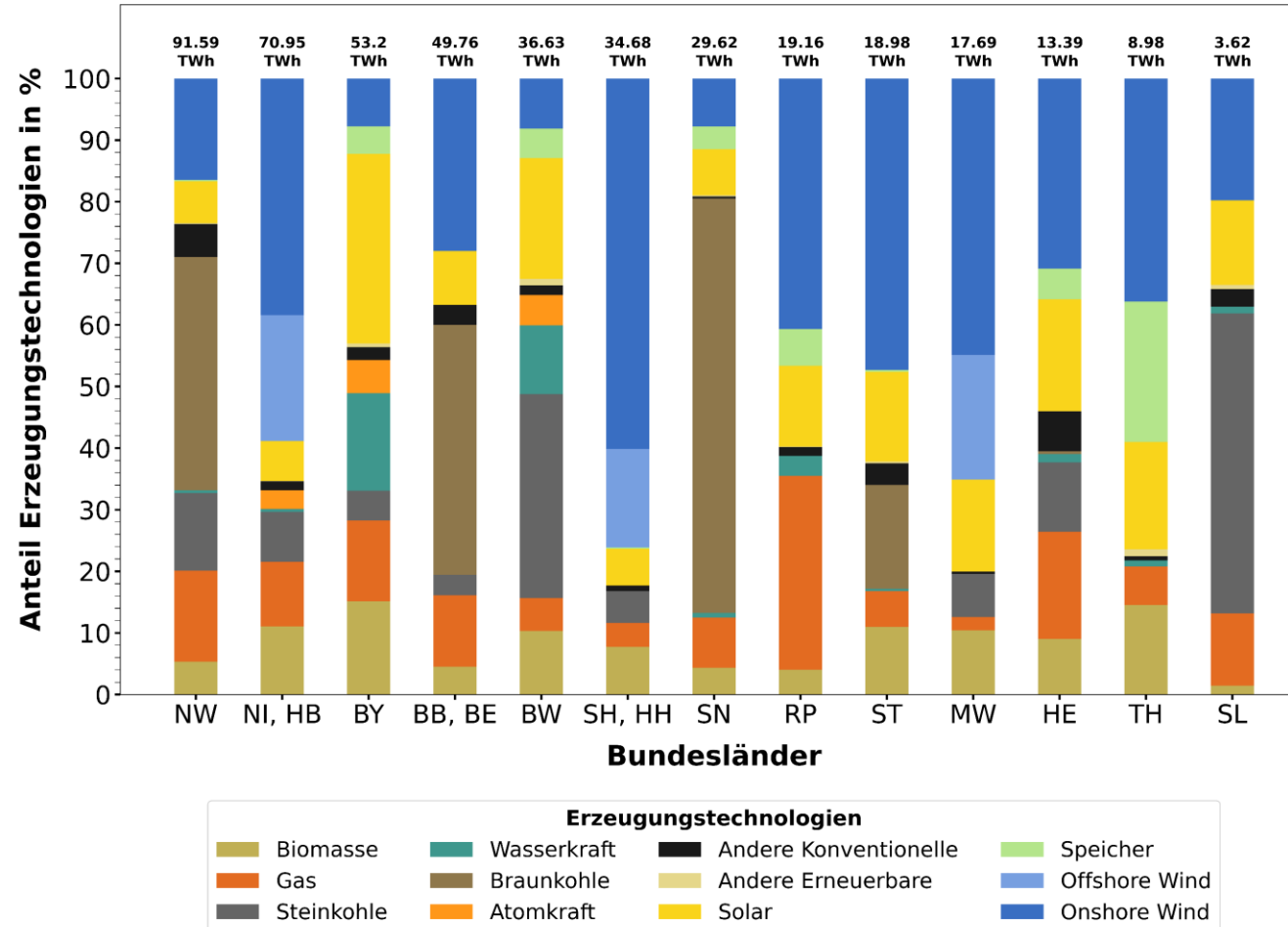
Ergebnis

Durchschnittliche Erzeugung und Last in 2023



Ergebnis

Regionaler Erzeugungsmix 2023



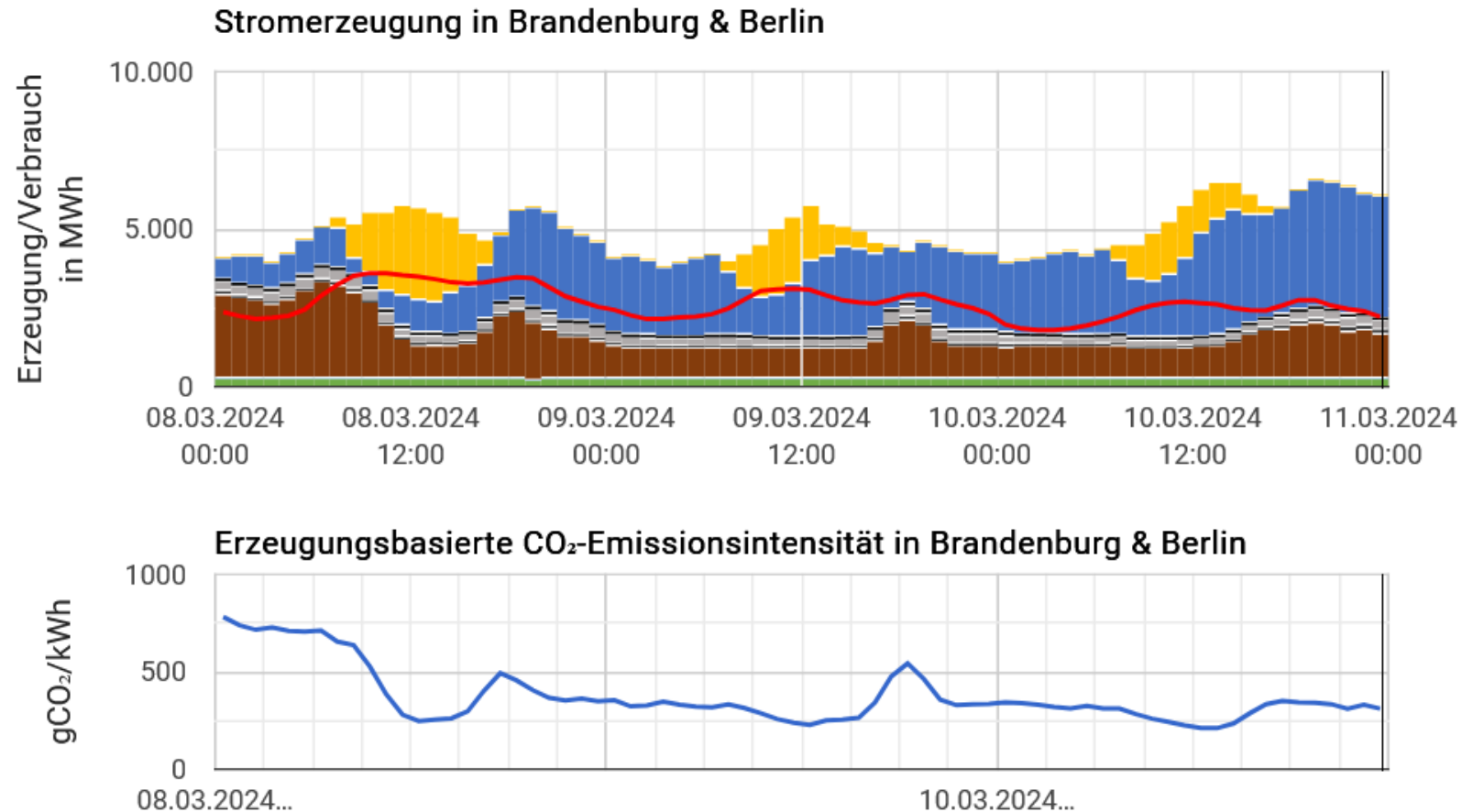
Erzeugungsbasierte Emissionsintensität

Lokale Erzeugung

Direkte Emissionen

Vorgehen

- Multiplikation der lokalen Erzeugung mit erzeugungstypspezifischen Emissionsfaktoren
 - Braunkohle
 - Steinkohle
 - Erdgas
 - Sonstige

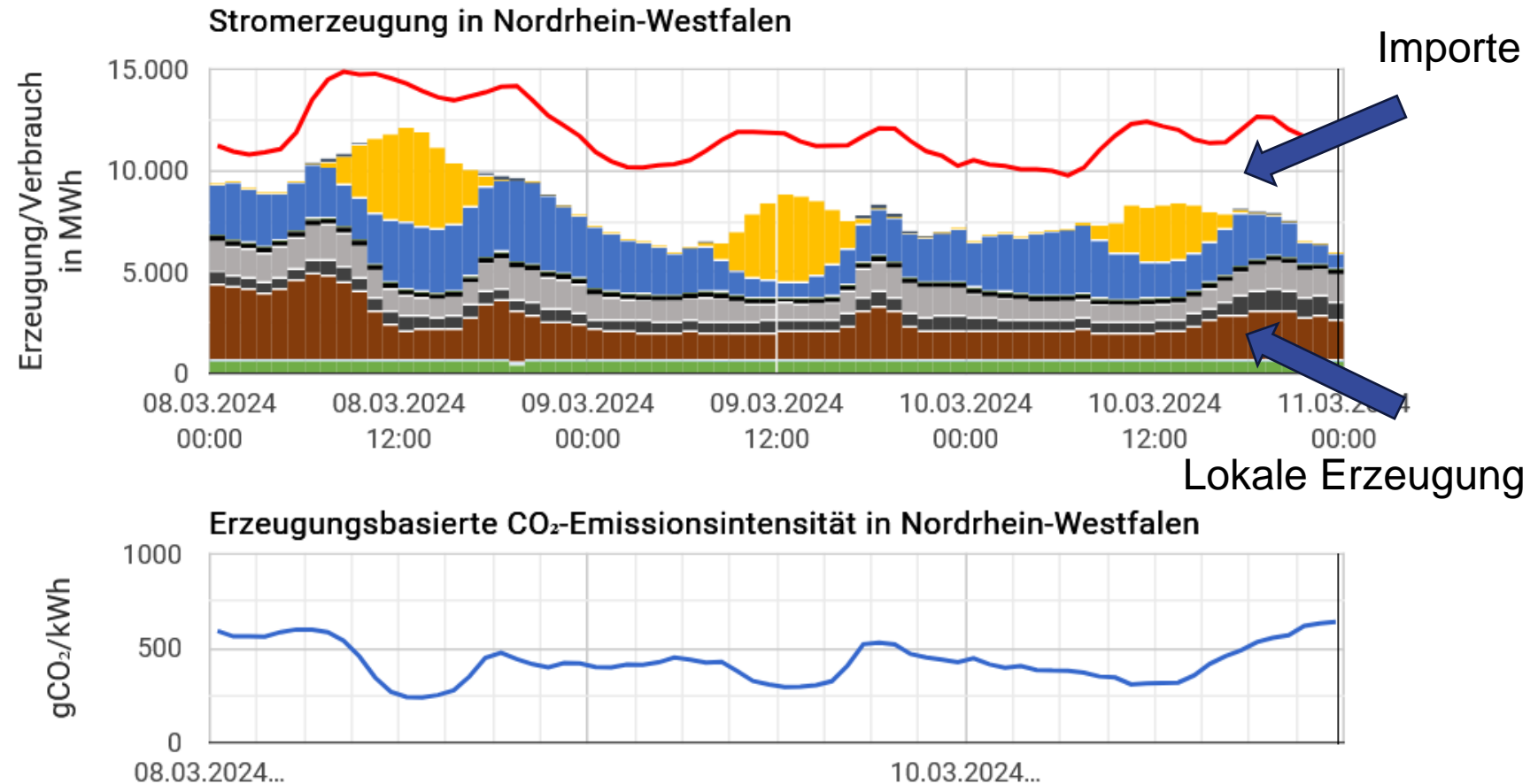


Verbrauchsbasierte Emissionsintensität

Lokale Erzeugung und Importe

Vorgehen

- Lokale Erzeugung
- Multiplikation der lokalen Erzeugung **und der Importe** mit erzeugungstyp-spezifischen Emissionsfaktoren



Flow-Tracing

Herkunft und Zusammensetzung von Importen

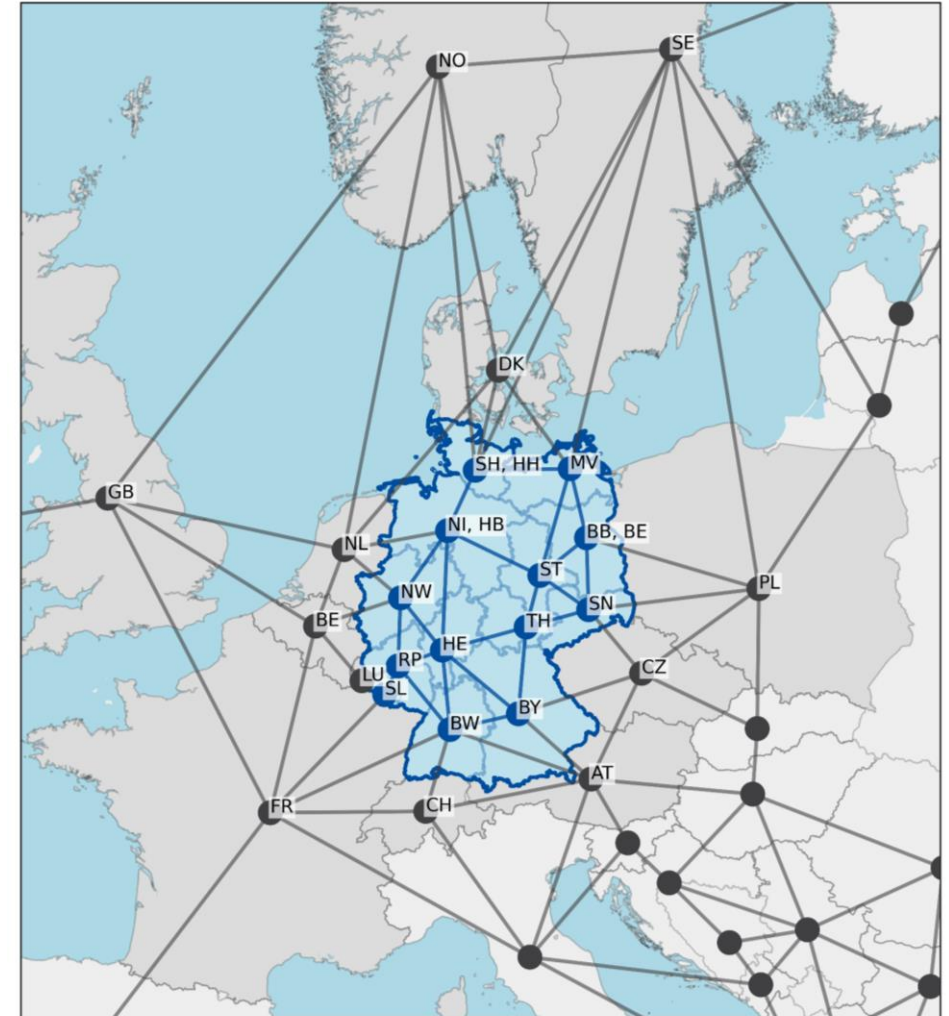
Einbettung der regionalen Netto-Importe/Exporte in das Europäische Flussmuster

