

Zeitreihensimulation des deutschen Kraftwerkseinsatzes

Analyse von Szenarien für Energieerzeugung und Umweltauswirkungen

August 2023

Jan Priesmann, Christina Kockel, Aaron Praktiknjo

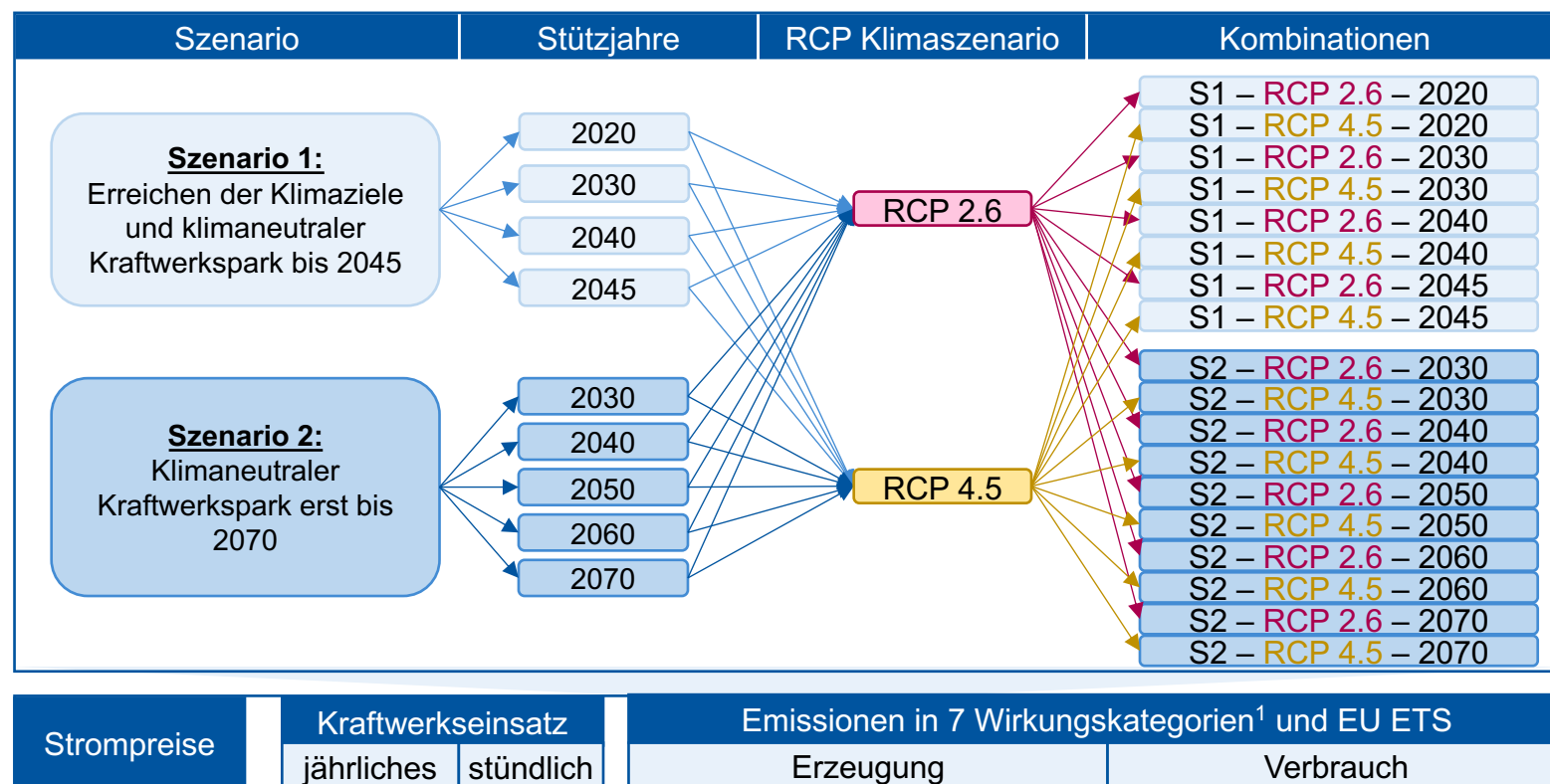
Lehrstuhl für Energiesystemanalyse

RWTH Aachen University

Zeitreihensimulation des deutschen Kraftwerkseinsatzes

Ziel

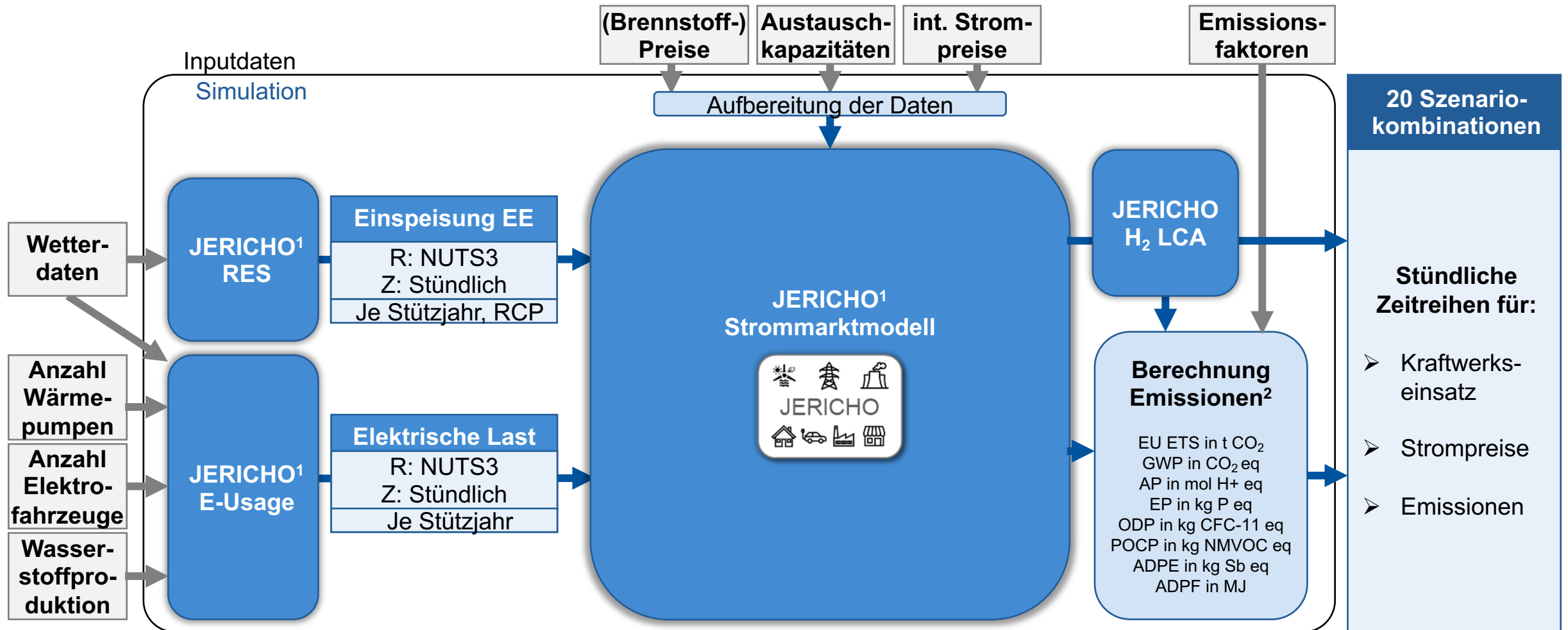
Berechnungen des **Kraftwerkseinsatzes**, der **Strompreise** und der **Emissionen** für unterschiedliche **energiepolitische Szenarien**, **Klimaszenarien** sowie **Stützjahre**



- Simulation der Strommarktzusammensetzung in **Deutschland** von **2020 bis 2070**
- Betrachtung von **zwei Leitszenarien** mit jeweiligen **Stützjahren**
- Berücksichtigung von zwei **RCP-Klimaszenarien** des Deutschen Wetterdienst (DWD)
- **Stündliche** Auflösung
- Berücksichtigung von **Speichern**

¹ Global warming potential (GWP); acidification (AD); freshwater eutrophication (EP); ozone depletion (ODP); photochemical ozone formation (POCP); non-fossil resources (ADPE); fossil resources (ADPF)

Methodik zur Berechnung des Kraftwerkeinsatzes und dessen Emissionen



¹JERICO sind die Energiesystemmodelle des Lehrstuhls für Energiesystemanalyse

RES: Renewable Energy Sources; EE: Erneuerbare Energien; NUTS: Nomenclature des unités territoriales statistiques

² GWP: Global warming potential; AP: acidification; EP: freshwater eutrophication; ODP: ozone layer depletion; POCP: photochemical ozone creation; ADPE: non-fossil resources; ADPF: minerals and metals

Eingangsdaten

Erzeugung	Rahmenbedingungen	Bedarf
Wetterdaten ➤ Solareinstrahlung ➤ Windgeschwindigkeiten ➤ Außenlufttemperaturen R: NUTS3 Z: Stündlich	(Brennstoff-)preise ➤ Erdgas & Erdöl ➤ Steinkohle & Braunkohle ➤ Wasserstoff ➤ Biomasse ➤ EU-ETS R: NUTS0 Z: Jährlich	Wärmepumpen ➤ Anzahl oder jährlicher Stromverbrauch R: NUTS0 Z: Jährlich
➤ Je Stützjahr der 2 RCP Szenarien	➤ Je energiepolitischem Szenario ➤ Je Stützjahr (ggfs. des RCP-Szenario)	➤ Je energiepolitischem Szenario ➤ Je Stützjahr
Installierte Kapazitäten ➤ Kraftwerke ➤ Speicher R: NUTS0 Z: Jährlich	Strompreise ➤ Nachbarländer R: NUTS0 Z: Jährlich	Elektrofahrzeuge ➤ Anzahl oder jährlicher Stromverbrauch R: NUTS0 Z: Jährlich
➤ Je energiepolitischem Szenario ➤ Je Stützjahr	➤ Je energiepolitischem Szenario ➤ Je Stützjahr (ggfs. des RCP-Szenario)	➤ Je energiepolitischem Szenario ➤ Je Stützjahr
Kraftwerkstypischen Emissionswerte ➤ Treibhauspotential (GWP) ➤ Weitere LCA-Wirkungskategorien ODP, AP, EP, POCP, ADPE, ADPF¹ R: NUTS0 Z: Jährlich	Austauschkapazitäten ➤ Nachbarländer R: NUTS0 Z: Stündlich	Wasserstoffproduktion ➤ Volllaststunden oder jährlicher Stromverbrauch R: NUTS0 Z: Jährlich
➤ Je Kraftwerk	➤ Je Stützjahr	➤ Je energiepolitischem Szenario ➤ Je Stützjahr

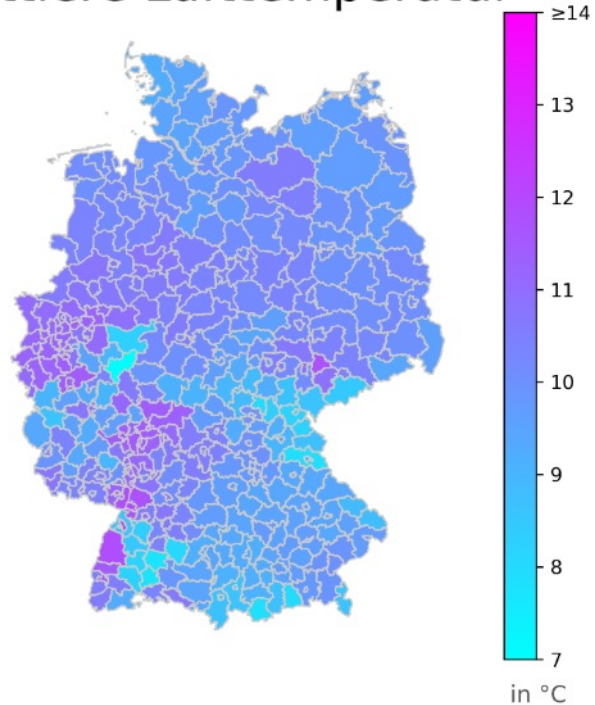
R: Räumliche Auflösung, Z: Zeitliche Auflösung

¹ GWP: Global warming potential; AP: acidification; EP: freshwater eutrophication; ODP: ozone layer depletion; POCP: photochemical ozone creation; ADPE: non-fossil resources; ADPF: minerals and metals

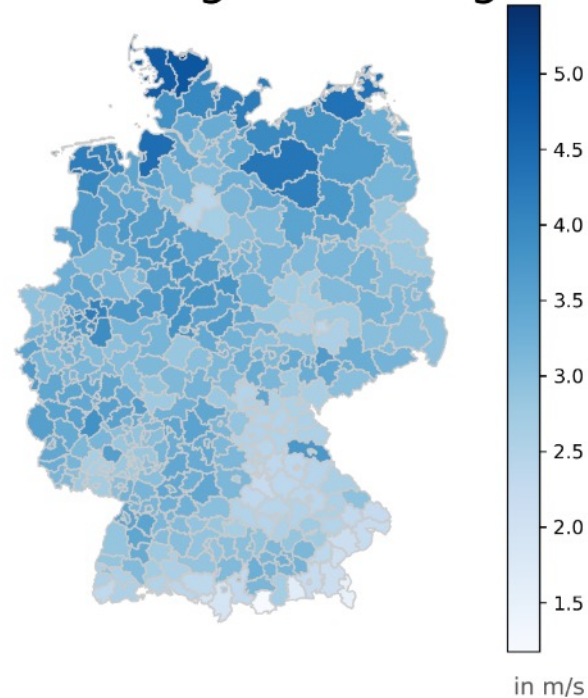
Wetterdaten aus RCP Szenarien

Beispiel : Räumliche Verteilung von Jahresmittelwerten, Jahr 2020, RCP 2.6

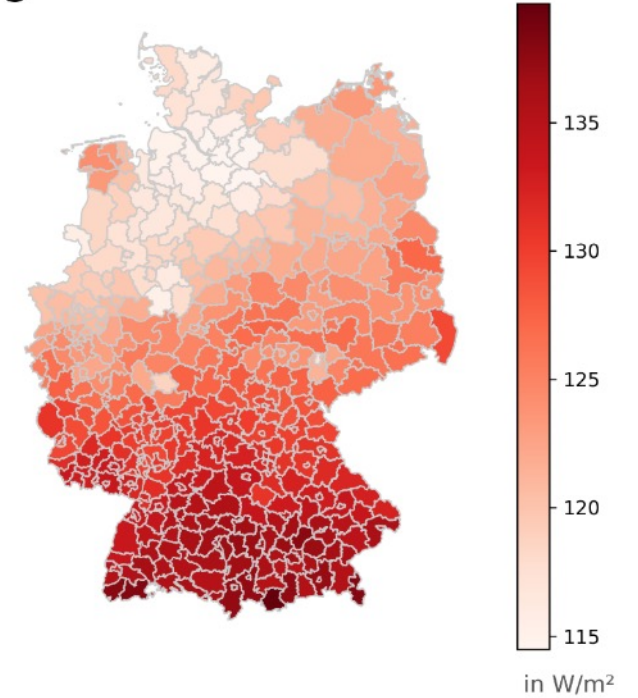
Mittlere Lufttemperatur



Mittlere Windgeschwindigkeit



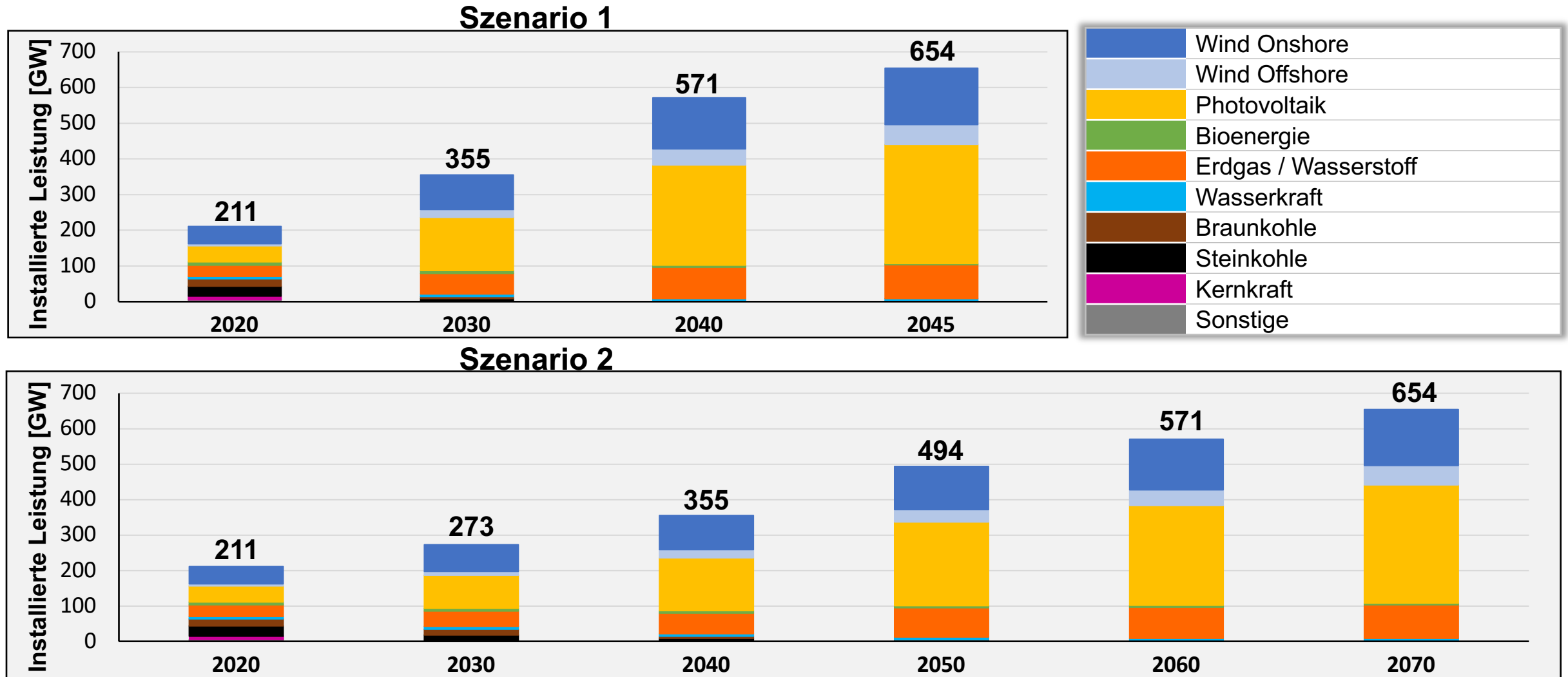
Mittlere globale Sonneneinstrahlung



Verwendung der Daten:
Mittlere **Lufttemperatur**, mittlere **Windgeschwindigkeit** und mittlere globale **Sonneneinstrahlung**

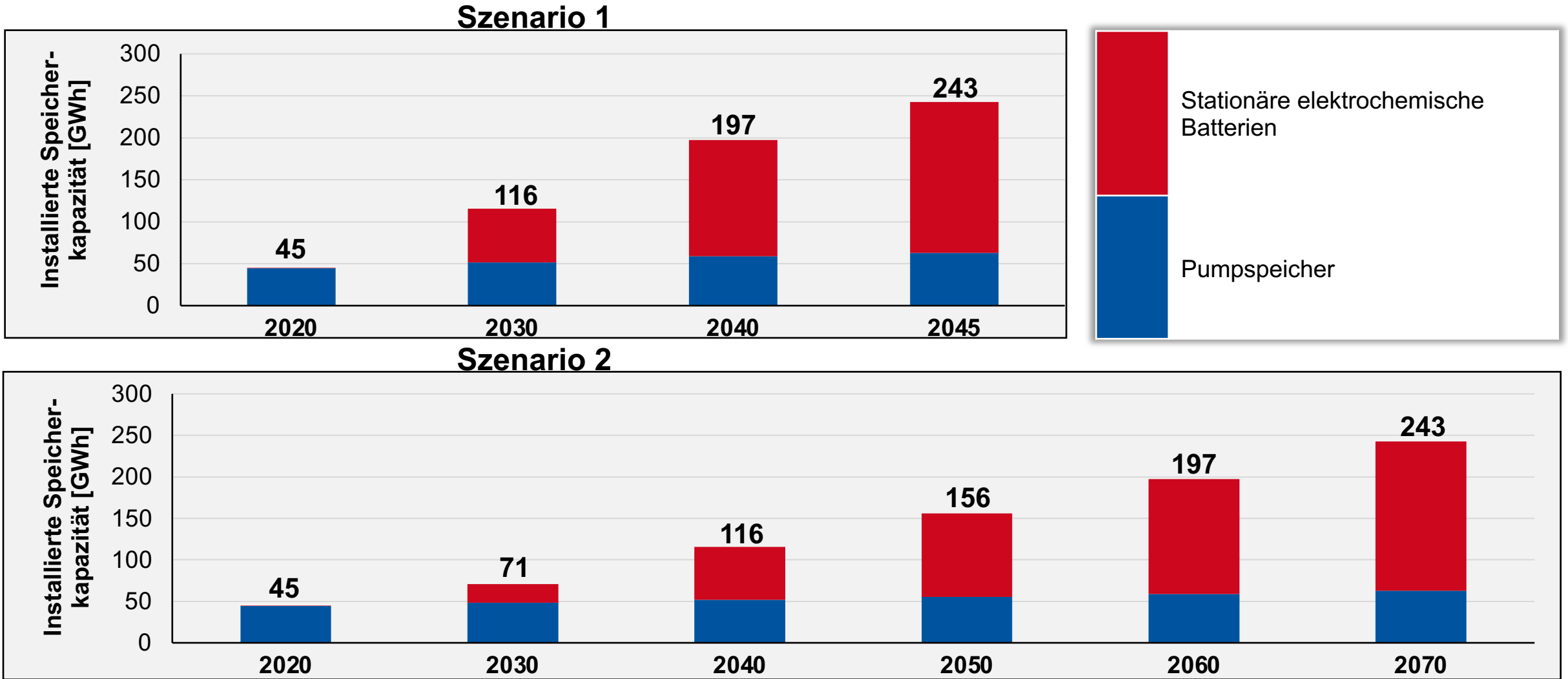


Entwicklung der installierten Kapazitäten des Kraftwerksparks



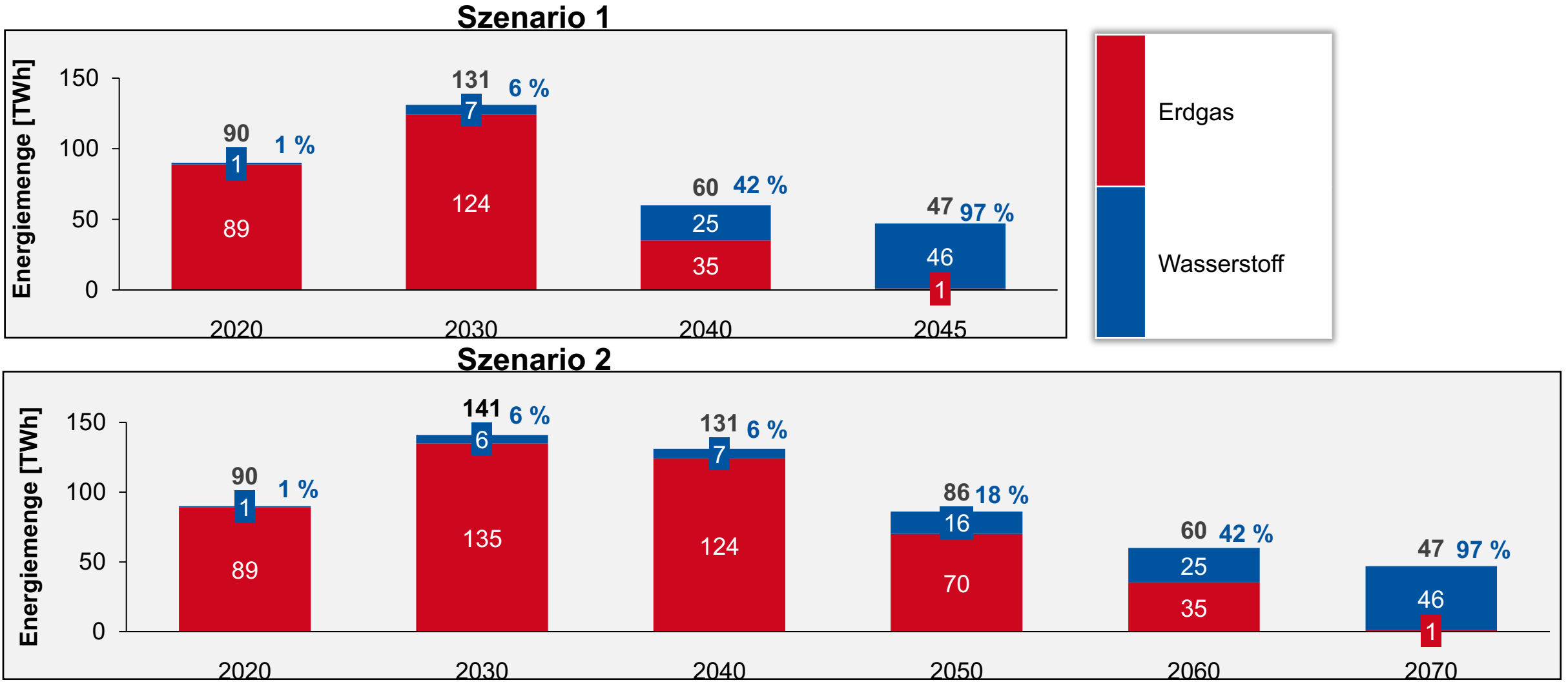
Quelle: „Szenarienvergleich – Vergleich der ‚Big 5‘ Klimaneutralitätsszenarien“, Stiftung Klimaneutralität