- Physikalische grenzüberschreitende Flüsse

Modellbasierte Abschätzung der regionalen Stromflüsse

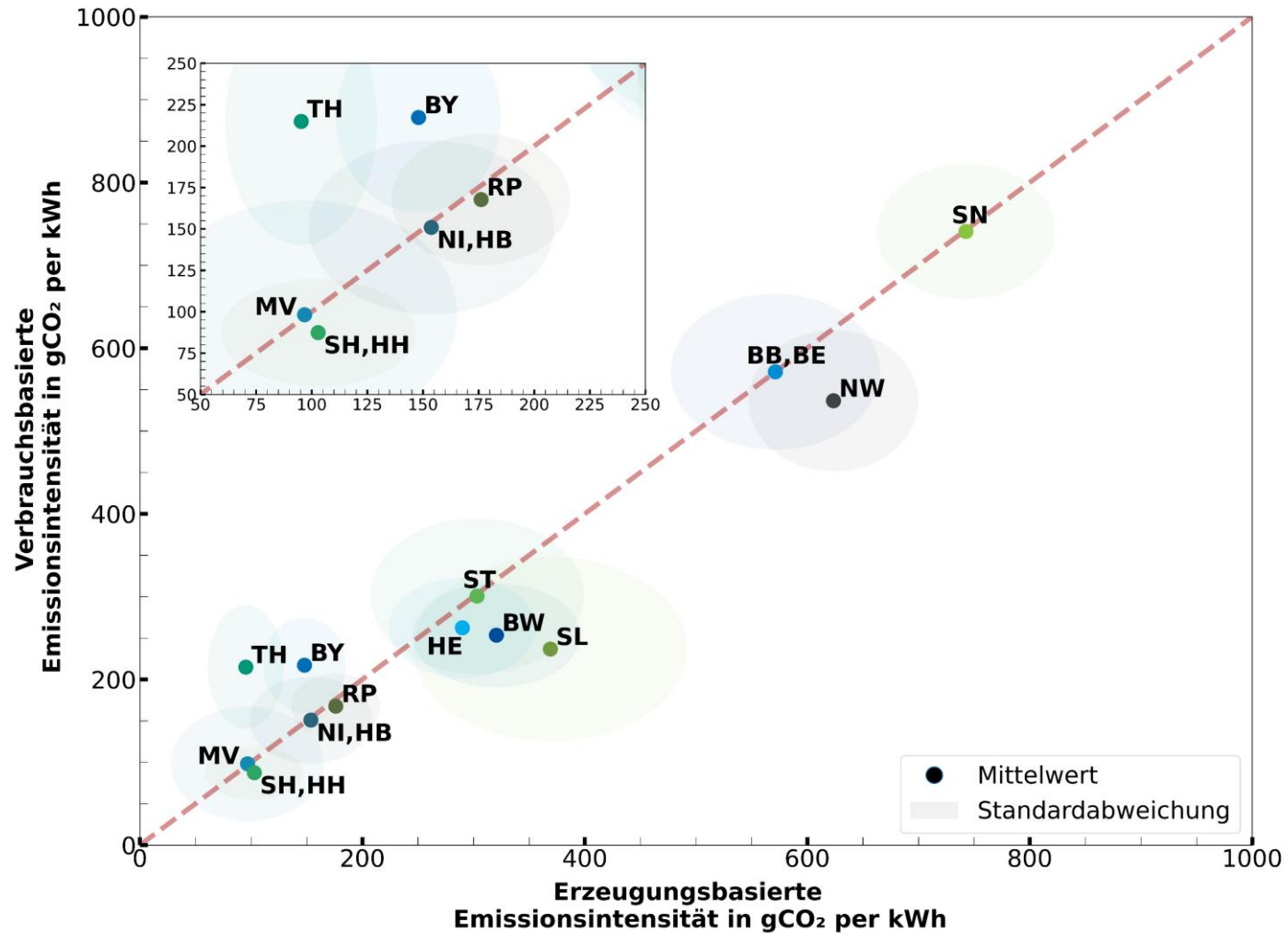
Flow-Tracing Algorithmus

- Unterteilung des regionalen Stromverbrauchs nach
 - Lokaler Erzeugung und
 - Ursprungsort und Erzeugungstyp der Importe



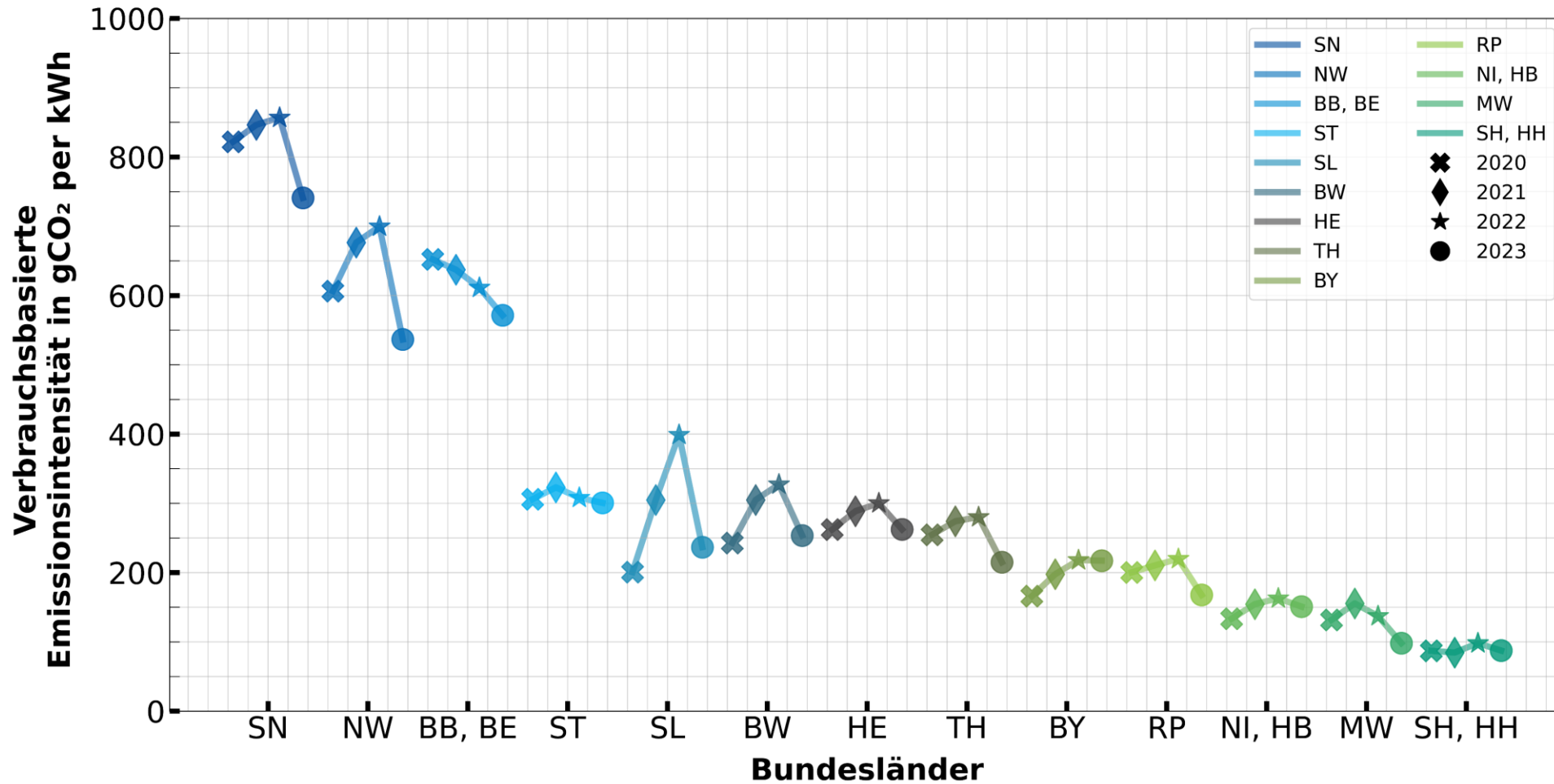
Regionale Emissionsintensitäten 2023

Erzeugungsbasiert vs. verbrauchs basiert

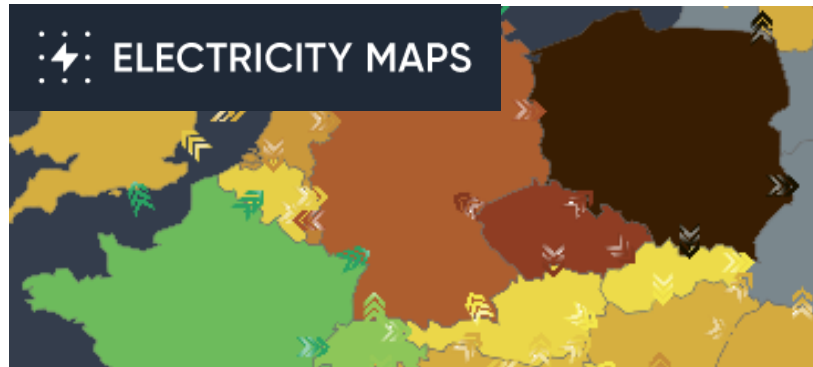


Regionale Emissionsintensitäten 2020-2023

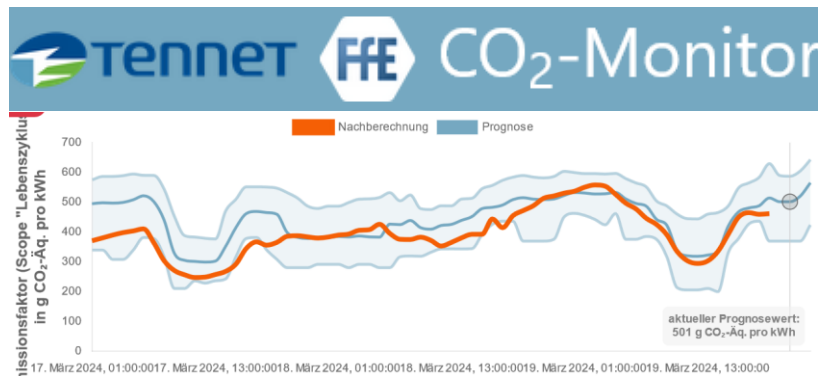
Verbrauchs basiert



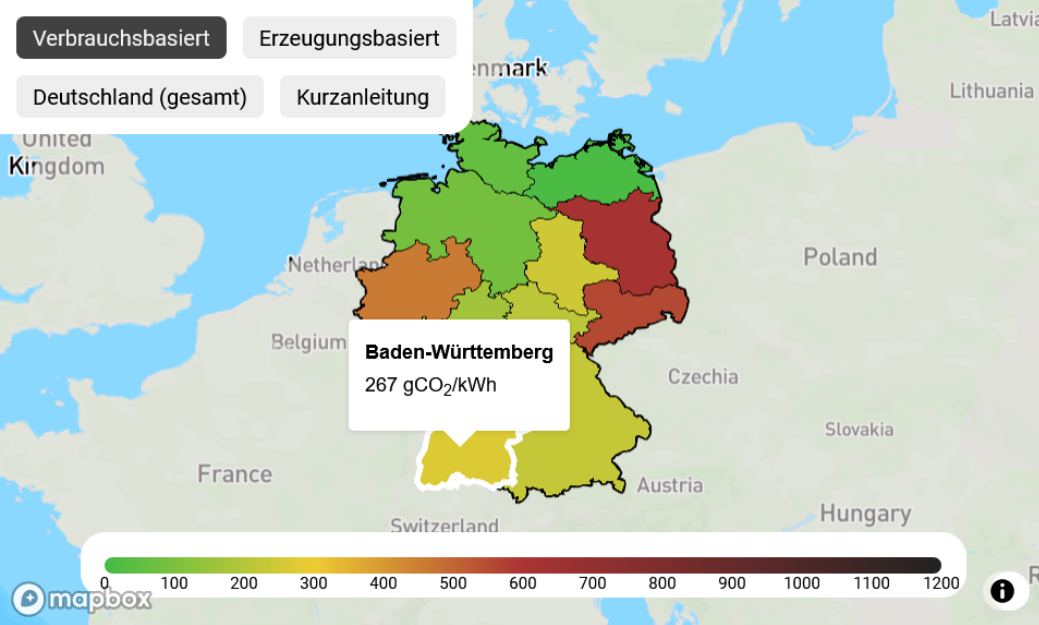
Vergleich mit anderen Projekten



- Internationale Perspektive
- Räumliche Auflösung auf Gebotszonen begrenzt
- „Close-to-real-time“, Prognosewerte
- Kommerzieller Anbieter, historische Daten frei verfügbar
- Direkte und lebenszyklusbasierte Emissionsfaktoren



- Fokus auf Deutschland, gesamtdeutscher Strommix
- „Close-to-real-time“, Prognosewerte
- Skalierung der Eingangsdaten anhand statistischer Daten
- Direkte und lebenszyklusbasierte Emissionsfaktoren