Entwicklung der installierten Speicherkapazitäten des Kraftwerksparks



Quelle: „Szenarienvergleich – Vergleich der ‚Big 5‘ Klimaneutralitätsszenarien“, Stiftung Klimaneutralität

Anteil von Wasserstoff in Gaskraftwerken



Quelle: „Szenarienvergleich – Vergleich der ‚Big 5‘ Klimaneutralitätsszenarien“, Stiftung Klimaneutralität

Wasserstoffproduktions- und Importszenarien

Betrachtete Routen für Wasserstoffproduktion und -import

Route	Production	Country	Electricity production	Transportation method ¹	Electricity Germany
0	PEM	Germany	Wind only	-	Wind only
1	PEM	Spain	Solar only	Pipeline	Wind only
2	PEM	Norway	Wind only	Pipeline	Wind only
3	PEM	Australia	Solar only	Ship liquefied	Wind only
4	PEM	Chile	Wind only	Ship liquefied	Wind only

Berechnung über
**JERICHO
H2 LCA**

Zusammensetzung der möglichen Routen für Szenario und Jahr

Szenario	Jahr	Route 0	Route 1	Route 2	Route 3	Route 4
1	2020	90%	5%	5%	0%	0%
1	2030	40%	20%	20%	10%	10%
1	2040	25%	20%	25%	15%	15%
1	2045	30%	20%	20%	15%	15%
2	2020	90%	5%	5%	0%	0%
2	2030	65%	13%	13%	5%	5%
2	2040	40%	20%	20%	10%	10%
2	2050	33%	20%	23%	13%	13%
2	2060	25%	20%	25%	15%	15%
2	2070	30%	20%	20%	15%	15%

Integration in
Auswertung von
**JERICHO
Strommarkt-
modell**

Kraftwerkstypische Emissionen

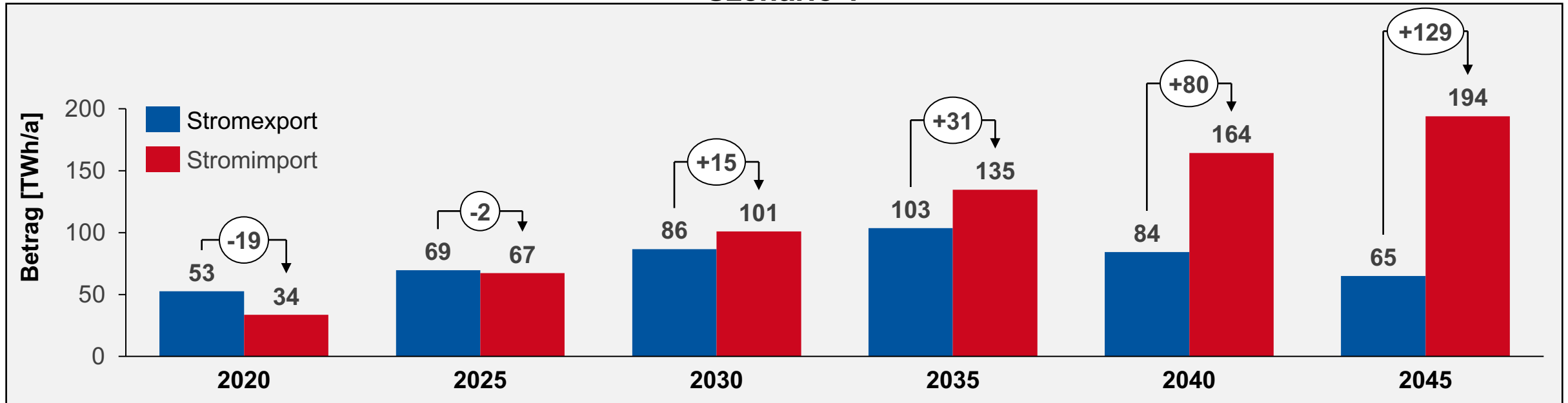
EF 2.0 midpoint Wirkungskategorien, jeweils bezogen auf kWh_{el}

	Global Warming potential	Acidification	Freshwater eutrophication	Ozone layer depletion	Photochemical ozone creation	Fossil resources	Minreals and metals
	GWP	AP	EP	ODP	POCP	ADPF	ADPE
Einheit	kg CO ₂ eq	mol H ⁺ eq	kg P eq	kg CFC-11 eq	kg NMVOC eq	MJ	kg Sb eq
Biomass	2.2E-01	2.7E-03	9.8E-04	1.5E-12	1.6E-03	9.1E-01	5.0E-07
Hydro	6.0E-03	1.1E-05	3.0E-06	2.4E-14	8.4E-06	2.0E-02	1.8E-07
Wind	1.2E-02	4.1E-05	1.0E-05	1.1E-09	2.7E-05	1.5E-01	5.6E-07
PV	4.9E-02	1.9E-04	3.4E-05	7.8E-12	1.4E-04	7.4E-01	4.0E-06
Nuclear	4.9E-03	3.7E-05	1.7E-05	2.9E-12	2.8E-05	1.0E+01	2.9E-09
Lignite	1.2E+00	1.4E-03	3.1E-04	4.6E-13	8.2E-04	1.0E+01	6.1E-09
Hard Coal	1.0E+00	1.7E-03	4.4E-04	1.5E-07	1.2E-03	1.0E+01	3.6E-09
Natural Gas	5.1E-01	4.3E-04	1.4E-04	1.2E-03	4.5E-04	7.9E+00	2.2E-08
Others	9.7E-01	1.3E-03	3.3E-04	3.3E-13	9.2E-04	9.7E+00	8.9E-09

Quelle: EU Datenbank für Environmental Footprints (<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html>)

Import und Export, ausländische Strompreise und Austauschkapazitäten

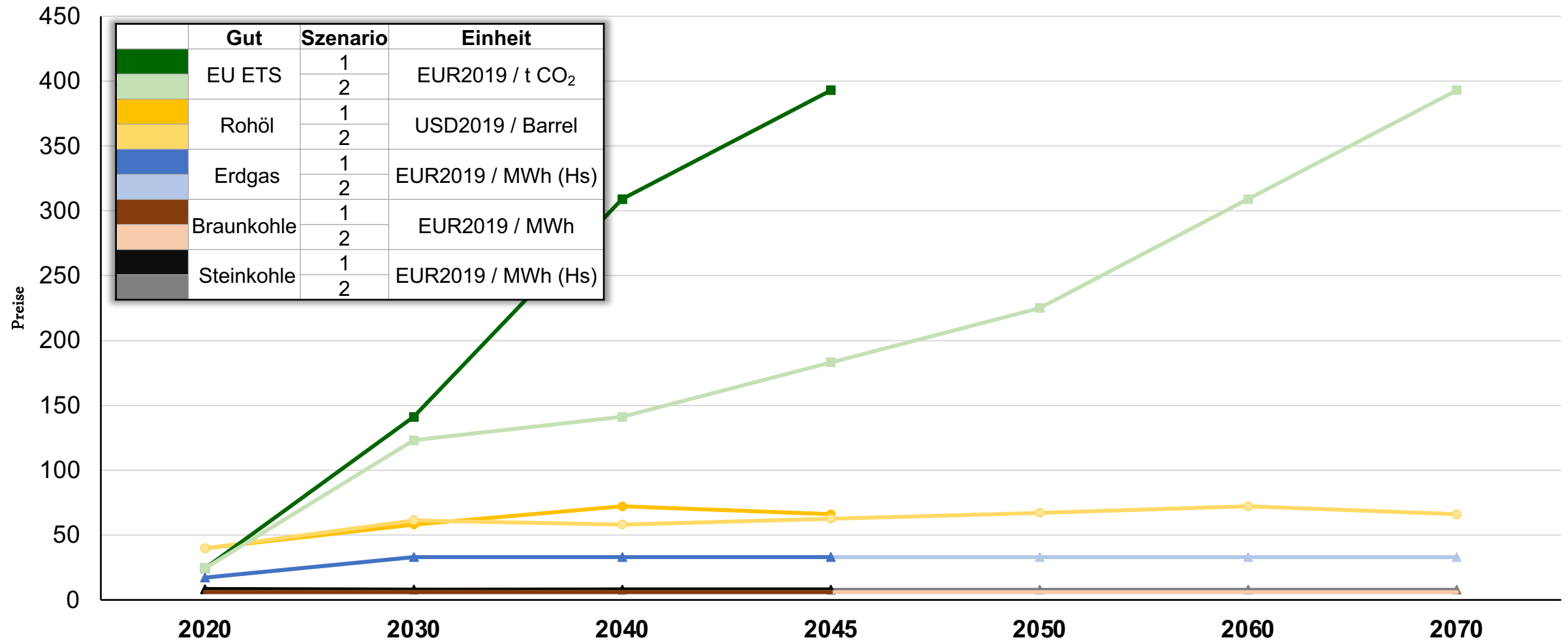
Szenario 1



- Annahme für **Szenario 2**: Streckung der Annahmen für Im- und Export für Szenario 1 bis 2070
- **Bestehende Analysen für Strompreise** der Nachbarländer übernommen
- **Bestehende Analysen für Austauschkapazitäten** übernommen
- **Emission der Nachbarländer** aus Mangel an Daten mit **stündlichen Emissionsfaktoren in Deutschland** gleichgesetzt

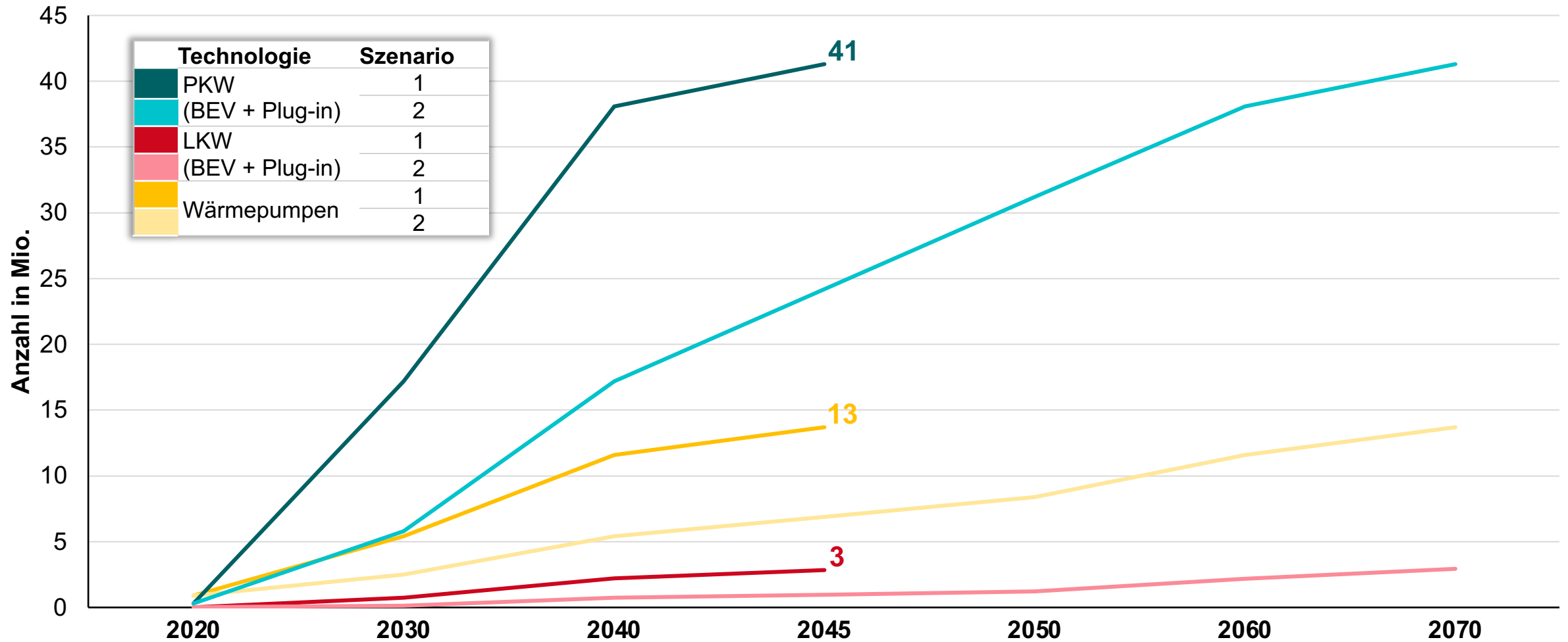
Quelle: „Szenarienvergleich – Vergleich der ‚Big 5‘ Klimaneutralitätsszenarien“, Stiftung Klimaneutralität