CO₂Map.de

Zusammenfassung

Modellbasierte Abschätzung regionaler Erzeugungs- und Lastdaten

Erzeugungs- und verbrauchs-basierte Emissionsintensitäten

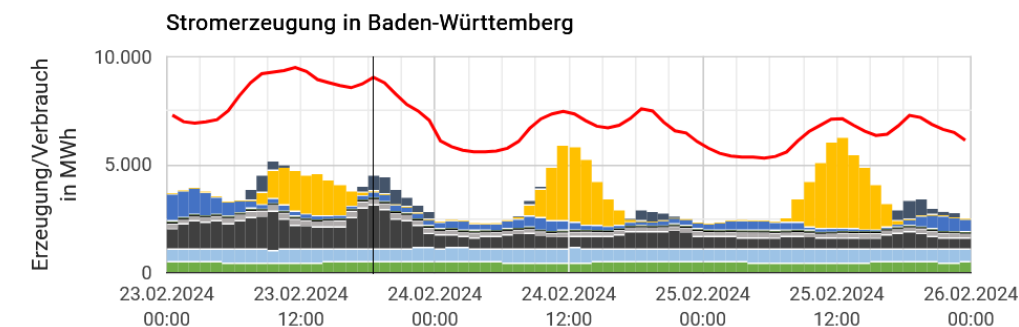
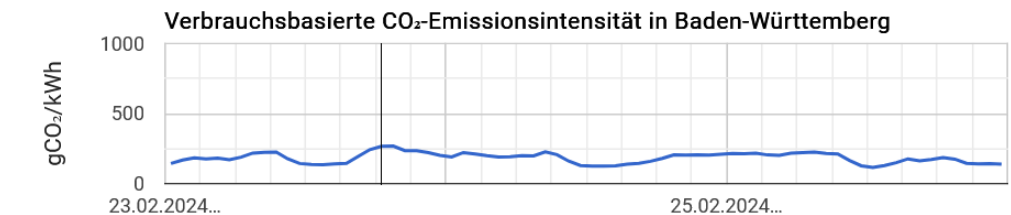
- Stündliche Auflösung, Bundeslandebene
- Visualisierung und API

Transparenz der Methodik

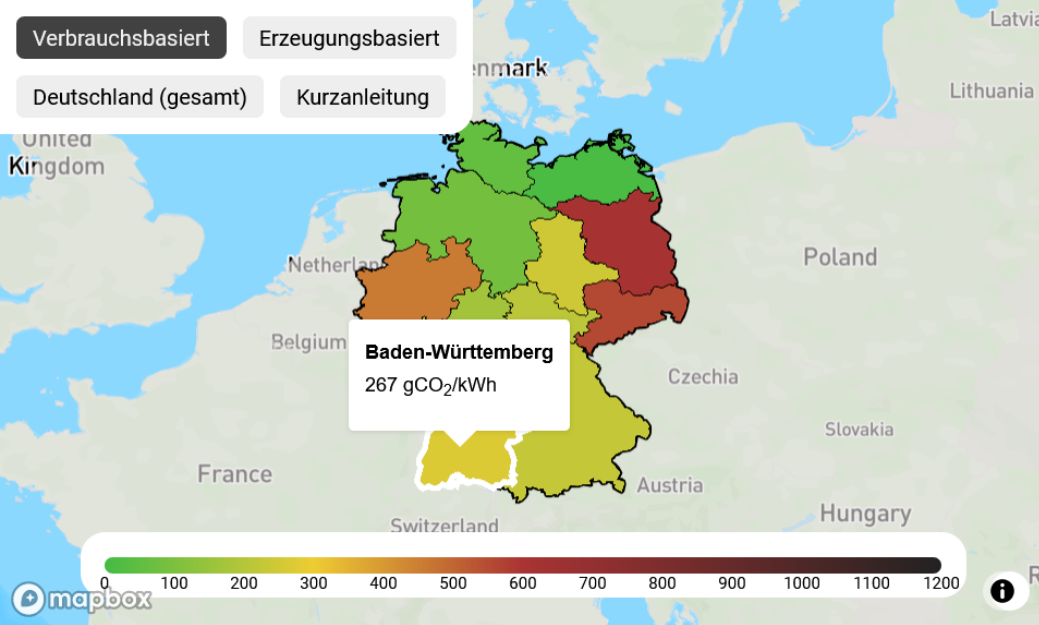
- Ausschließlich offene Daten
- Code wird verfügbar gemacht
- Detailliertes Methodenpapier wird in Kürze veröffentlicht

Wir freuen uns über Hinweise und Feedback!

- Kontakt: contact@co2map.de



„Deep Dive“ Methodik



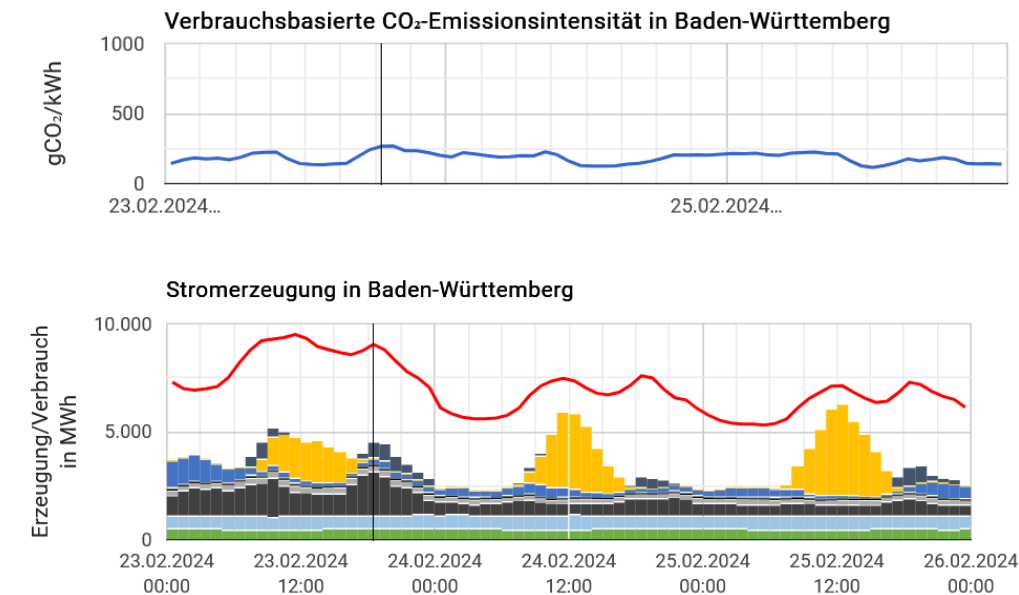
Überblick Methodik

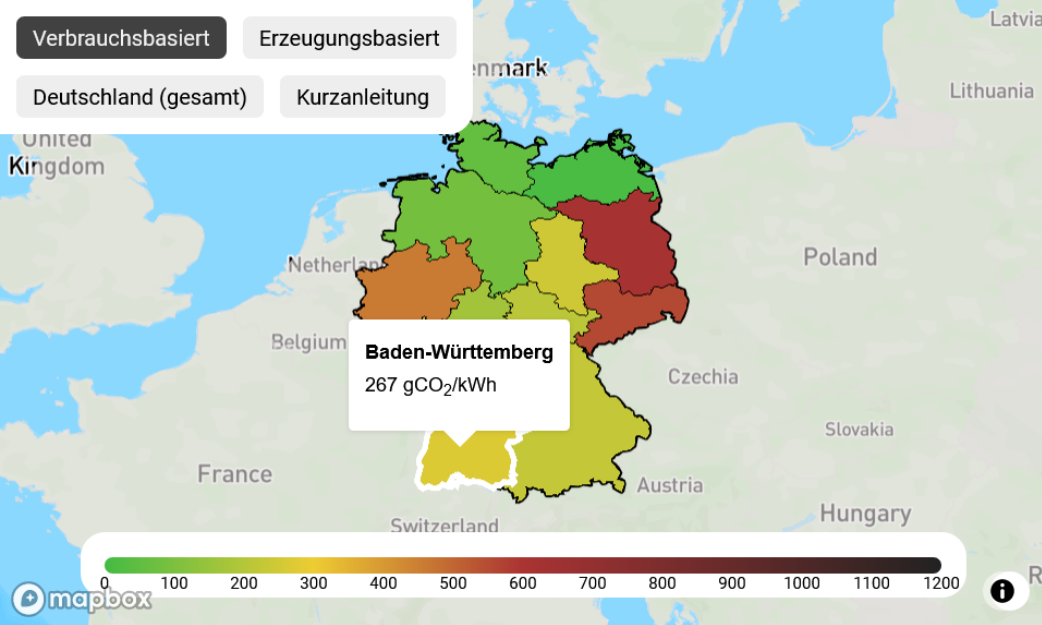
Abfolge der einzelnen Schritte

1. Balancing
2. Regionalisierung
3. Regionale Stromflüsse
4. Flow Tracing
5. Emissionsintensitäten

Erzeugungsbasierte Emissionsintensitäten: 2 & 5

Verbrauchs basierte Emissionsintensitäten: 1,2,3,4 & 5

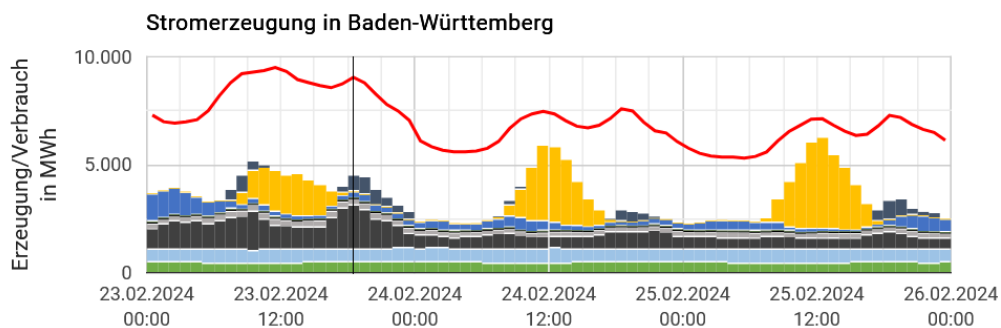
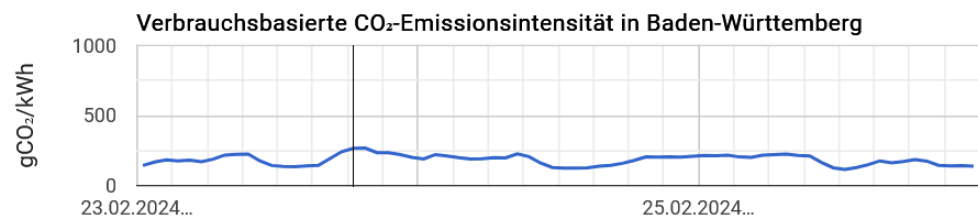




Überblick Methodik

Abfolge der einzelnen Schritte

1. Balancing
2. Regionalisierung
3. Regionale Stromflüsse
4. Flow Tracing
5. Emissionsintensitäten



Regionalisierung

Inputdaten und Regionalisierungsfaktoren

Für Deutschland stammen die **Erzeugungs- und Lastdaten von ENTSO-E:**

- Actual Generation per Production Type [16.1.B&C]
- Actual Total Load [6.1.A]

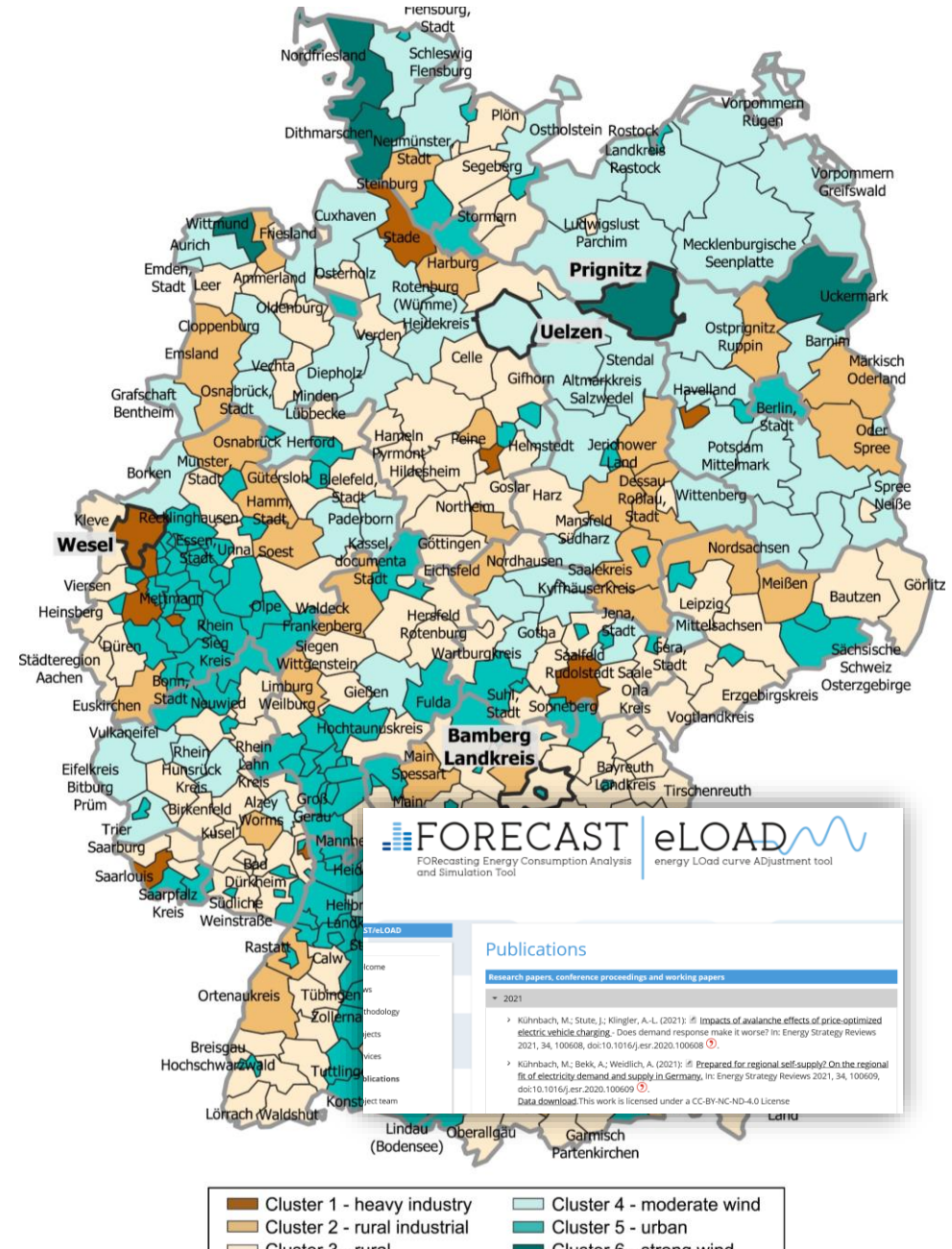
Input-Daten von ENTSO-E werden direkt übernommen, es findet **keine Korrektur oder Skalierung** anhand statistischer Daten statt