Entwicklung der Brennstoffpreise und des EU ETS-Preises



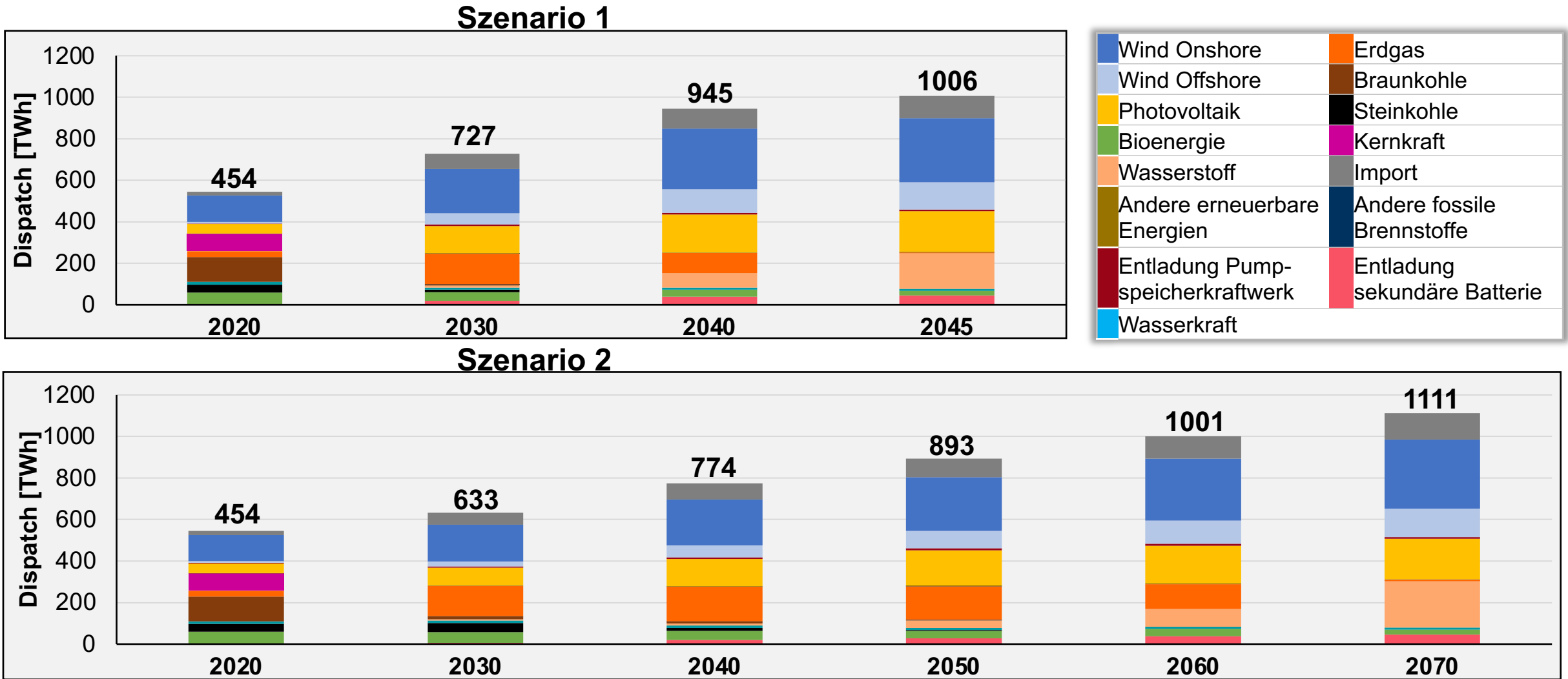
Quelle: „Szenarienvergleich – Vergleich der ‚Big 5‘ Klimaneutralitätsszenarien“, Stiftung Klimaneutralität

Markthochlauf von Wärmepumpen und Elektromobilität

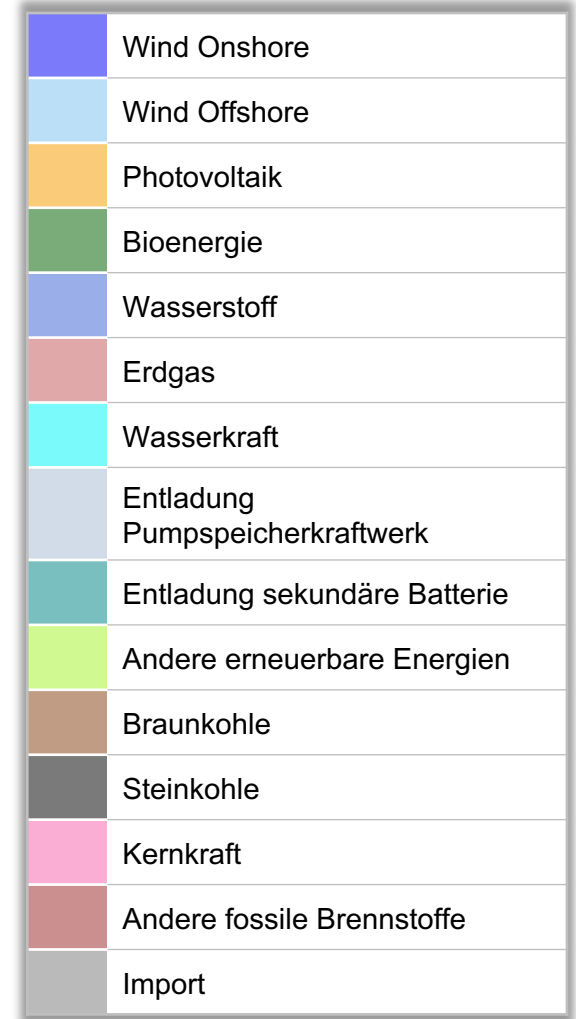
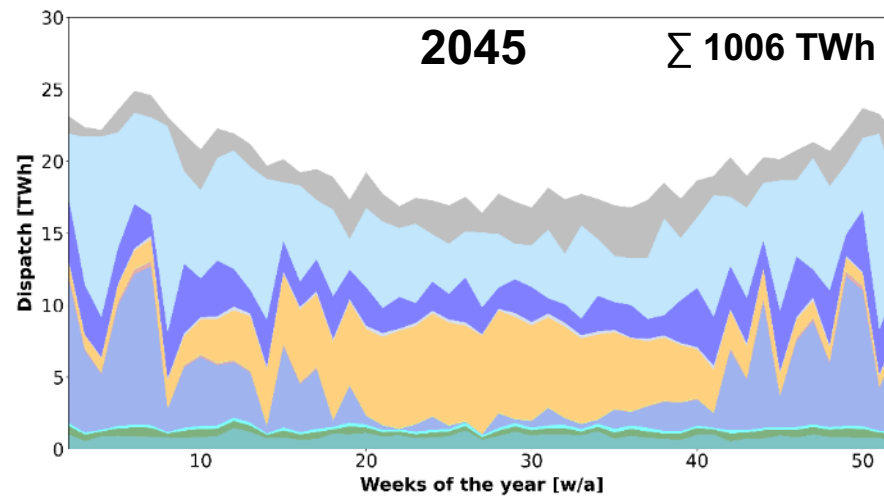
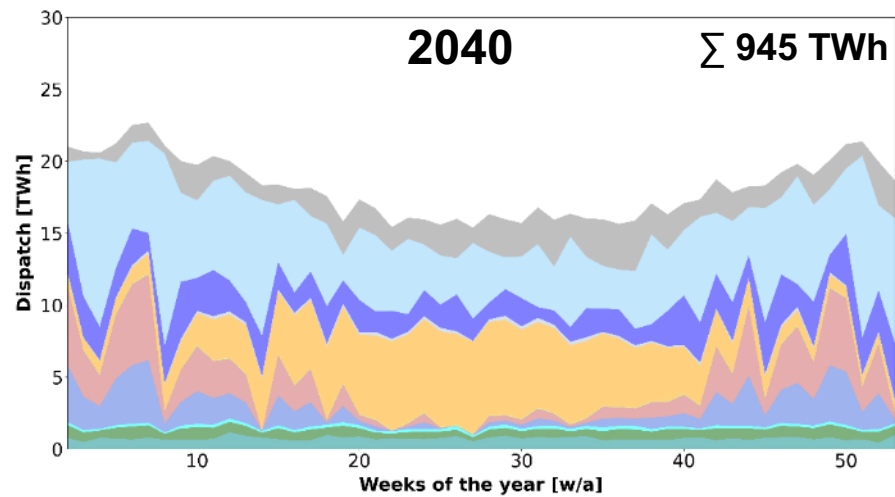
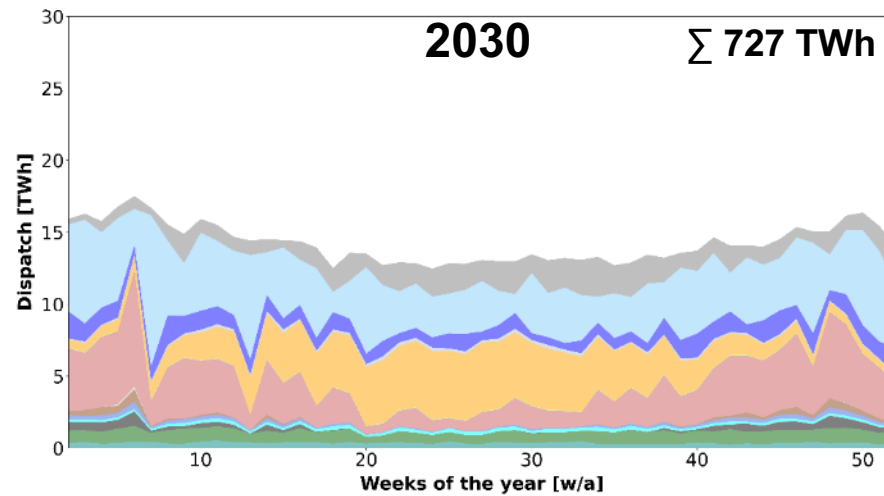
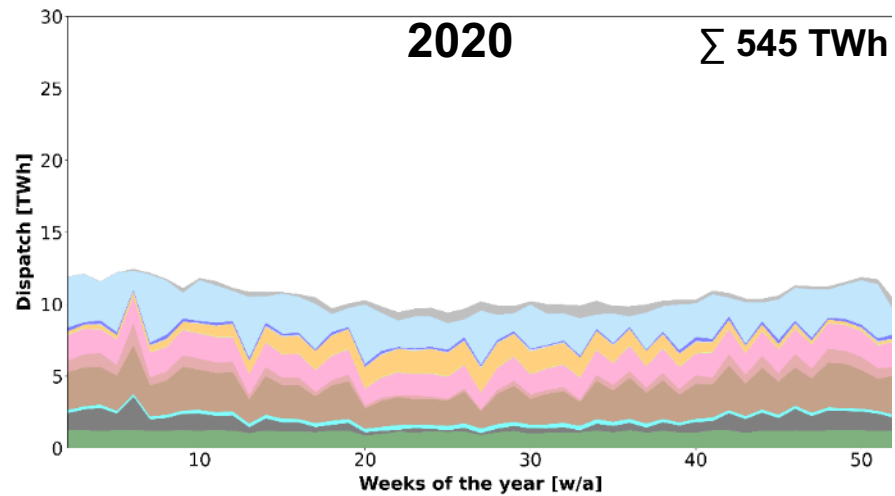


Quelle: „Szenarienvergleich – Vergleich der ‚Big 5‘ Klimaneutralitätsszenarien“, Stiftung Klimaneutralität

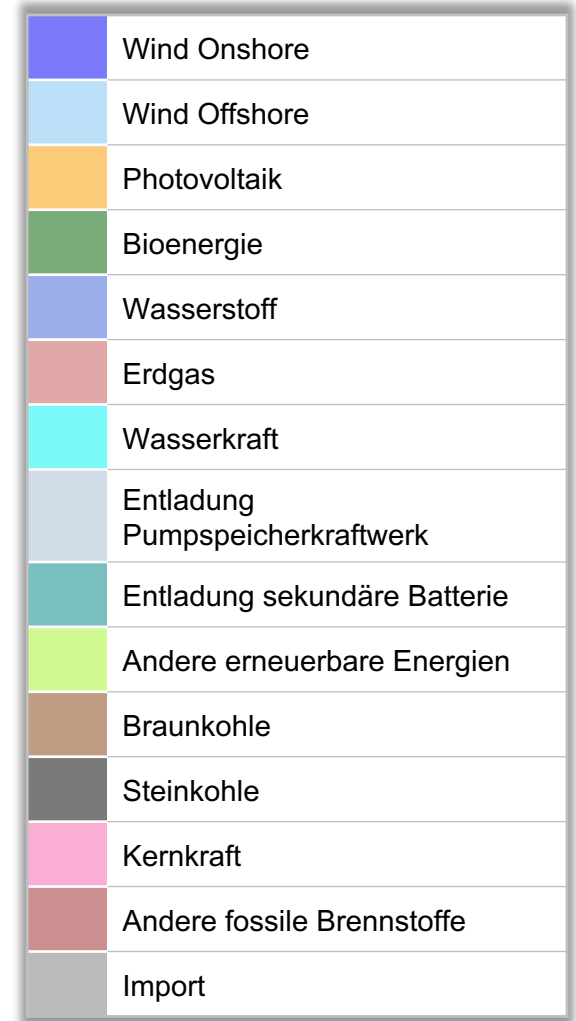
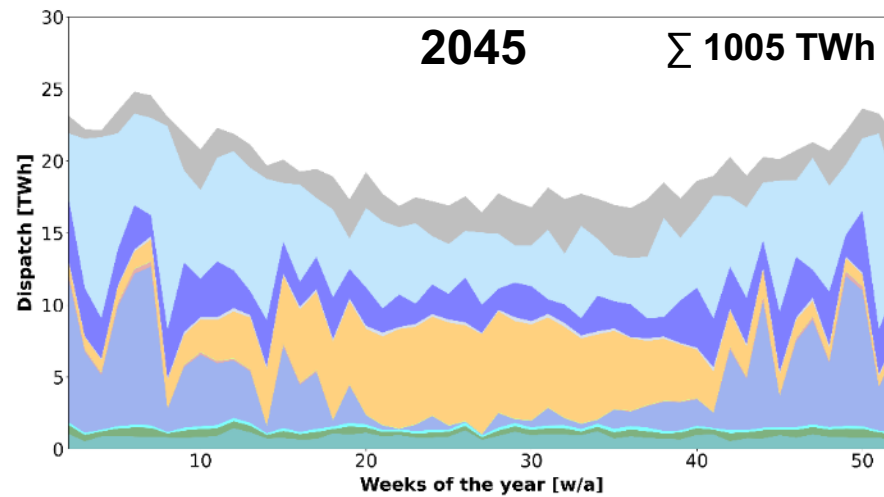
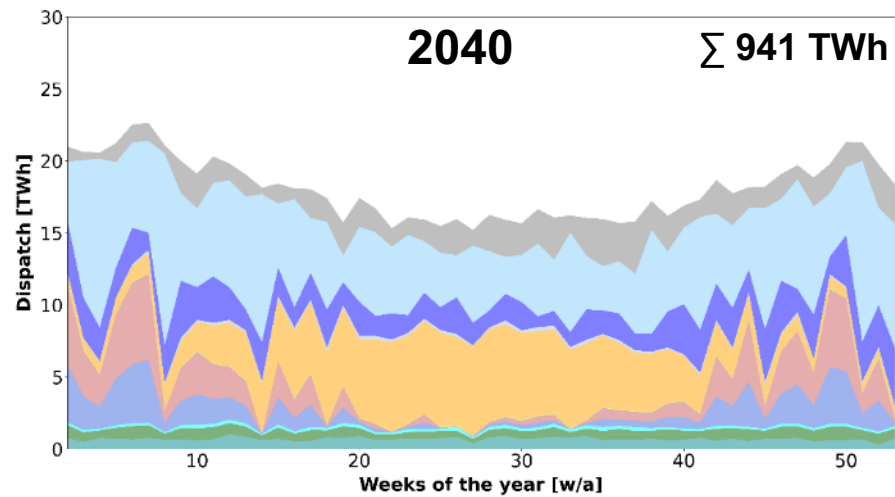
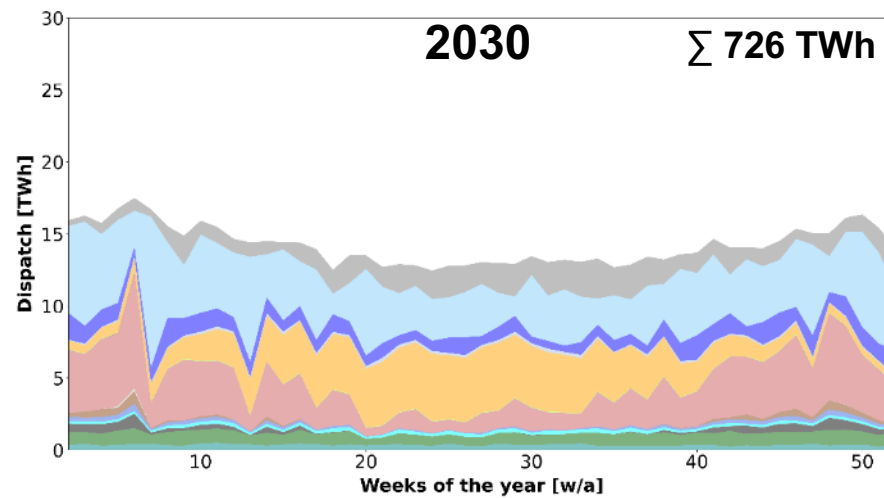
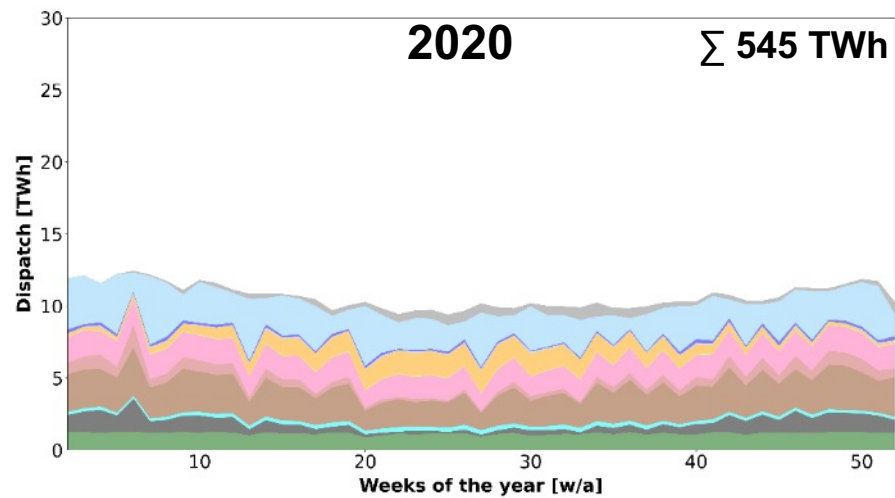
Jährlicher Dispatch für RCP 2.6



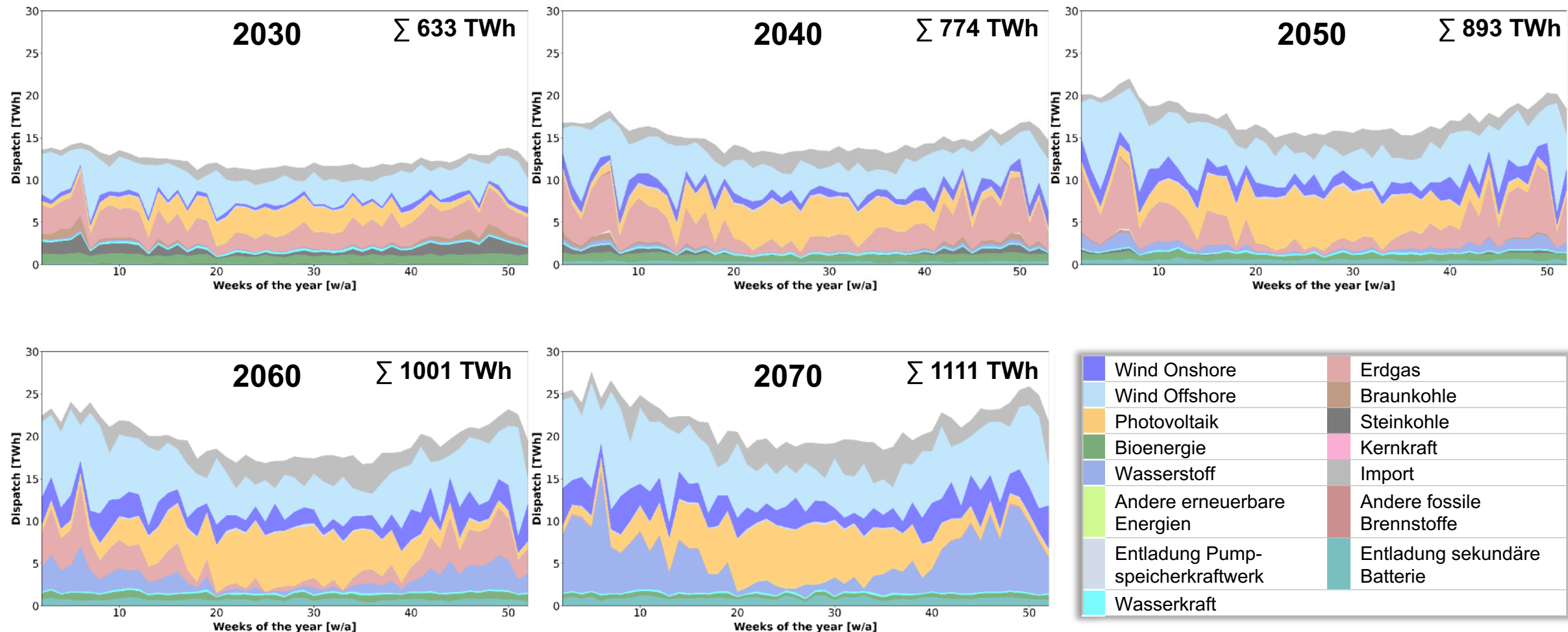
Wöchentlicher Kraftwerkseinsatz für Szenario 1 und RCP 2.6



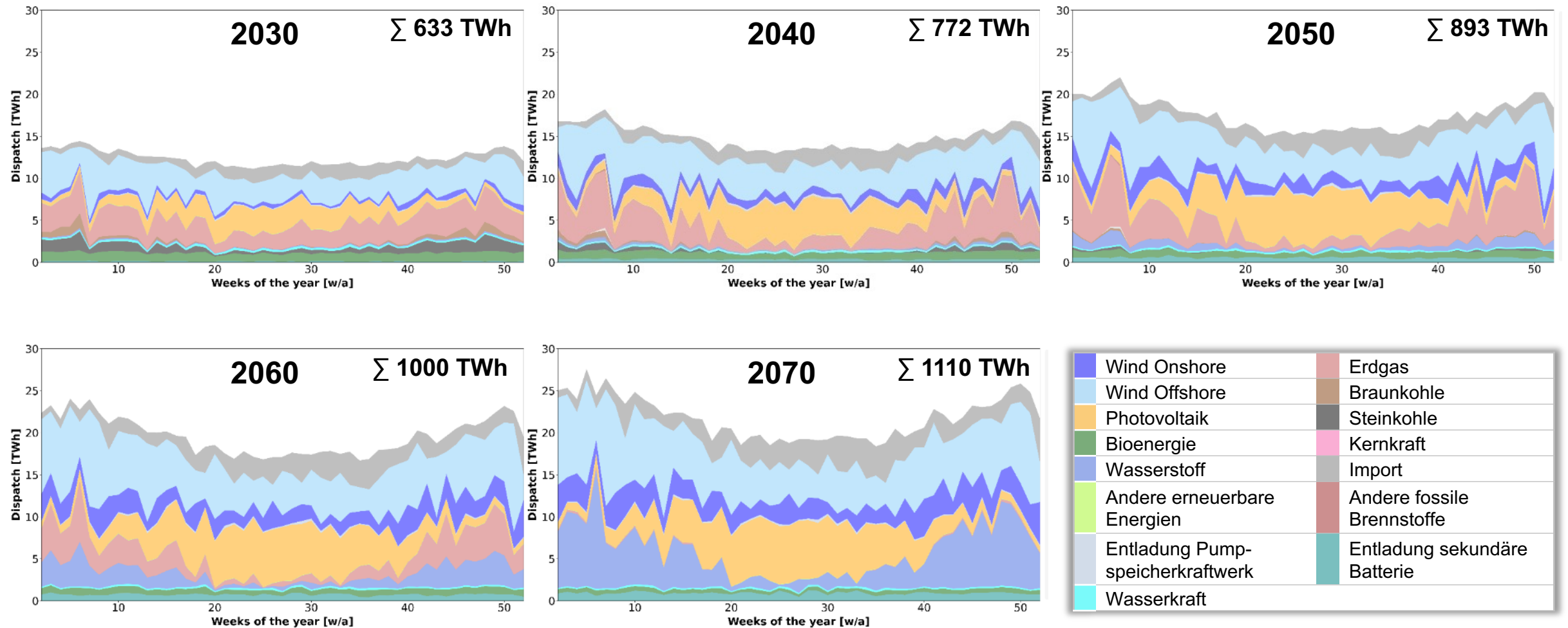
Wöchentlicher Kraftwerkseinsatz für Szenario 1 und RCP 4.5