Für jeden Erzeugungstyp sowie für die Last werden die nationalen Daten mittels stündlicher **Regionalisierungsfaktoren** auf die Bundesländer aufgeteilt:

$$Erzeugung(Region, t, Typ) = Erzeugung(DE, t, Typ) \cdot Regionalisierungsfaktor(Region, t, Typ)$$

Regionalisierung Stromverbrauch (Last)

- M. Kühnbach, A. Bekk, A. Weidlich (2021): *Prepared for regional self-supply? On the national fit of electricity demand and supply in Germany*. Energy Strategy Reviews 2021, 34, 100609.
- Modellbasierter historischer Datensatz für Deutschland (2015) auf NUTS3 Ebene (Kreise und kreisfreie Städte)
- Aggregiert auf Bundeslandebene, zeitliche Verschiebung („Montag = Montag“)



Regionalisierung

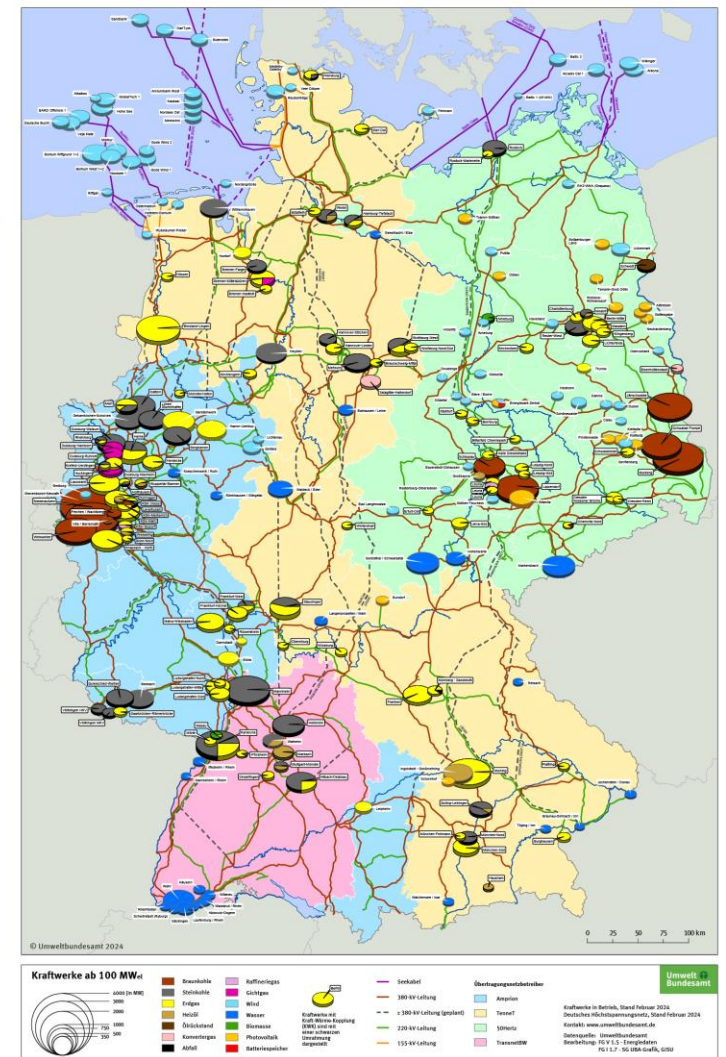
Erzeugung (außer Wind Onshore, Wind Offshore, Photovoltaik)

Blockscharfe Erzeugungsdaten von ENTSO-E

- Actual Generation Output per Generation Unit [16.1.A]
- Erzeugungseinheiten mit Kapazität größer 100 MW
- Stündliche Auflösung

Erzeugungskapazität per Erzeugungstyp für jedes Bundesland, abgeleitet aus dem Marktstammdatenregister (monatlich aktualisiert)

Kraftwerke und Verbundnetze in Deutschland



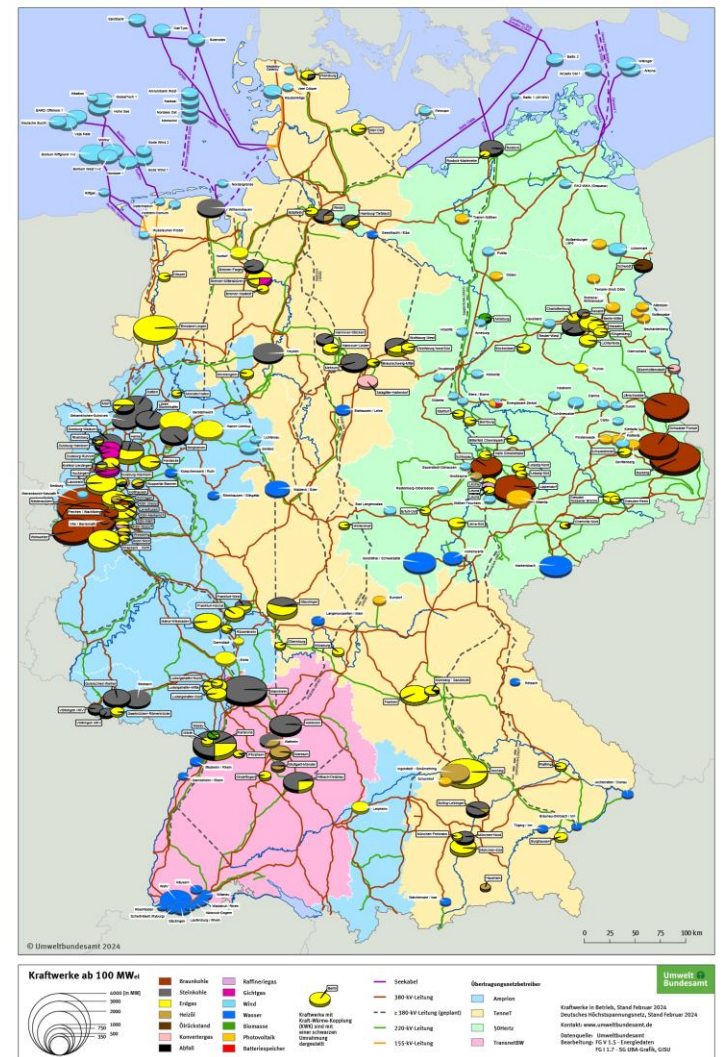
[Umweltbundesamt (2024)]

Blockscharfe Erzeugungsdaten (12/2023)

Kapazität der meldenden Einheiten

Erzeugungstyp	per_unit Einheiten	per_unit Kapazität	MaStR Kapazität
Braunkohle	29	17,74 GW	18,23 GW
Steinkohle	36	16,25 GW	17,68 GW
Erdgas	56	11,74 GW	33,16 GW
Wasserkraft	7	690 MW	5,36 GW
Pumpspeicher	38	6,20 GW	9,74 GW

Kraftwerke und Verbundnetze in Deutschland



[Umweltbundesamt (2024)]

Regionalisierung

Erzeugung (außer Wind Onshore, Wind Offshore, Photovoltaik)

Regionalisierung zuerst anhand blockscharfer Erzeugungszeitreihen, verbleibende Erzeugung wird anhand der Verteilung der Erzeugungskapazitäten auf die Bundesländer verteilt:

1. **Erzeugungskapazität pro Bundesland** aus dem Marktstammdatenregister (monatlich aktualisiert)
2. Zuordnung der **blockscharfen Erzeugungszeitreihen** auf die Bundesländer
3. Kapazität der zugeordneten Blöcke wird von den jeweiligen Kapazitäten auf Bundeslandebene abgezogen
4. Bereits zugeordnete Erzeugung wird von der national gemeldeten Erzeugung abgezogen
5. **Verbleibende Erzeugung** wird proportional zu den verbleibenden Kapazitäten auf die Bundesländer verteilt

Regionalisierung

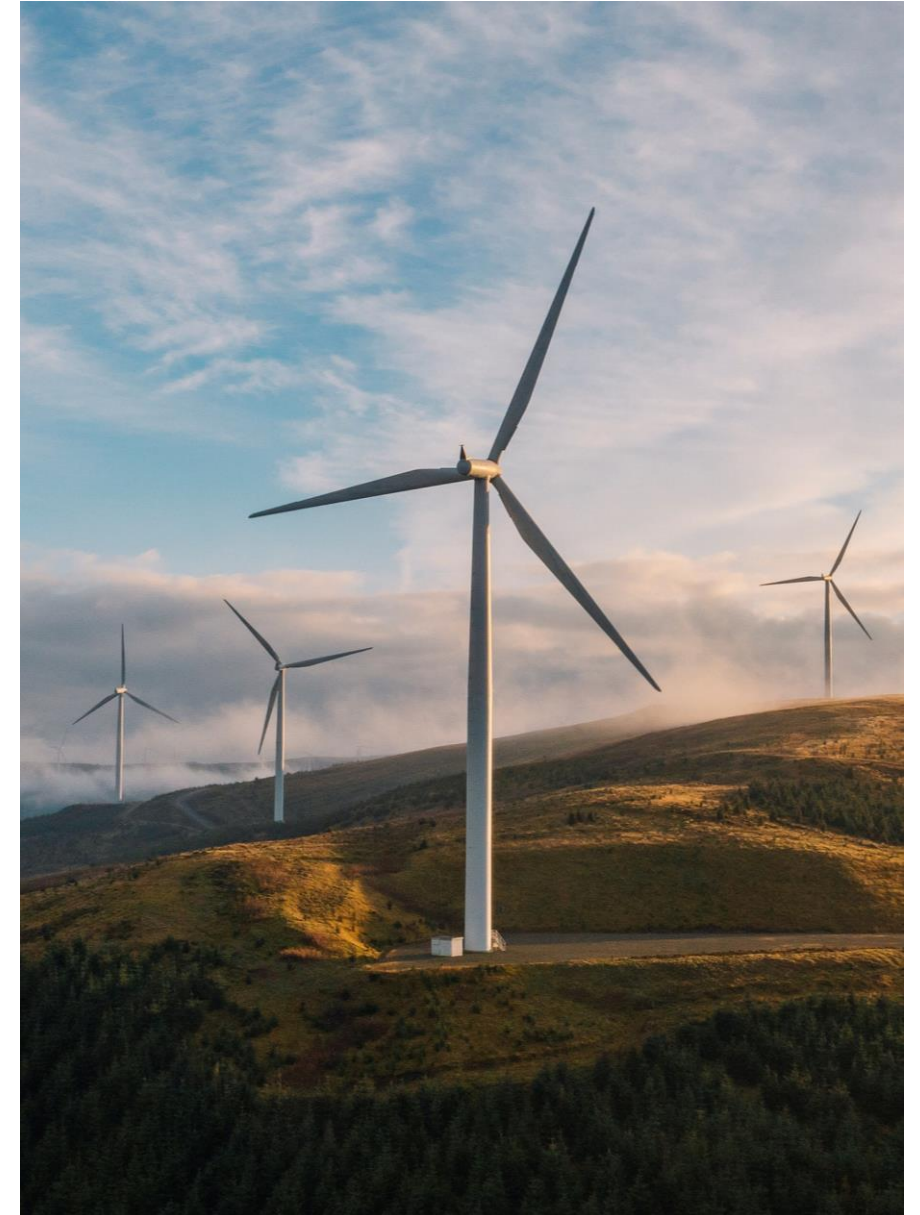
Erzeugung: Wind Onshore/Offshore und Photovoltaik

Eingangsdaten:

- Stündliche Wetterdaten (ERA5 Reanalysis)
- Erzeugungseinheiten Wind und Photovoltaik aus Marktstammdatenregister

Simulation der stündlichen Erzeugung mittels *atlite*,
Aggregation auf Bundeslandebene

Anteil der simulierten Erzeugung pro Bundesland wird als
Regionalisierungsfaktor verwendet

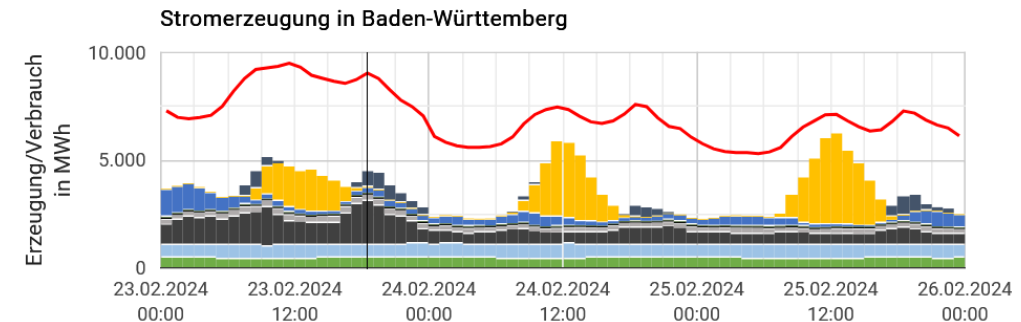
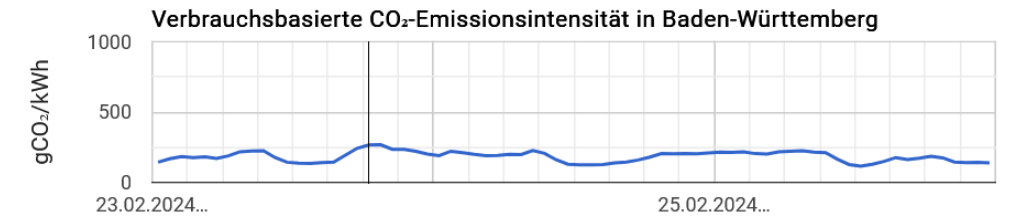
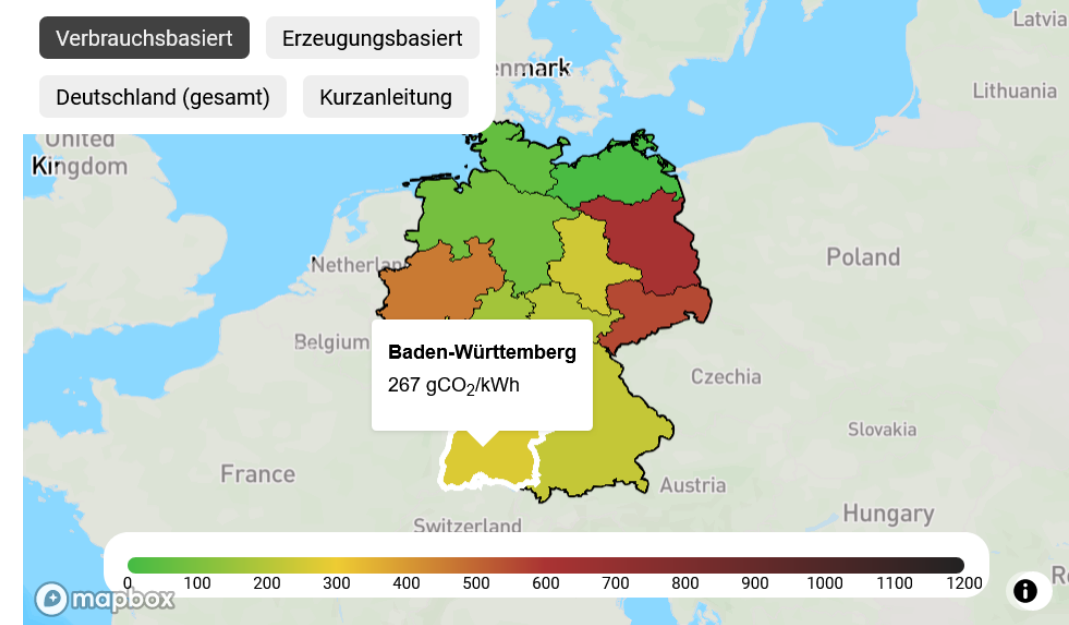


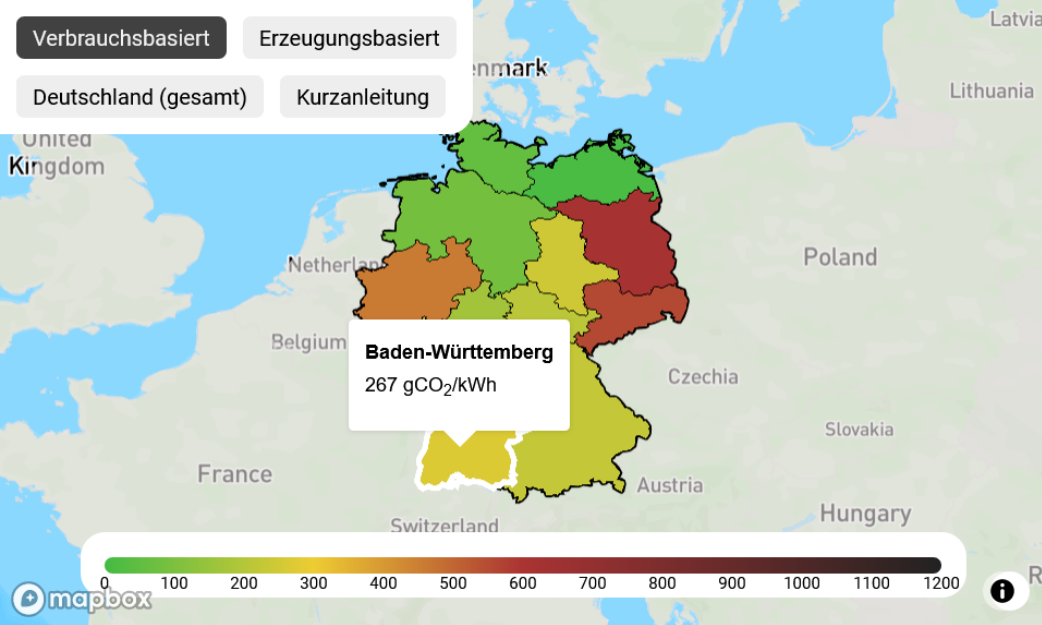
Zeitliche Verfügbarkeit der Eingangsdaten

Blockscharfe Erzeugungszeitreihen und ERA5 Wetterdaten erst verzögert verfügbar

Zeitliche Abfolge

- Vorläufige Regionalisierung anhand der Verteilung der Kapazitäten auf die Bundesländer; Wetterdaten aus DWD ICON D2 Modell
- Nach sieben Tagen Aktualisierung der Regionalisierung (blockscharfe Erzeugungszeitreihen, ERA5 Reanalysis Wetterdaten)

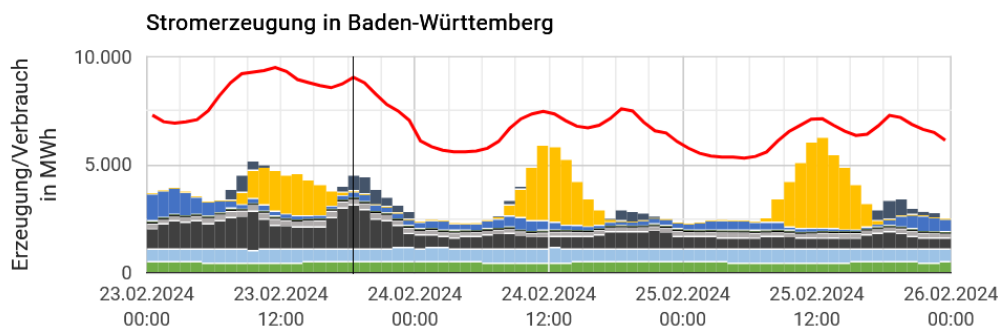
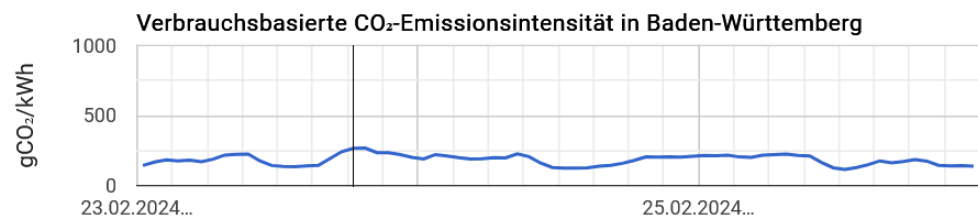




Überblick Methodik

Abfolge der einzelnen Schritte

1. Balancing
2. Regionalisierung
3. Regionale Stromflüsse
4. Flow Tracing
5. Emissionsintensitäten



Balancing

Korrektur der Erzeugungs-, Last- und Stromflussdaten

Für Länder im ENTSO-E Verbund sowie Großbritannien, Republik Irland und Nordirland stündliche Werte für

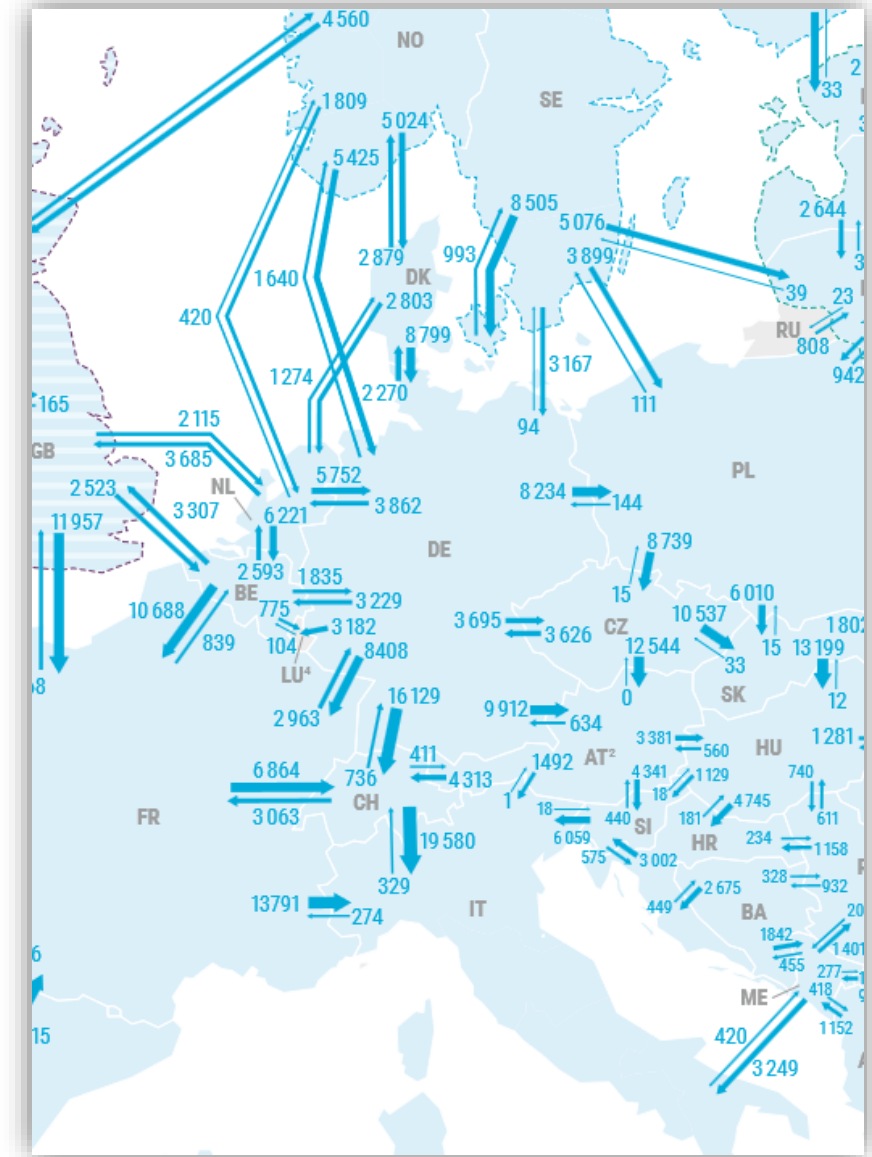
- Erzeugung per Erzeugungstyp
- Last
- Grenzüberschreitende Stromflüsse (physical flows)

Im Allgemeinen **keine ausgeglichene Bilanz in den Eingangsdaten:**

eingehende Stromflüsse + Erzeugung

≠

ausgehende Stromflüsse + Last

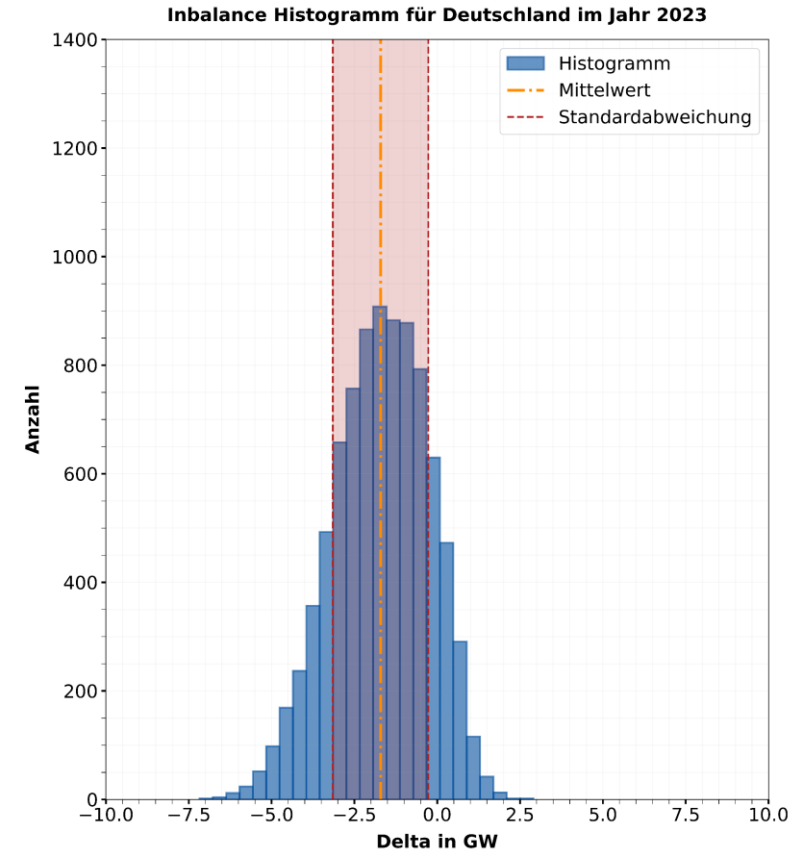
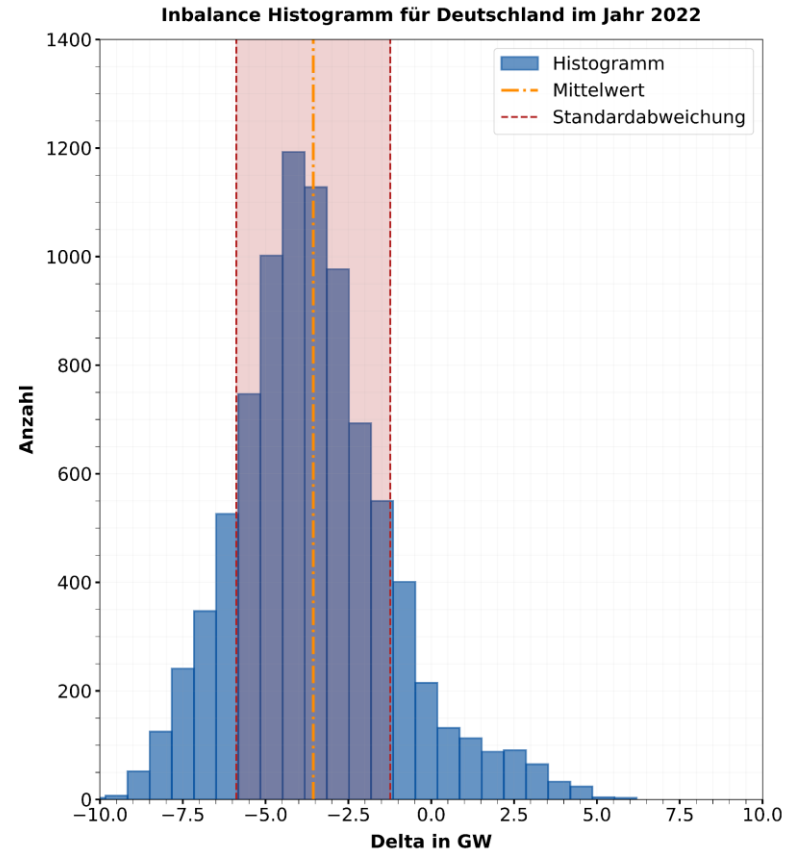


[ENTSO-E Statistical Factsheet 2022]

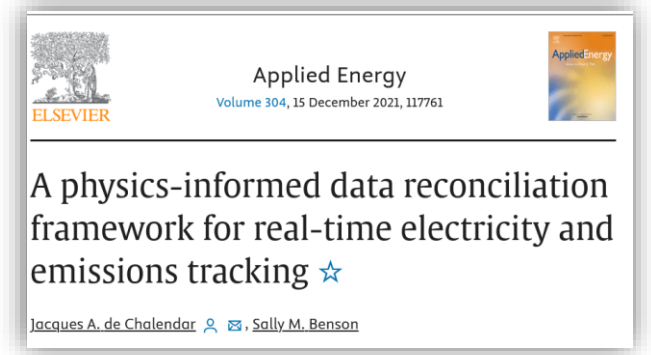
Balancing

Beispiel Deutschland (2022 und 2023)

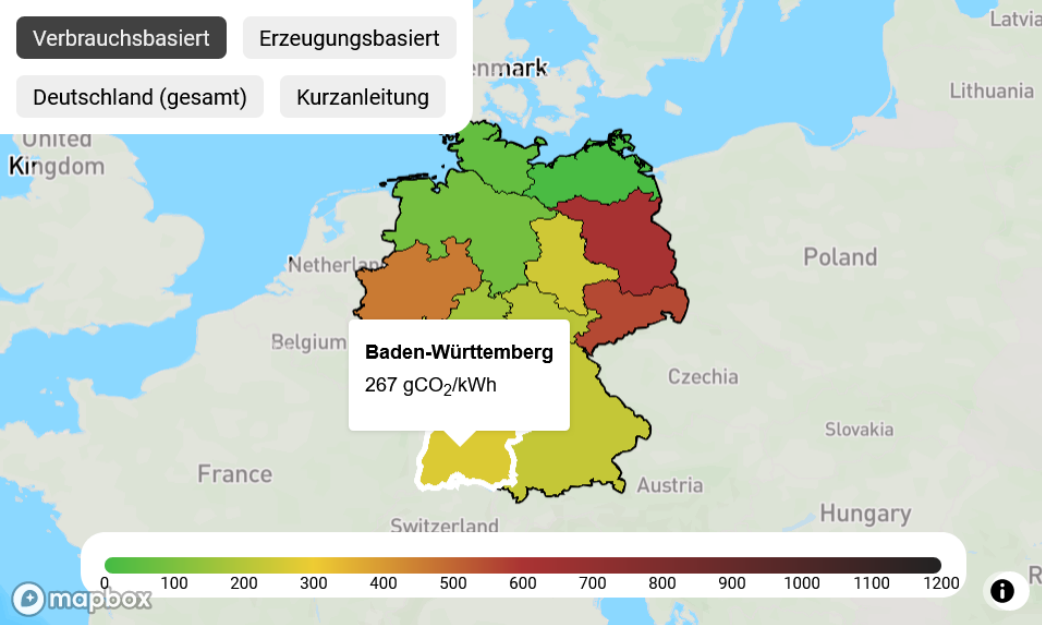
„Inbalance“:
Stündliche Differenz zwischen
Erzeugung zzgl. eingehenden
Stromflüssen und Last zzgl.
Ausgehenden Stromflüssen



Balancing Korrekturalgorithmus



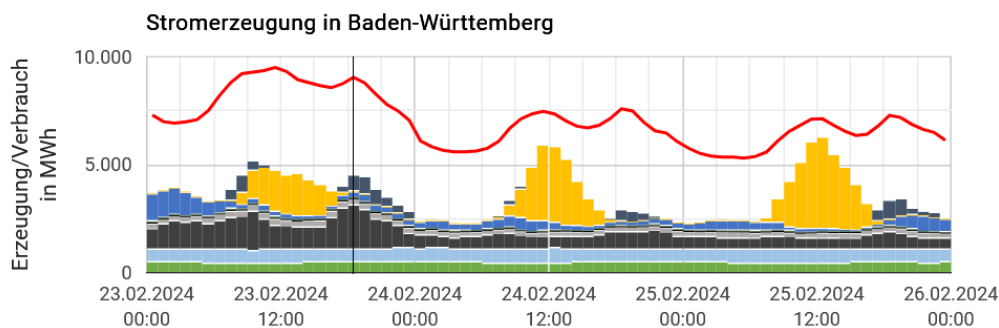
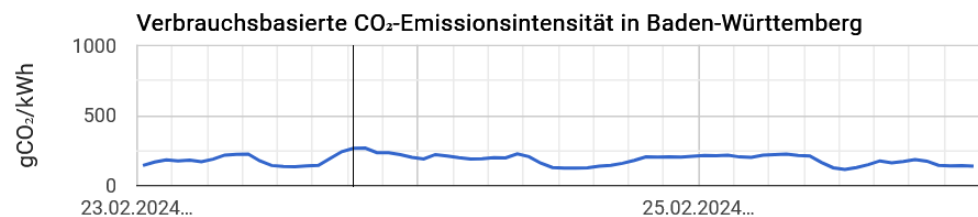
- Korrekturen für stündliche Werte von Erzeugung, Last und grenzüberschreitenden Stromflüssen
- Notwendige Randbedingung: In jedem Land ist die **Bilanz gewährleistet**
- **Optimierungsproblem**: Minimierung der quadrierten gewichteten Summen der Korrekturterme
- **Gewichte**:
 - Skalierung: fortlaufender Mittelwert der entsprechenden Größe (bei durchschnittlich 1 GW Erzeugung „zählt“ eine Korrektur von 100 MW so viel wie eine Korrektur von 10 MW bei einer durchschnittlichen Erzeugung von 100 MW)
 - Priorisierung: Relative Gewichte werden so gewählt, dass Korrekturen von Erzeugungs-, Last- und Stromflussdaten zu Deutschland möglichst gering gehalten werden



Überblick Methodik

Abfolge der einzelnen Schritte

1. Balancing
2. Regionalisierung
- 3. Regionale Stromflüsse**
4. Flow Tracing
5. Emissionsintensitäten



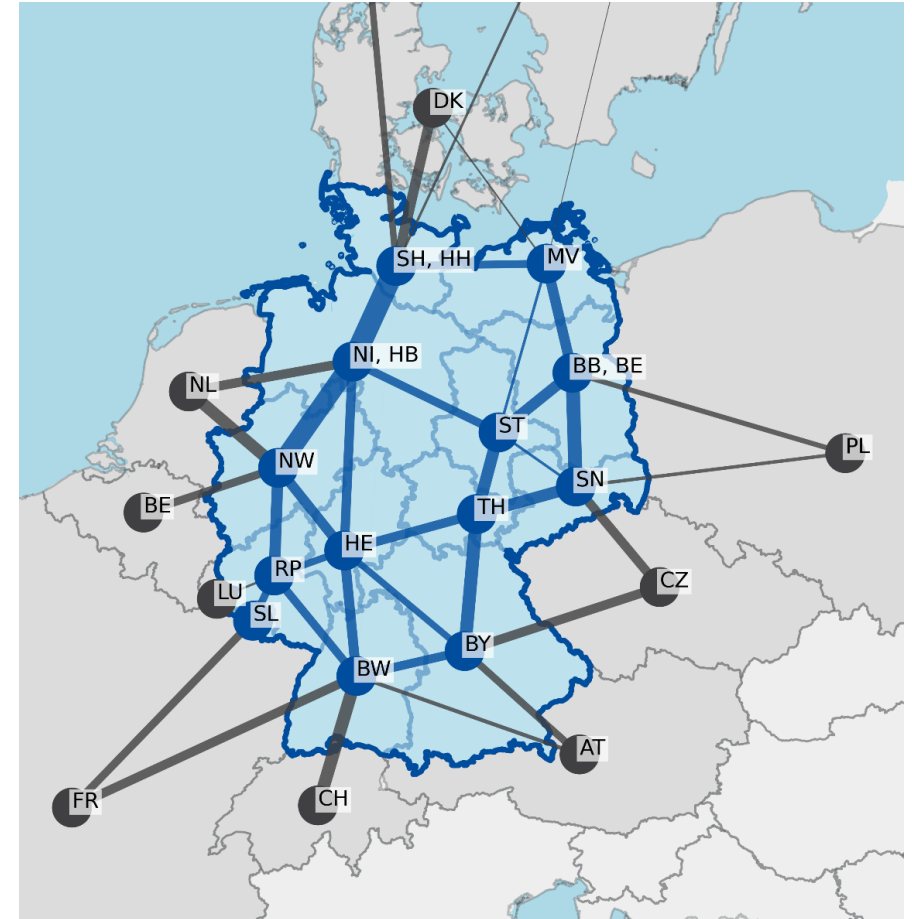
Regionale Stromflüsse

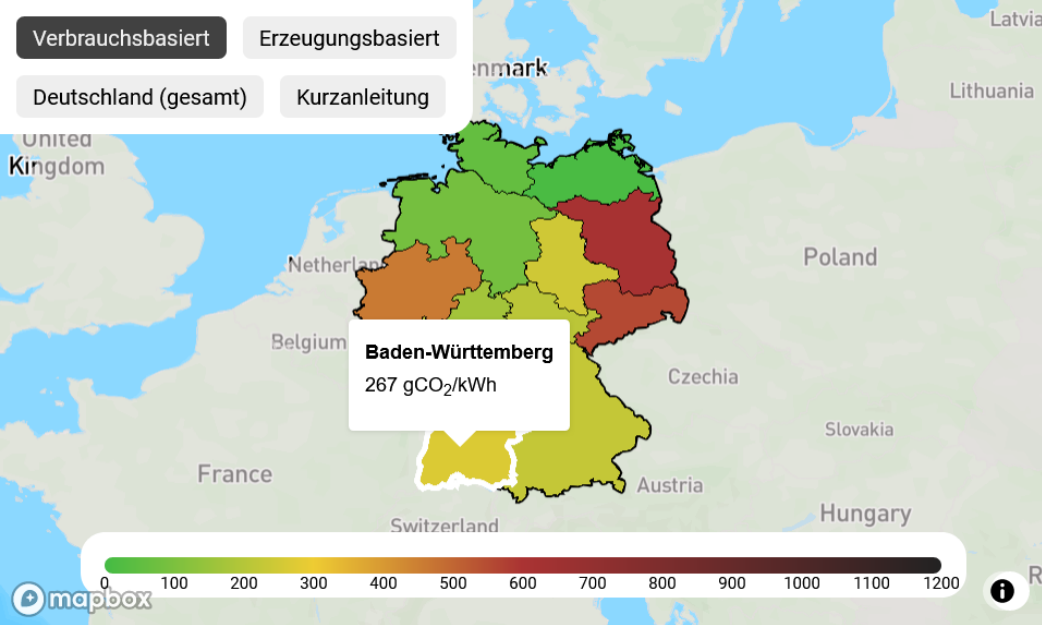
Modellbasierte Abschätzung

Berechnung der bilanziellen **Netto-Exporte und Netto-Importe** für alle Regionen (Bundesländer und Europäische Nachbarstaaten)

Bestimmung der regionalen Stromflüsse:

- Stromflüsse müssen **Bilanz** erfüllen
- Stromflüsse sind durch **Übertragungskapazitäten** begrenzt (Kapazitäten aus dem Energiesystemmodell PyPSA-Eur abgeleitet)
- Minimierung der Summe der quadrierten Flüsse (keine loop flows, physikalisch motiviert)

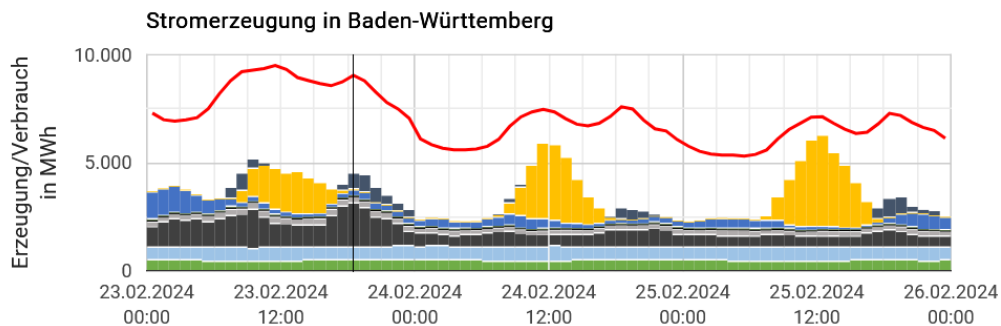
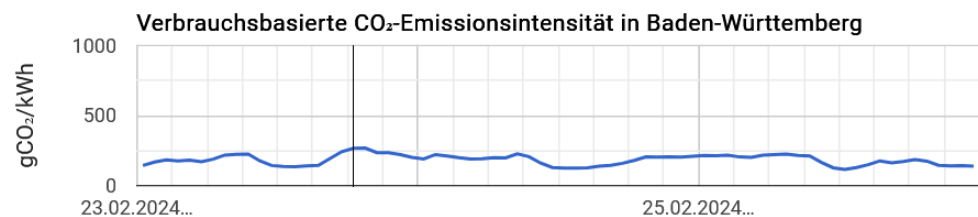