Wöchentlicher Kraftwerkseinsatz für Szenario 2 und RCP 2.6

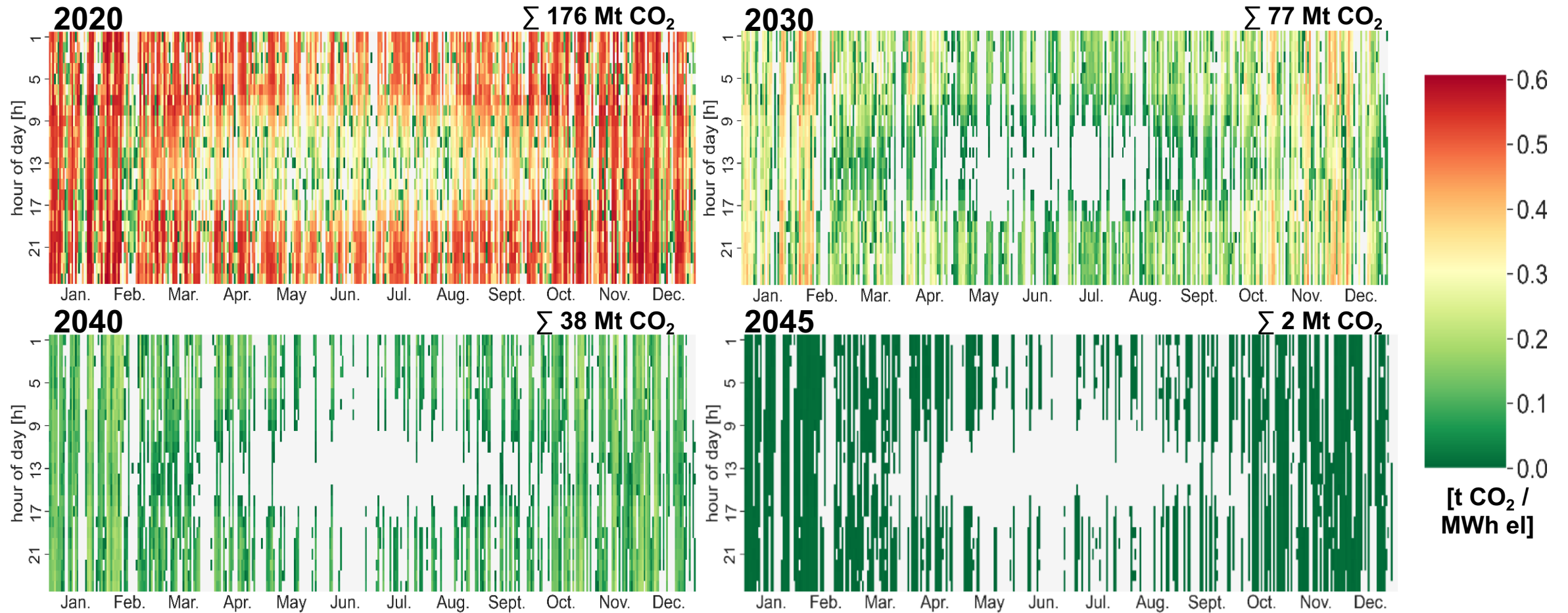


Wöchentlicher Kraftwerkseinsatz für Szenario 2 und RCP 4.5



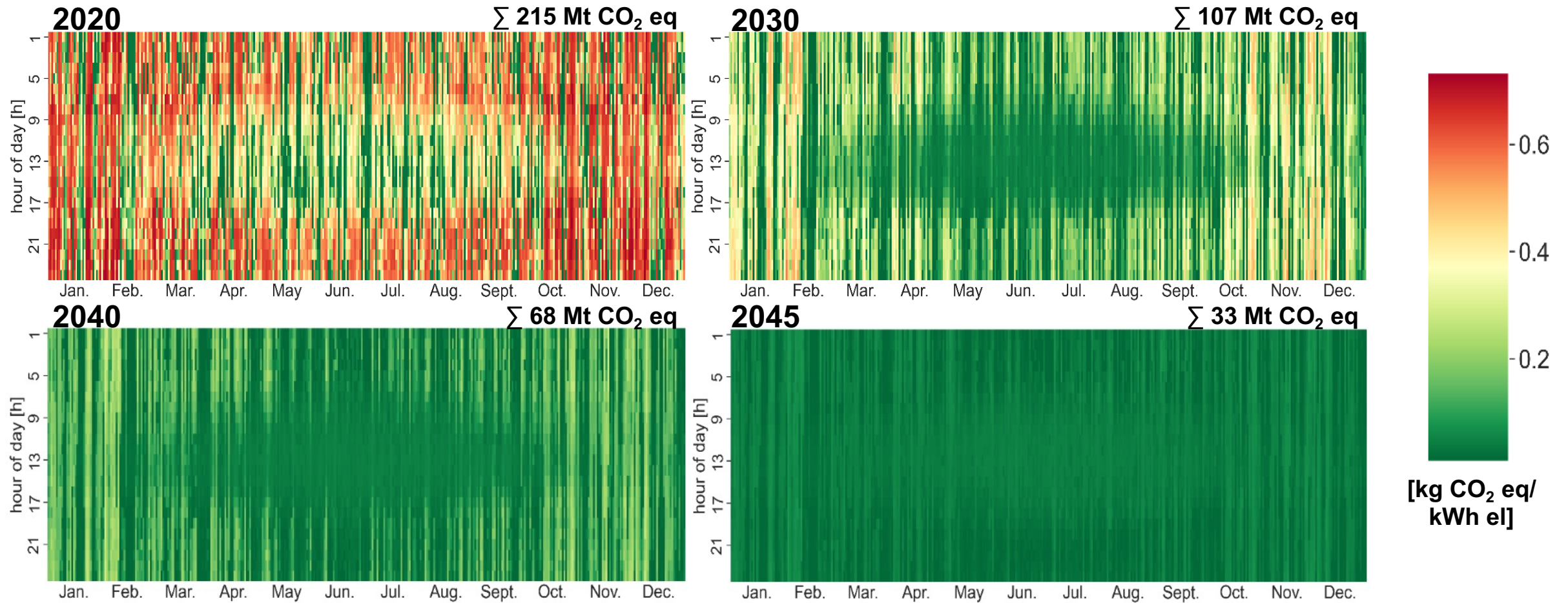
EU Emissionshandelssystem (EU ETS)

Durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung – Szenario 1 und RCP 2.6



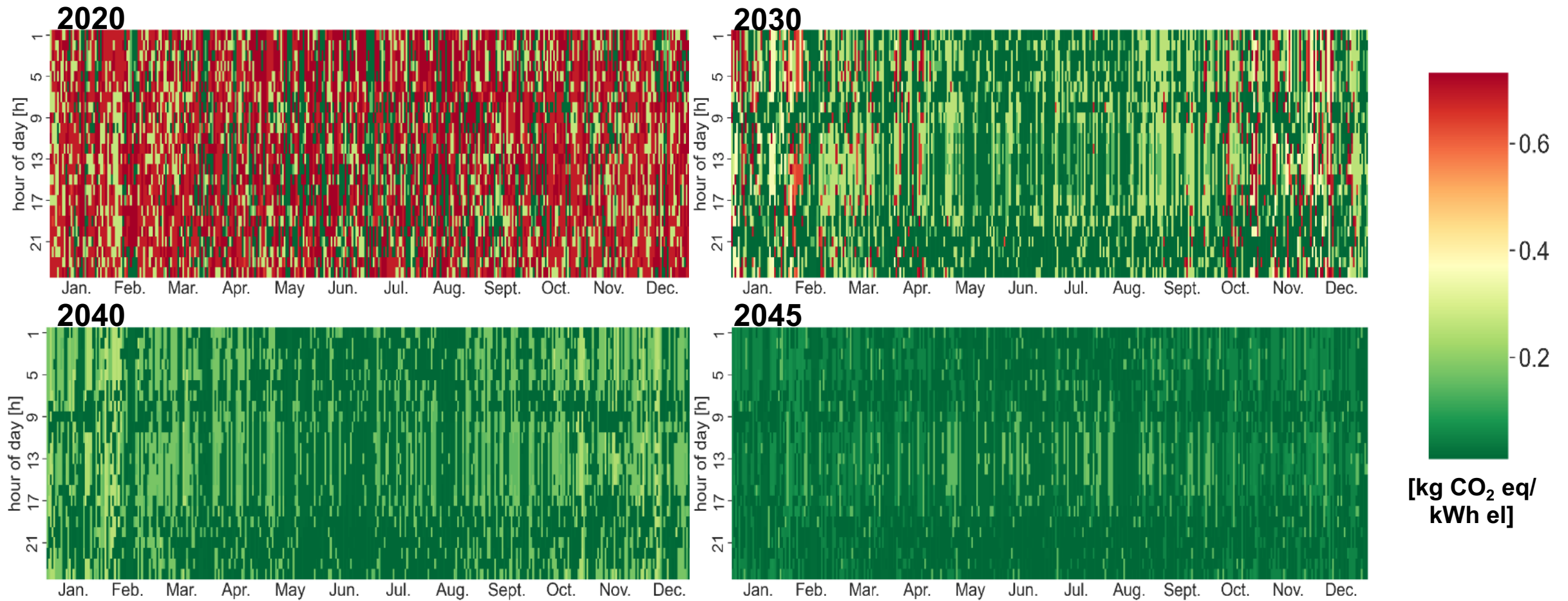
Treibhauspotential (global warming potential – GWP)

Durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung – Szenario 1 und RCP 2.6



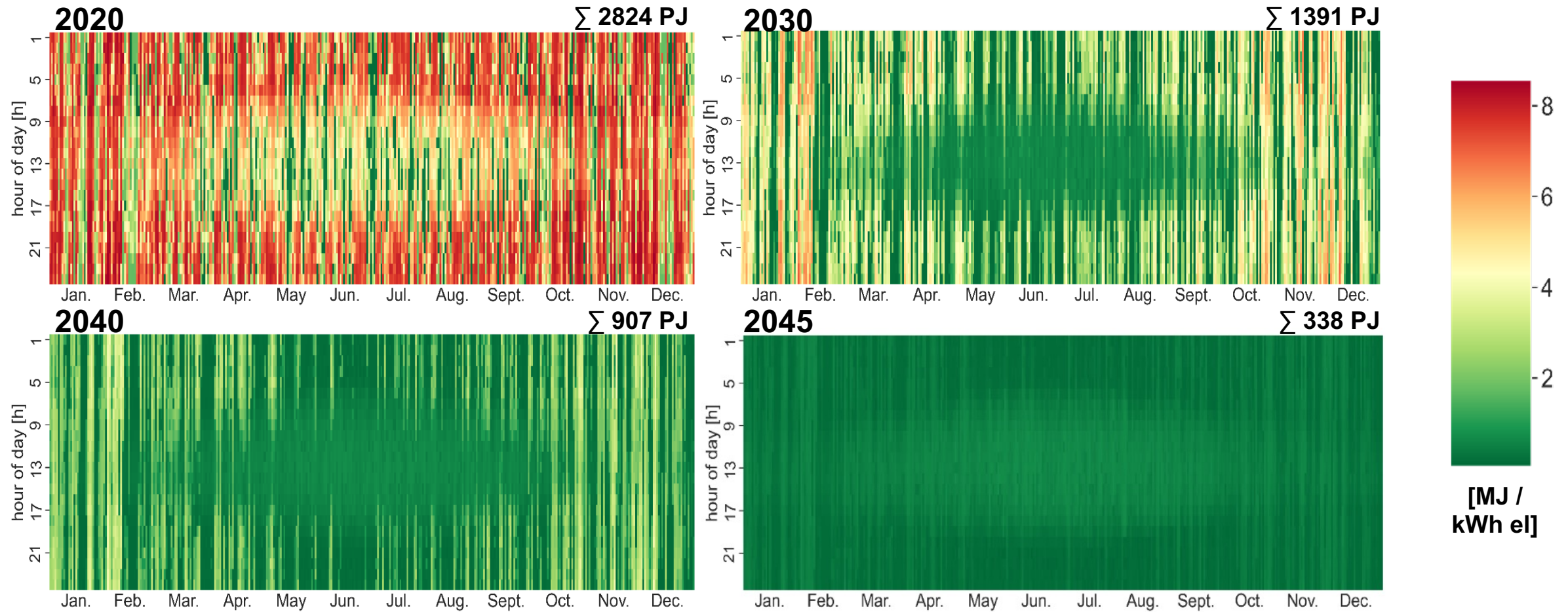
Treibhauspotential (global warming potential – GWP)

Marginale Emissionen der Stromerzeugung – Szenario 1 und RCP 2.6



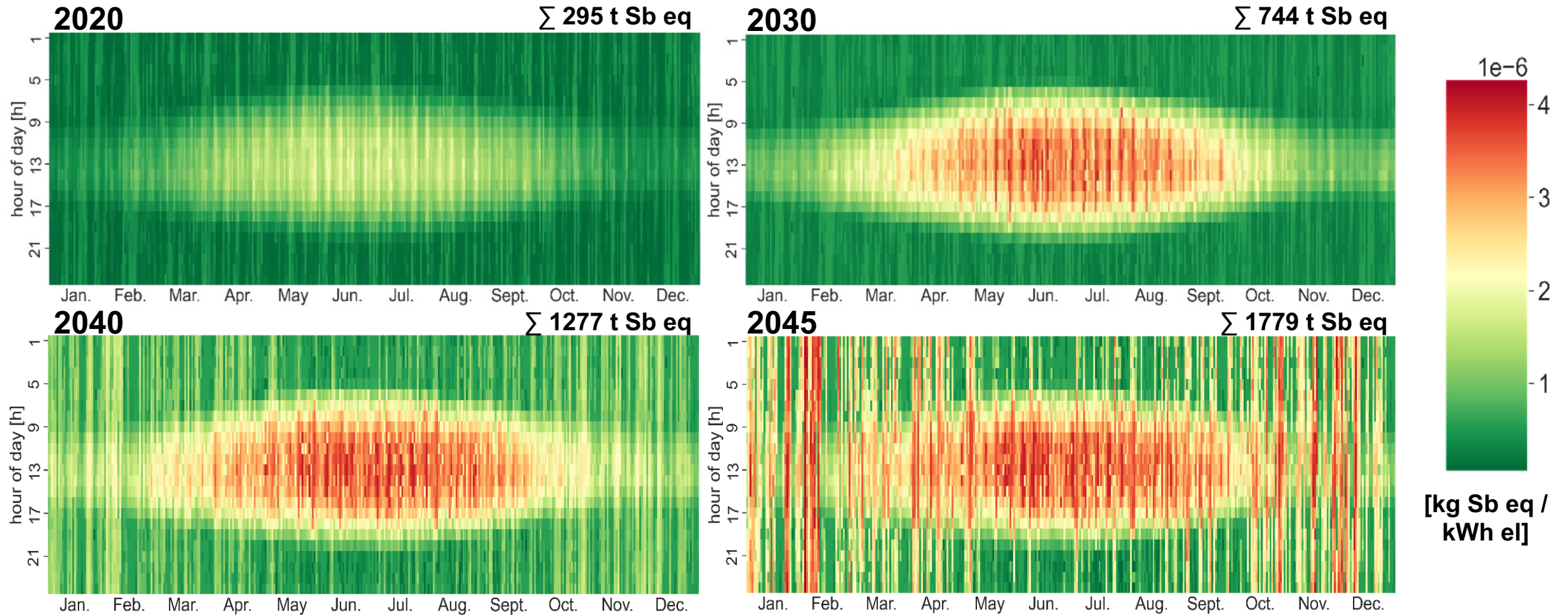
Fossile Ressourcen (fossil resources - ADPF)

Durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung – Szenario 1 und RCP 2.6



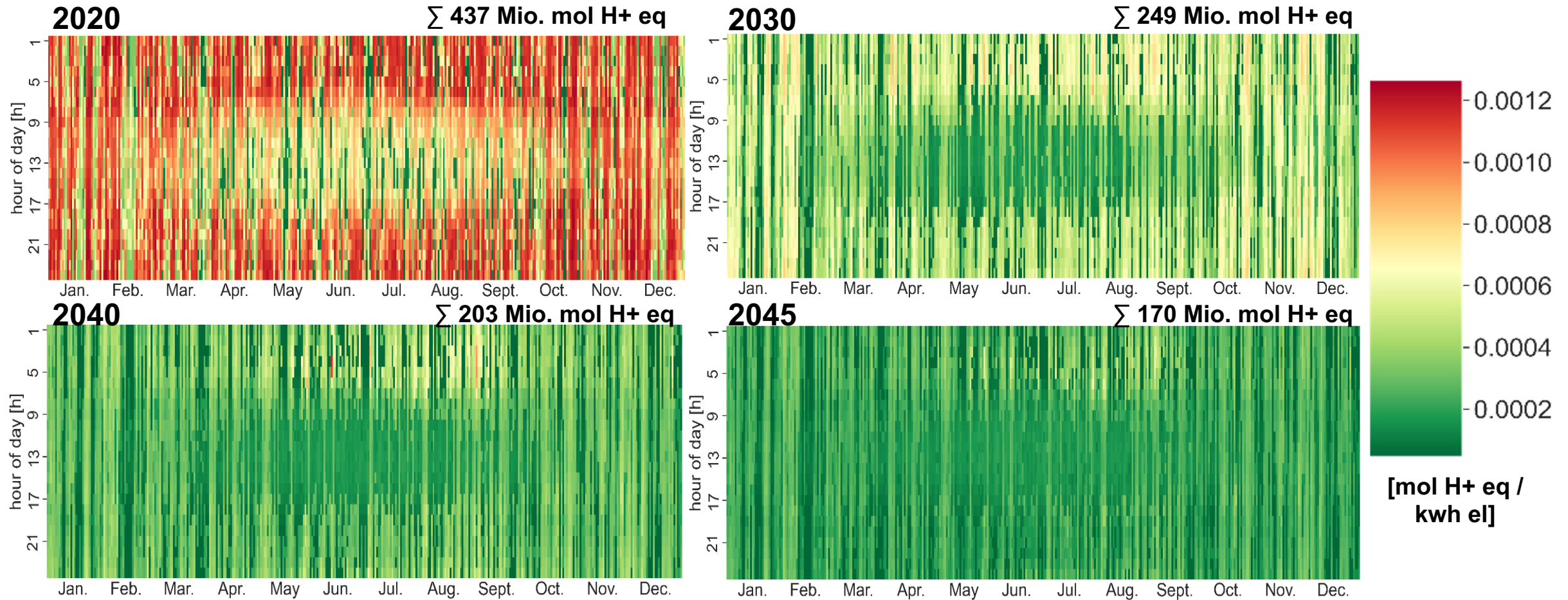
Erschöpfung der abiotischen Ressourcen (minerals and metals – ADPE)

Durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung – Szenario 1 und RCP 2.6



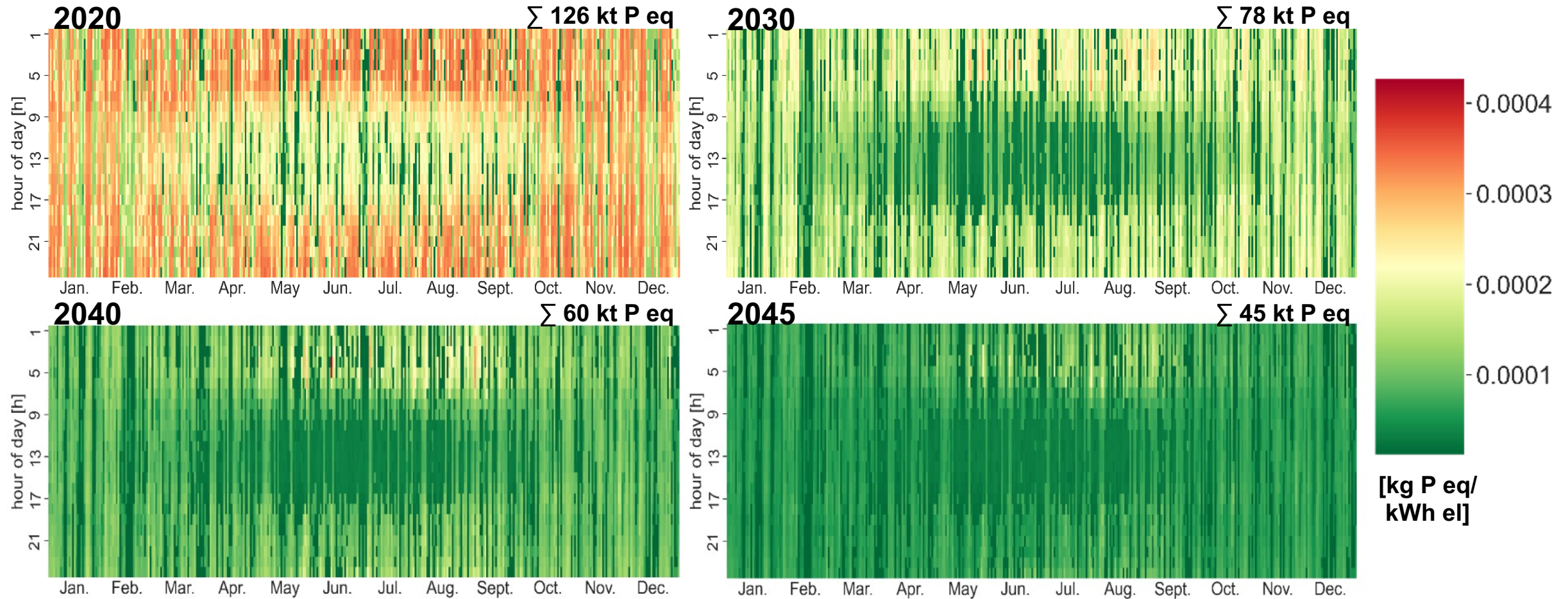
Versauerung (acidification – AP)

Durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung – Szenario 1 und RCP 2.6



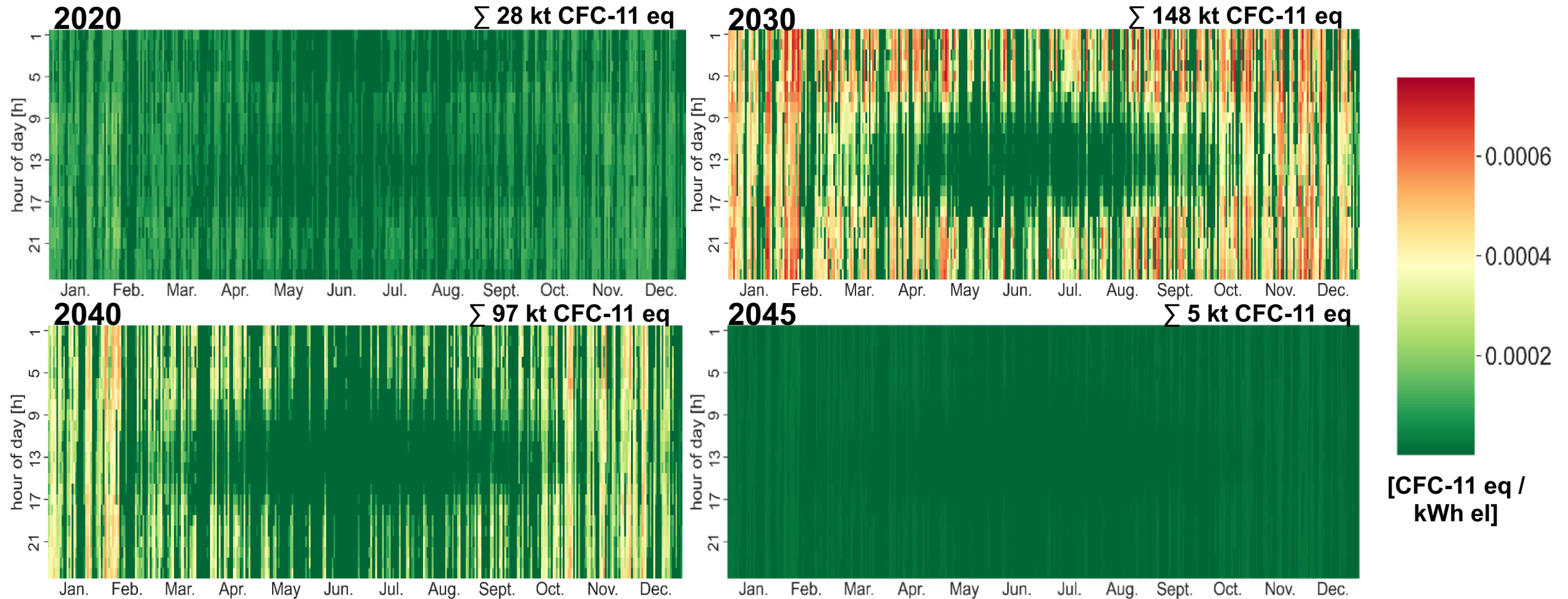
Süßwasser-Eutrophierung (freshwater eutrophication – EP)

Durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung – Szenario 1 und RCP 2.6