Überblick Methodik

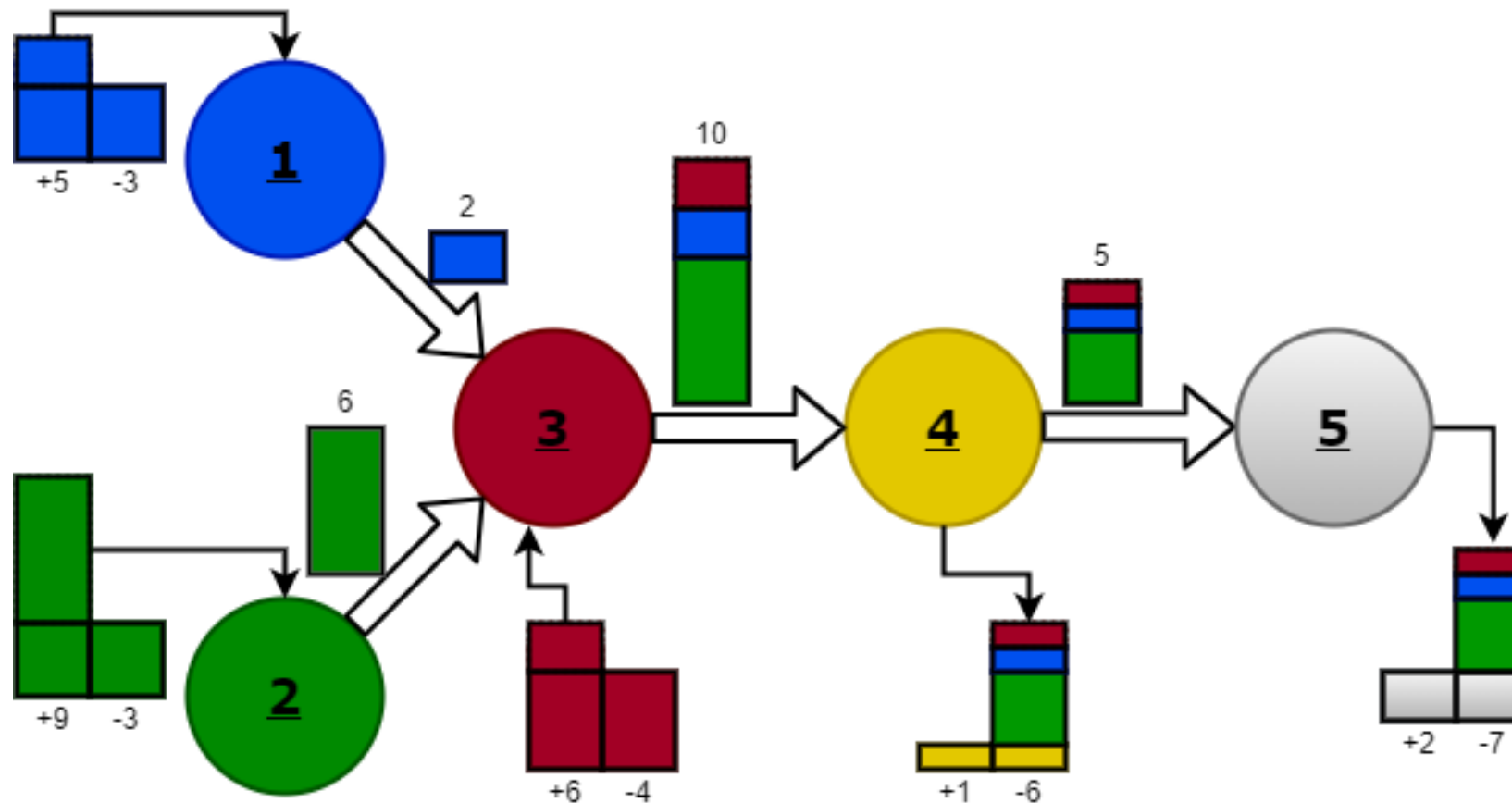
Abfolge der einzelnen Schritte

1. Balancing
2. Regionalisierung
3. Regionale Stromflüsse
- 4. Flow Tracing**
5. Emissionsintensitäten



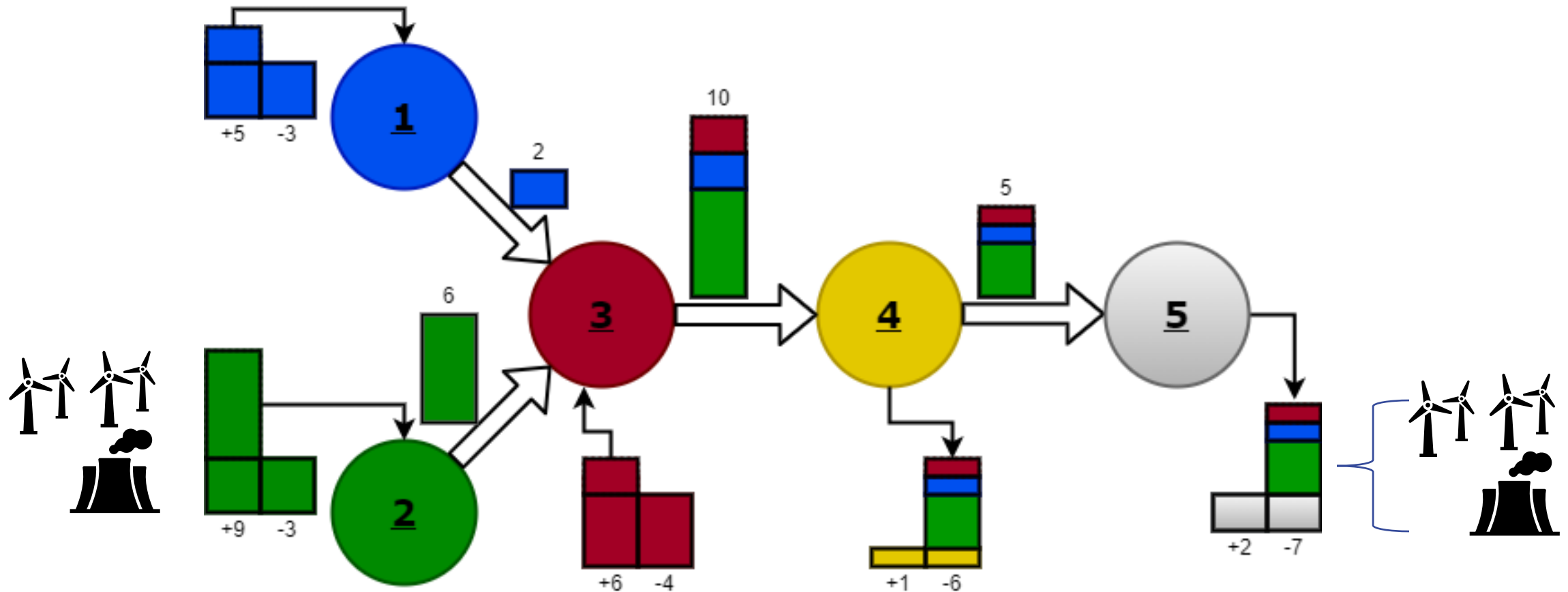
Flow Tracing

Netto-Exporte und Netto-Importe über Stromflüsse verbunden



Flow Tracing

Importierter Strommix aus Herkunft der Importe abgeleitet

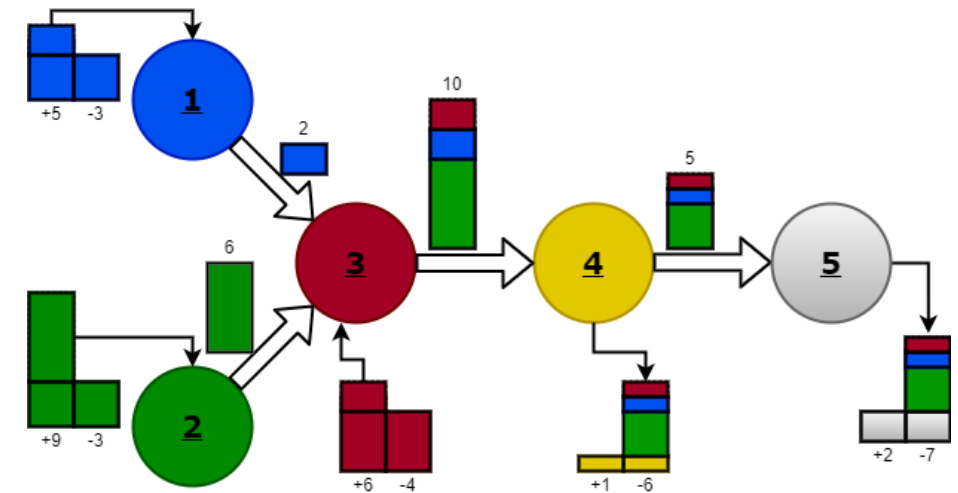


Flow Tracing

„Direct coupling“ vs. „Aggregated coupling“

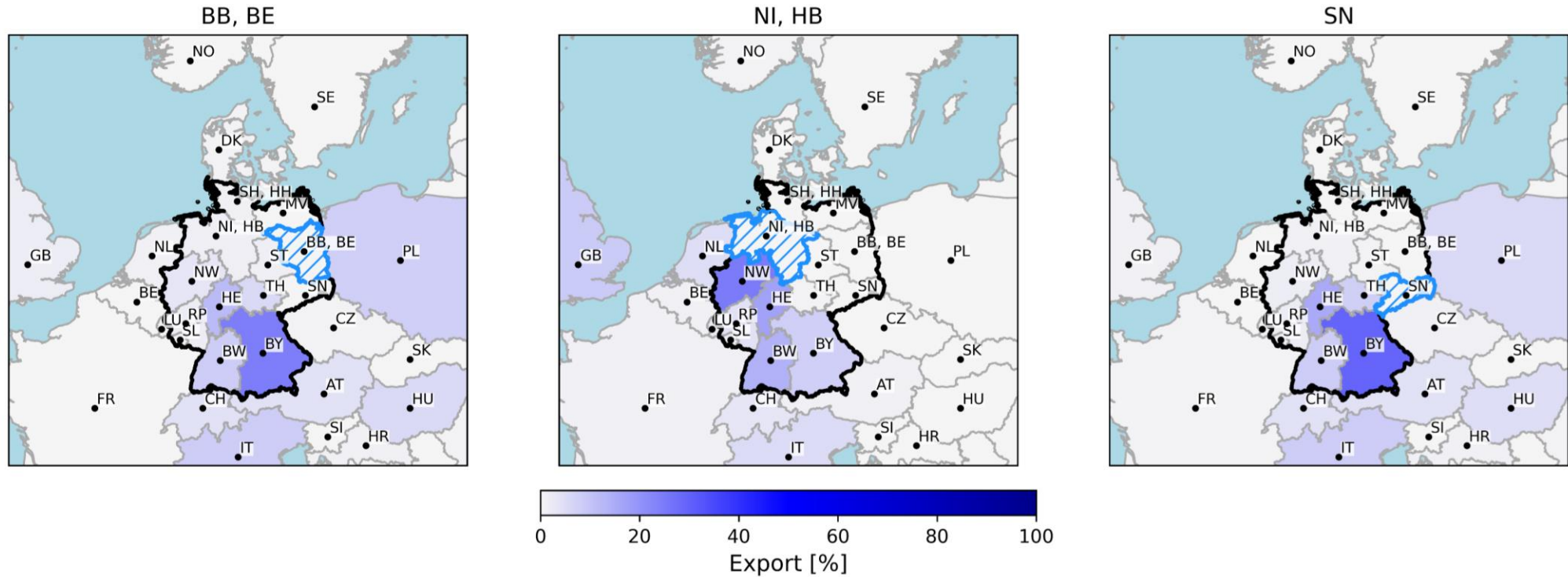
- CO2Map.de verwendet „aggregated coupling“, hier werden Netto-Exporte und Netto-Importe an das Netzwerk gekoppelt – bilanzielle Importe entsprechen „Flow Tracing“-Importen
- Alternative Variante „direct coupling“, hier werden Erzeugung und Last an das Netzwerk gekoppelt – bilanzielle Importe entsprechend nicht den „Flow Tracing“-Importen

(siehe Schäfer et al., Tracing carbon dioxide emissions in the European electricity markets, EEM 2020)



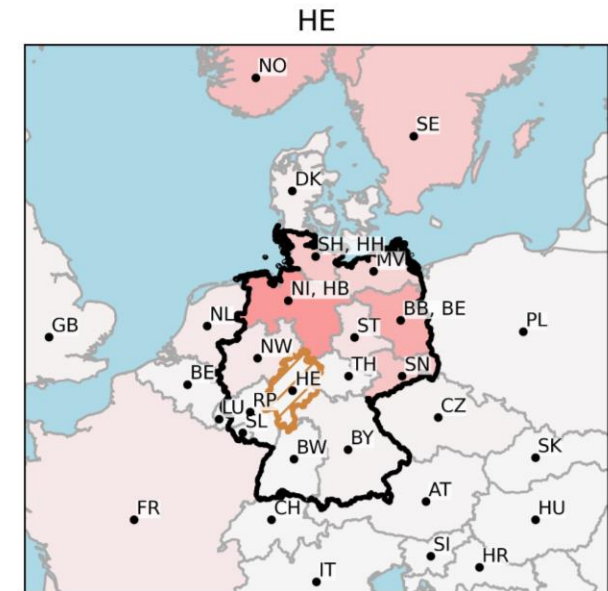
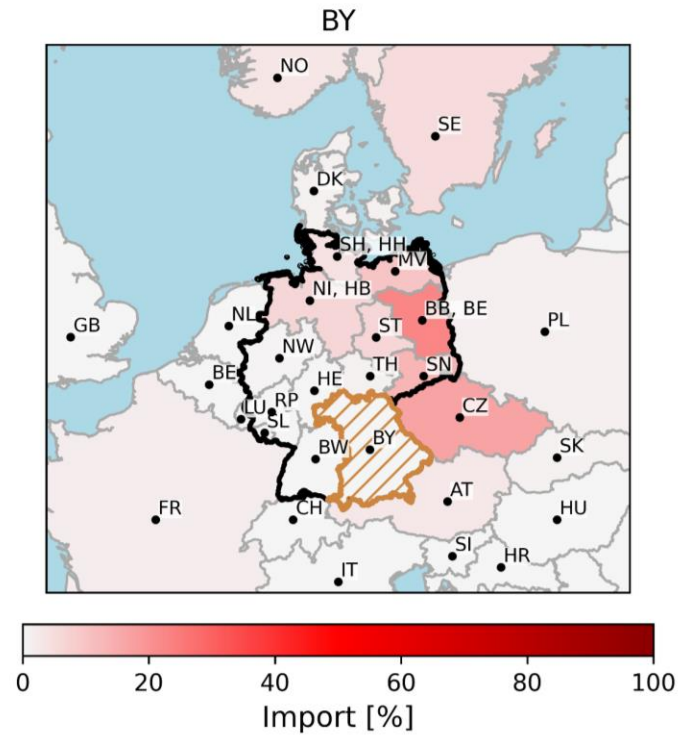
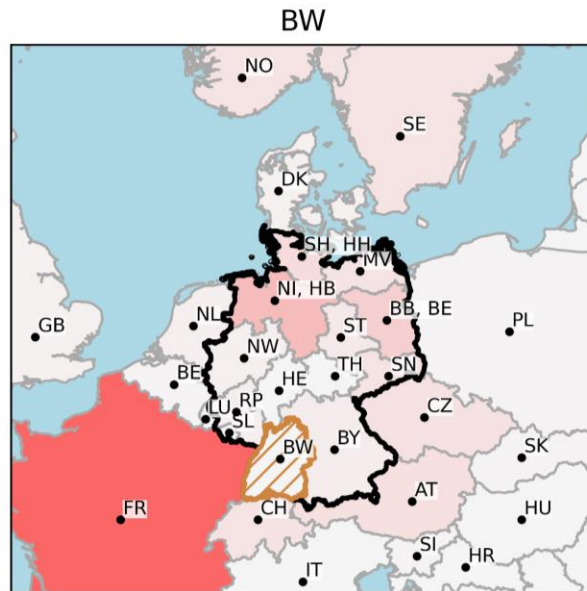
Flow Tracing

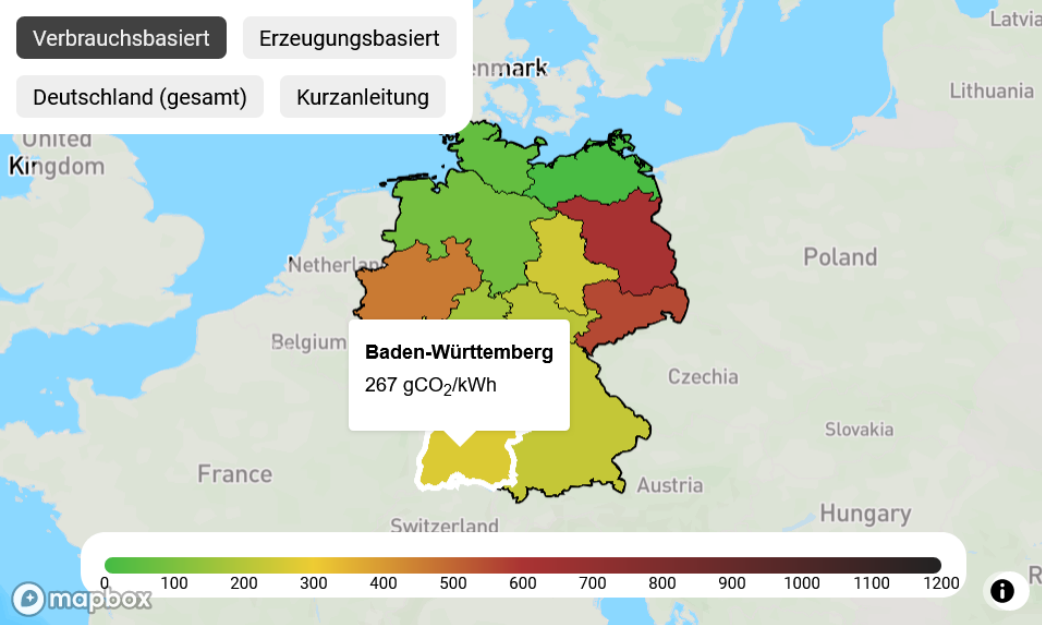
Beispielsergebnisse: Räumliche Verteilung der Exporte



Flow Tracing

Beispielsergebnisse: Räumliche Verteilung der Importe

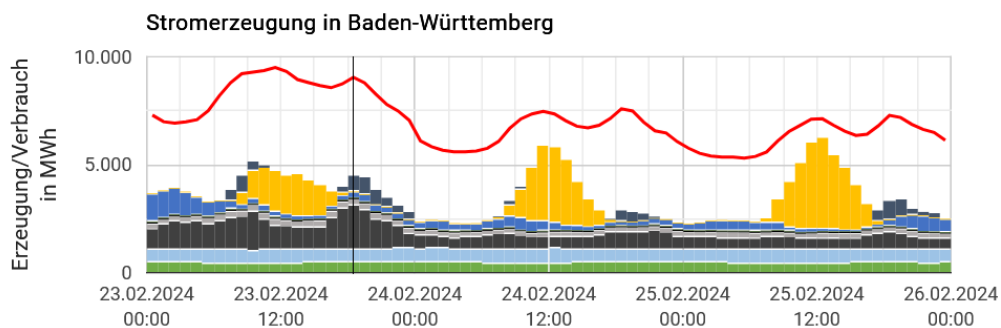
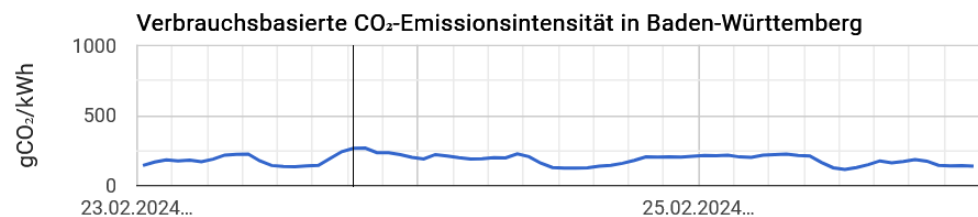




Überblick Methodik

Abfolge der einzelnen Schritte

1. Balancing
2. Regionalisierung
3. Regionale Stromflüsse
4. Flow Tracing
- 5. Emissionsintensitäten**



Emissionsfaktoren per Erzeugungstyp

Gruppierung

Bezeichnung	ENTSO-E Erzeugungstyp
Braunkohle	Fossil Brown coal / Lignite
Steinkohle	Fossil Hard Coal
Erdgas	Fossil Gas
Sonstige	Fossil Oil, Other, Waste, Fossil Coal-derived gas, Fossil oil shale, Fossil Peat
Biomasse	Biomass
Sonstige EE	Geothermal, Other renewable, Marine
Wasserkraft	Hydro Run-of-river and poundance, Hydro Water-Reservoir
Wind Onshore	Wind Onshore
Wind Offshore	Wind Offshore
Solar	Solar
Kernenergie	Nuclear

Emissionsfaktoren per Erzeugungstyp

Berechnung Emissionsfaktoren

Gemeldete Emissionen (Umweltbundesamt)

A Anhang 1: CO₂-Emissionen der Stromerzeugung gemäß Datenbank ZSE in Mio. t

	Braunkohlen	Steinkohlen	Erdgas	Mineralöle	Müll (fossil)	sonstige	gesamt
2018	146	62	30	4	9	19	271
2019	115	44	33	4	9	18	223
2020	93	33	34	3	9	17	189
2021**	110	42	33	3	8	18	215
2022**	116	49	29	3	8	17	223

* vorläufige Daten ** geschätzte Daten Rundungen können zu abweichenden Summen führen
 Quellen: Umweltbundesamt, ZSE; April 2023

[Umweltbundesamt 2023, Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2022]

Gemeldete Nettostromerzeugung (AG Energiebilanzen)

Nettostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern ¹⁾

TWh	2018	2019	2020	2021	2022
Braunkohle	135,0	105,1	84,5	101,7	108,0
Steinkohle	75,2	52,1	38,7	49,7	58,1
Kernenergie	71,9	71,0	60,9	65,4	32,8
Erdgas	78,5	87,0	91,7	87,5	76,5
Mineralöl	4,5	4,2	4,1	4,0	5,1
Erneuerbare, darunter:	216,5	234,6	244,3	226,6	247,6
- Wind onshore	88,7	99,2	102,7	88,5	97,7
- Wind offshore	19,2	24,4	26,9	24,0	24,8
- Wasserkraft ²⁾	17,9	20,0	18,5	19,5	17,5
- Biomasse	42,2	42,0	42,7	41,5	43,9
- Photovoltaik	43,5	44,3	48,5	48,4	59,1
- Hausmüll ³⁾	4,9	4,6	4,6	4,6	4,4
- Geothermie	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Sonstige, darunter:	25,0	23,3	22,7	22,3	21,7
- Pumpspeicher ⁴⁾	6,7	5,9	6,6	5,3	6,0
- Hausmüll ³⁾	4,9	4,6	4,6	4,6	4,4
- Industrieabfall	0,7	0,8	0,7	0,7	0,6
Nettostromerzeugung inkl. PSE	606,6	577,2	547,0	557,3	549,6
Nettostromerzeugung exkl. PSE	600,0	571,3	540,4	551,9	543,7
Anteil EE an der Nettostromerzeugung [%]	36,1	41,1	45,2	41,1	45,5

[AG Energiebilanzen e.V. 2023, Stromerzeugung nach Energieträgern (Strommix) von 1990 bis 2023 (in TWh) Deutschland insgesamt]

Emissionsfaktoren per Erzeugungstyp

Emissionsfaktoren (2022)

Nur Berücksichtigung direkter Emissionen:

- **Braunkohle:** 1074 gCO₂/kWh (Agrometer: 1100 gCO₂/kWh)
- **Steinkohle:** 844 gCO₂/kWh (Agrometer: 810 gCO₂/kWh)
- **Erdgas:** 379 gCO₂/kWh (Agrometer: 390 gCO₂/kWh)
- **Sonstige:** 1347 gCO₂/kWh (Agrometer: 1640 gCO₂/kWh)

Speicher:

- Einspeichern: Interpretation als Last
- Ausspeichern: Interpretation als Erzeugungstechnologie
(Emissionsfaktor aus mittlerer „Ladeintensität“: 392 gCO₂/kWh)

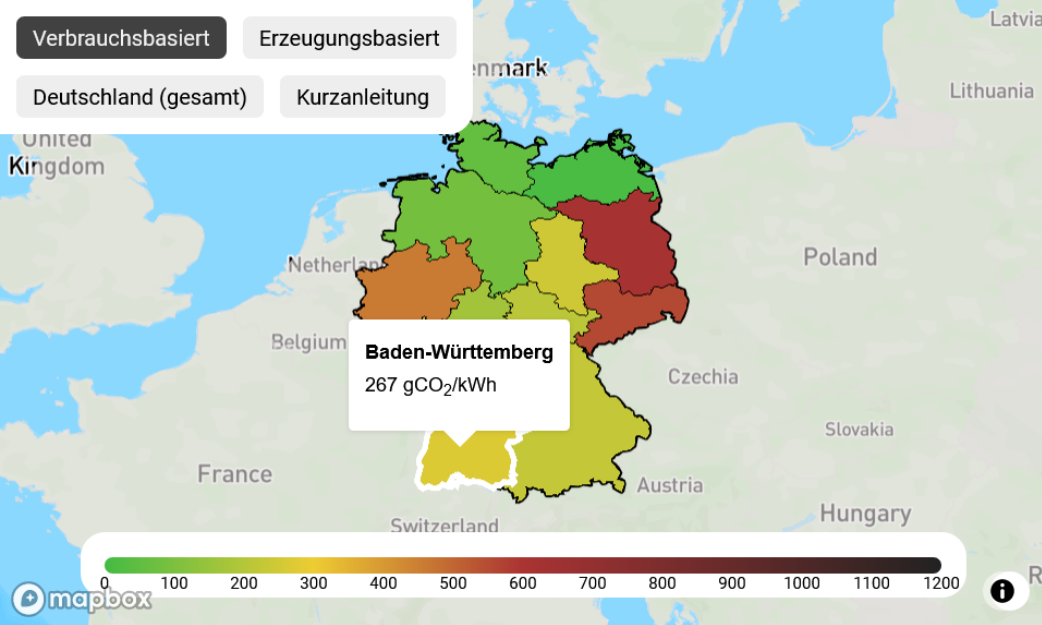
A Anhang 1: CO₂-Emissionen der Stromerzeugung gemäß Datenbank ZSE in Mio. t

	Braunkohlen	Steinkohlen	Erdgas	Mineralöle	Müll (fossil)	sonstige	gesamt
2018	146	62	30	4	9	19	271
2019	115	44	33	4	9	18	223
2020	93	33	34	3	9	17	189
2021**	110	42	33	3	8	18	215
2022**	116	49	29	3	8	17	223

* vorläufige Daten ** geschätzte Daten Rundungen können zu abweichenden Summen führen
Quellen: Umweltbundesamt, ZSE; April 2023

Nettostromerzeugung in Deutschland nach Energieträgern ¹⁾

	TWh	2018	2019	2020	2021	2022
Braunkohle		135,0	105,1	84,5	101,7	108,0
Steinkohle		75,2	52,1	38,7	49,7	58,1
Kernenergie		71,9	71,0	60,9	65,4	32,8
Erdgas		78,5	87,0	91,7	87,5	76,5
Mineralöl		4,5	4,2	4,1	4,0	5,1
Erneuerbare, darunter:		216,5	234,6	244,3	226,6	247,6
- Wind onshore		88,7	99,2	102,7	88,5	97,7
- Wind offshore		19,2	24,4	26,9	24,0	24,8
- Wasserkraft ²⁾		17,9	20,0	18,5	19,5	17,5
- Biomasse		42,2	42,0	42,7	41,5	43,9
- Photovoltaik		43,5	44,3	48,5	48,4	59,1
- Hausmüll ³⁾		4,9	4,6	4,6	4,6	4,4
- Geothermie		0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Sonstige, darunter:		25,0	23,3	22,7	22,3	21,7
- Pumpspeicher ⁴⁾		6,7	5,9	6,6	5,3	6,0
- Hausmüll ³⁾		4,9	4,6	4,6	4,6	4,4
- Industrieabfall		0,7	0,8	0,7	0,7	0,6
Nettostromerzeugung inkl. PSE		606,6	577,2	547,0	557,3	549,6
Nettostromerzeugung exkl. PSE		600,0	571,3	540,4	551,9	543,7
Anteil EE an der Nettostromerzeugung [%]		36,1	41,1	45,2	41,1	45,5



“Deep Dive” Methodik Zusammenfassung

1. Balancing
2. Regionalisierung
3. Regionale Stromflüsse
4. Flow Tracing
5. Emissionsintensitäten

- Wir freuen uns über **Korrekturen**, **Feedback** zur Methodik und Hinweise zu weiteren **Datenquellen!**
- Kontakt: contact@co2map.de