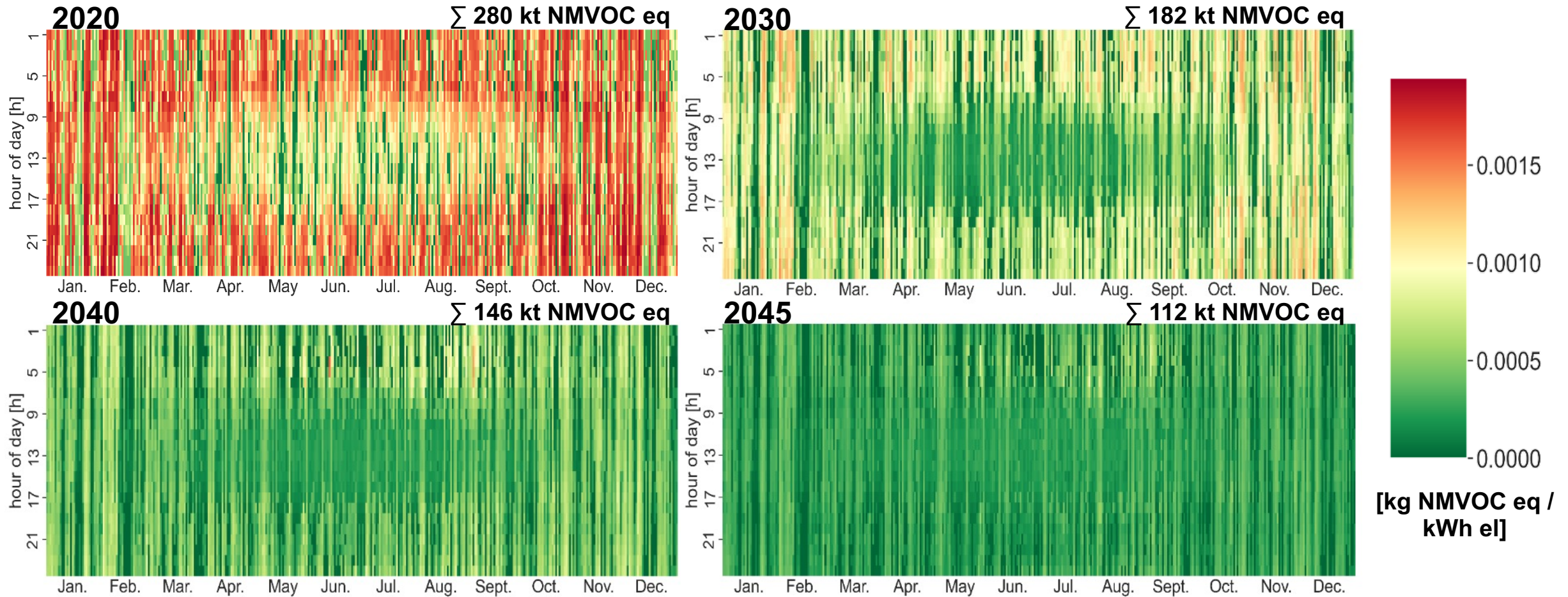
Abbau der Ozonschicht (ozone depletion – ODP)

Durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung – Szenario 1 und RCP 2.6



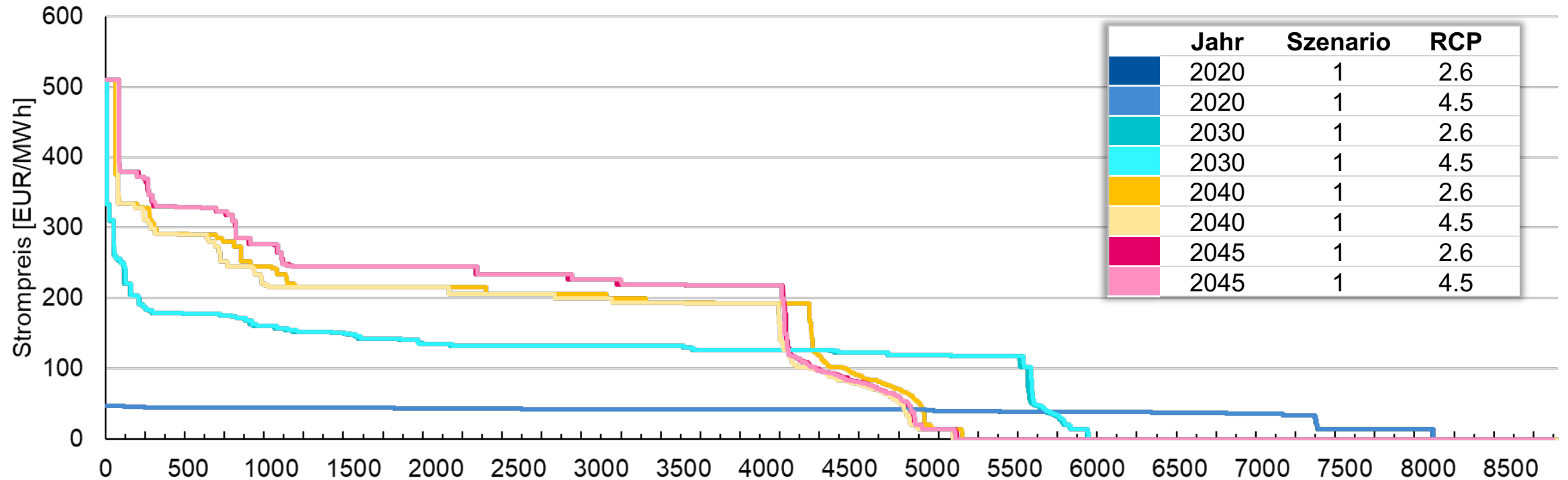
Photochemische Ozonbildung (photochemical ozone creation – POCP)

Durchschnittliche Emissionen der Stromerzeugung – Szenario 1 und RCP 2.6



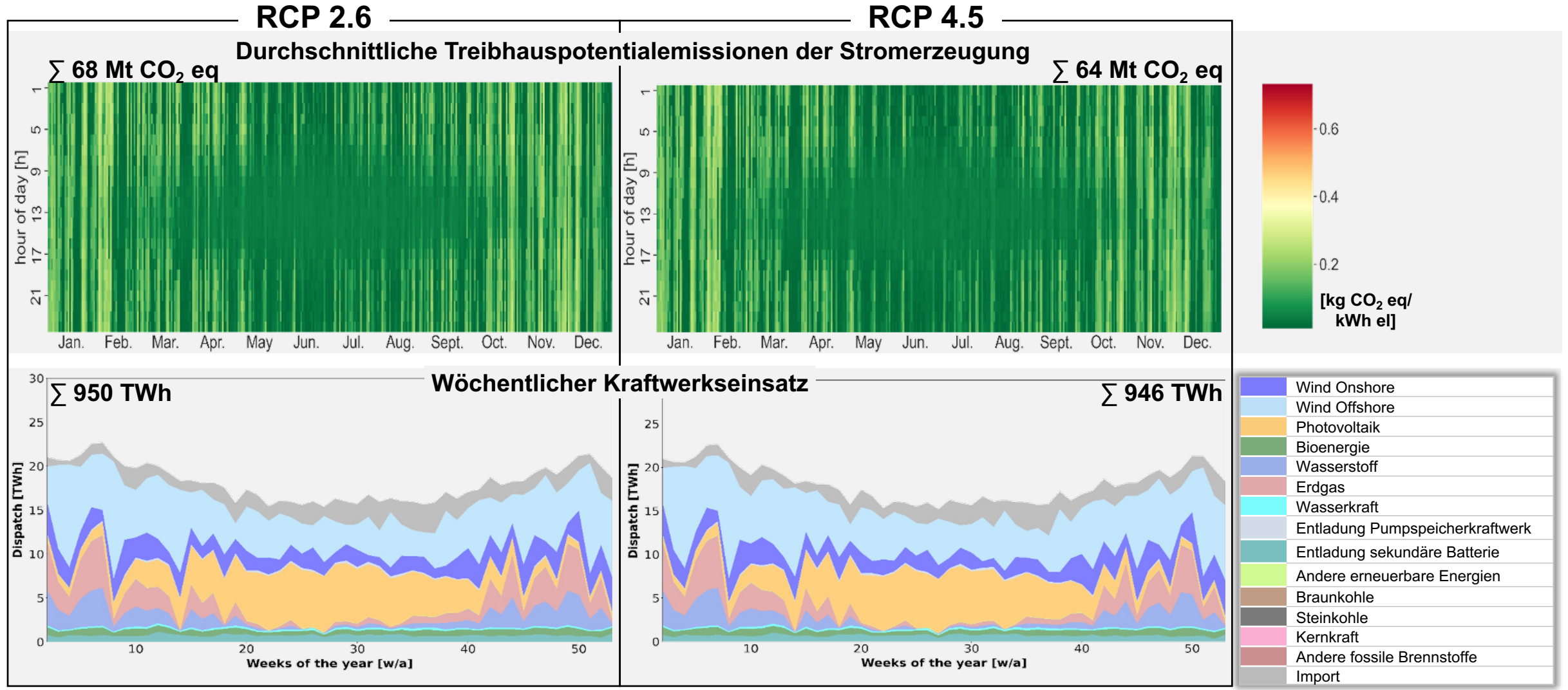
Minimale Abweichung zwischen RCP 2.6 und 4.5

Jahresdauerlinien der Strompreise – Szenario 1



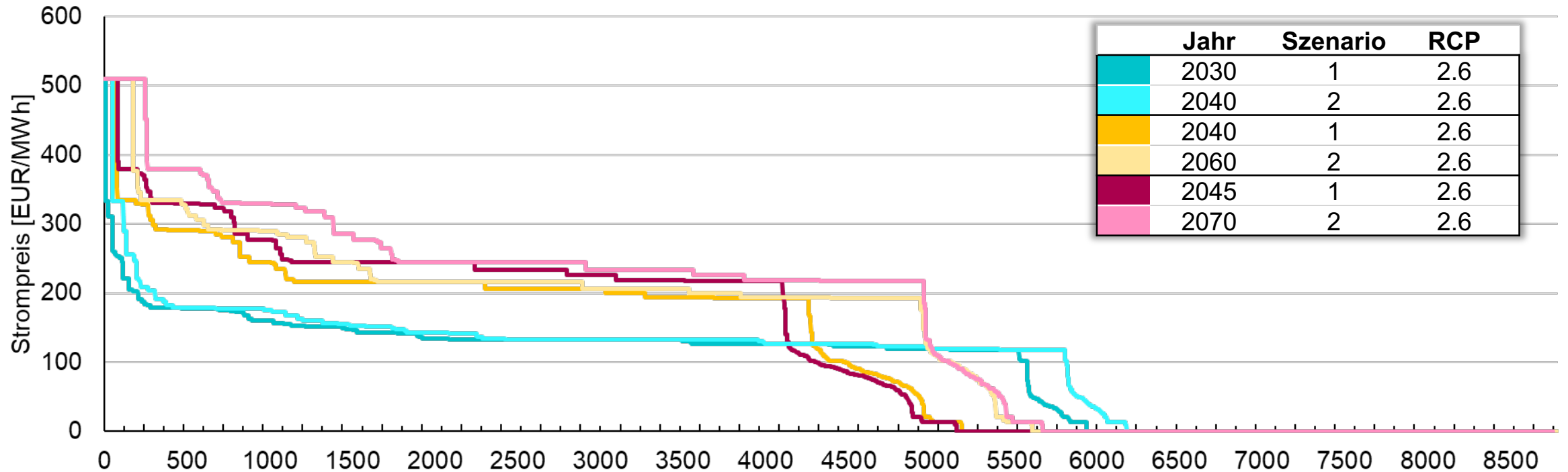
- Wenige Unterschiede zwischen **RCP-Klimaszenarien** erkennbar (siehe Anhang zu Vergleich der RCP-Daten)
- **Preisvolatilität** nimmt im Zeitraum 2020 – 2045 stark zu (Zeiten mit Lastunterdeckung wurden mit 510 €/MWh bepreist)

Vergleich RCP 2.6 und 4.5 für das Jahr 2040 im Szenario 1



Vergleich der Strompreise zwischen Szenario 1 und 2

Jahresdauerlinien der Strompreise – Vergleich Szenario 1 und 2 (RCP 2.6)



- **Preisunterschiede** zwischen Szenario 1 und 2 aufgrund unterstellter **fortschreitender wirtschaftlicher Entwicklung** bei **Berücksichtigung von Effizienzgewinnen**
- **Beispiel:** Im Jahr 2070 steht der **selbe Kraftwerkspark** wie im Jahr 2045 einer **höheren Nachfrage** gegenüber

Zusammenfassung

- Die **Stromnachfrage verdoppelt sich** im Vergleich zu 2020 bis hin zum Erreichen eines klimaneutralen Kraftwerksparks
- Mit zunehmend klimaneutralem Kraftwerkspark **nimmt** auch die **Preisvolatilität auf dem Strommarkt zu**
- Die untersuchten **RCP-Klimaszenarien haben wenig Einfluss** auf die Stromerzeugung und Emissionen
- Eine **verzögerte Klimaneutralität erhöht** die in Deutschland emittierten **Emissionen** deutlich
 - Im Vergleichsjahr 2040 und jeweils mit RCP 2.6 werden im Szenario 1 ca. 79 Mt CO₂ eq emittiert und im Szenario 2 ca. 136 Mt CO₂ eq
- Die **Umweltauswirkungen** in Form von **Treibhausgasen, Nutzung fossiler Ressourcen, Versauerung, Süßwasser-Eutrophierung** und **photochemischer Ozonbildung nehmen** mit zunehmender Klimaneutralität der Stromerzeugung **kontinuierlich ab**
- Gleichzeitig **nehmen Umweltauswirkungen** in Form von **Erschöpfung abiotischer Ressourcen** wegen höherem Bedarf bei erneuerbare Energieanlagen **zu**
- **Zwischenzeitlich** ist eine **Zunahme des Abbaus der Ozonschicht** durch vermehrten Einsatz von Erdgas zu beobachten

Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit!