



DENKEN
ÜBER
MORGEN

prognos



NCCS-Impacts

Treibhausgasemissionen unter verschiedenen sozio- ökonomischen und klima- politischen Szenarien für die Schweiz

Modellierung und Analyse

Zürich, 23. März 2026

Quirin Oberpriller, Nicolas Schmid, Andreas Klemmer, Lena Gubler, David Giger,
Sophie Bogler, Alexander Piegsa, Andreas Brutsche, Sven Kreidelmeyer, Minh
Phoung Vu, Benjamin Black, Almut Kirchner und Jürg Füssler



Impressum

Treibhausgasemissionen unter verschiedenen sozio-ökonomischen und klima-politischen Szenarien für die Schweiz

Modellierung und Analyse

Zürich, 23. März 2026

Treibhausgasemissionen für sozioökonomische und klimapolitische Szenarien

Schweiz_technischer Bericht.docx

Auftraggeber

NCCS-Impacts

Autorinnen und Autoren

Quirin Oberpriller, Nicolas Schmid, Andreas Klemmer, Lena Gubler, David Giger, Sophie Bogler, Alexander Piegsa, Andreas Brutsche, Sven Kreidelmeyer, Minh Phoung Vu, Benjamin Black, Almut Kirchner und Jürg Füssler

INFRAS, Binzstrasse 23, 8045 Zürich

Tel. +41 44 205 95 95

info@infras.ch

Zitiervorschlag: Oberpriller, Q., Schmid, N., Kemmler, A., Gubler, L., Bogler, S., Giger, D., Piegsa, A., Brutsche, A., Kreidelmeyer, S., Vu, M. Ph., Black, B., Kirchner, A., Füssler, J. (2026): Treibhausgasemissionen unter verschiedenen sozioökonomischen und klimapolitischen Szenarien für die Schweiz. Modellierung und Analyse. Infras, Prognos, WSL. Zürich.

<http://doi.org/10.55419/wsl:42766>

Diese Arbeiten wurden durch das National Centre for Climate Services NCCS finanziert. Sie wurden im Rahmen des Programms Entscheidungsgrundlagen für den Umgang mit dem Klimawandel in der Schweiz (NCCS-Impacts) durchgeführt.

Alle Inhalte stehen, soweit nicht anders angegeben, unter der Creative Commons-Lizenz CC BY 4.0.



Inhalt

Glossar 6

Aufbau des Berichtes und Zusammenfassung	9
1. Einleitung	10
2. Beschreibung der verwendeten Szenarien	12
2.1. Sozioökonomische Szenarien für die Schweiz (SSP-CH)	12
2.2. Klimapolitische Instrumente für die Schweiz (SPA)	16
3. Beschreibung Modellierungsansatz	21
3.1. Modellierungsansatz	21
3.2. Wirkungsmatrix als Kern der Modellierung	24
3.3. Szenarioparameter	27
3.4. Klimapolitische Instrumente (SPA)	29
3.5. Systematik und Systemgrenze der Treibhausgasbilanzierung	30
4. Verkehr	35
4.1. Modellbeschreibung	35
4.2. Bestehende Arbeiten und Datenquellen	44
4.3. Beschreibung Szenarien für Sektor Verkehr	44
4.4. Modellierung Wirkung	47
4.5. Ergebnisse und Diskussion	53
4.6. Kapitelanhang: Wirkungsmatrizen Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)	68
4.7. Kapitelanhang: Klimapolitische Instrumente (SPA) und deren Wirkung	72
5. Gebäude	78
5.1. Modellbeschreibung	78
5.2. Bestehende Arbeiten, Quellen und Daten	86
5.3. Beschreibung Szenarien für Sektor Gebäude	87
5.4. Modellierung SSP-CH und SPA	90
5.5. Ergebnisse und Diskussion	91
5.6. Kapitelanhang: Wirkungsmatrizen Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)	106
5.7. Kapitelanhang: Klimapolitische Instrumente (SPA) und deren Wirkung	108
6. Industrie	111
6.1. Modellbeschreibung	111

6.2.	Bestehende Arbeit und Daten	115
6.3.	Beschreibung Szenarien für Sektor Industrie	118
6.4.	Modellierung	120
6.5.	Ergebnisse und Diskussion	130
7.	Energiewirtschaft	140
7.1.	Modellbeschreibung	140
7.2.	Bestehende Arbeit und Daten sowie zentrale Modellinputs	146
7.3.	Beschreibung Szenarien für Sektor Energiewirtschaft	149
7.4.	Modellierung	152
7.5.	Ergebnisse und Diskussion	165
8.	Landwirtschaft	182
8.1.	Modellbeschreibung	182
8.2.	Bestehende Arbeiten und Daten	183
8.3.	Beschreibung Szenarien für Sektor Landwirtschaft	183
8.4.	Modellierung	186
8.5.	Ergebnisse und Diskussion	192
9.	Landnutzung	196
9.1.	Beschreibung Modell	196
9.2.	Bestehende Arbeiten und Daten	199
9.3.	Modellierung SSP	199
9.4.	Ergebnisse und Diskussion	206
10.	Importe und Exporte	222
10.1.	Modellbeschreibung	222
10.2.	Bestehende Arbeiten und Daten	223
10.3.	Beschreibung Szenarien für Sektor Import und Exporte	224
10.4.	Modellierung	227
10.5.	Ergebnisse und Diskussion	232
11.	CCS und Negativemissionstechnologien	239
11.1.	Begriffserklärung	239
11.2.	Modellbeschreibung	239
11.3.	Bestehende Arbeit und Daten	241
11.4.	Beschreibung Szenarien für CCS und NET	241
11.5.	Modellierung	244

11.6.	Ergebnisse und Diskussion	247
12.	Gesamtergebnisse	251
12.1.	Endenergieverbrauch	251
12.2.	Treibhausgasemissionen	261
Annex		271
A1.	Übersicht Szenarioparameter	271
A2.	Ergänzende Informationen für Sektor Import und Export	272
A3.	Methodik zur Skalierung von Anteilen	278
A4.	Weitere Grafiken der Sektormodelle	280
A5.	Quellenverzeichnis	281

Glossar

Übersicht Szenarien

Sozioökonomische Szenarien für die Schweiz (SSP-CH)

SSPO-CH	Die genügsame Schweiz: Die Schweiz ist solidarisch, politisch aktiv, nachhaltig, lokal verankert, konsumiert weniger, produziert mehr selbst und lebt trotz geringerem Wohlstand zufrieden.
SSP1-CH	Die effiziente Schweiz: Die Schweiz ist effizient, technologisch fortschrittlich, nachhaltig, zentral organisiert, wirtschaftlich produktiv, sozial ausgeglichen und stark international vernetzt.
SSP3-CH	Die konfliktreiche Schweiz: Die Schweiz ist politisch gespalten, wirtschaftlich rückläufig, isoliert, technologisch stagnierend, sozial instabil und auf Selbstversorgung angewiesen.
SSP4-CH	Die ungleiche Schweiz: Die Schweiz ist sozial gespalten, elitär geprägt, wirtschaftlich exportorientiert, mit wachsender Ungleichheit, schwachem Sozialstaat und zunehmenden gesellschaftlichen Spannungen.
SSP5-CH	Die ressourcenintensive Schweiz: Die Schweiz erlebt wirtschaftliches Wachstum mit hohem Ressourcenverbrauch, fossiler Abhängigkeit, späterem Niedergang, sozialem Zerfall und zunehmender ökologischer Krise.

Szenarien klimapolitischer Instrumente für die Schweiz (SPA)

SPA0	Status Quo: Beschreibt die bestehenden Instrumente der Schweizer Klimapolitik.
SPA1	Grüner Staat: Die Schweizer Klimapolitik basiert auf starken staatlichen Eingriffen, um ambitionierte Klimaziele zu erreichen. Die Instrumente stehen im Einklang mit den Zielen.
SPA2	Ökologische Republik: Die Schweizer Klimapolitik hat ambitionierte Klimaziele, überlässt deren Umsetzung jedoch weitestgehend der Zivilgesellschaft und Wirtschaft.
SPA3	Ordoliberaler Staat: Der Staat hat nur geringe klimapolitische Ambitionen und greift nicht in die Marktwirtschaft oder die Zivilgesellschaft ein, um Emissionen zu reduzieren.
SPA4	Kompensierender Staat: Der Staat hat nur geringe klimapolitische Ambitionen und konzentriert sich darauf, die Gesellschaft und Wirtschaft durch substantielle Eingriffe vor den wirtschaftlichen Belastungen durch Klimapolitik und Klimaschäden zu schützen

Abkürzungsverzeichnis

ARA	Abwasserreinigungsanlage
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug (engl. Battery electric vehicle)
BFS	Bundesamt für Statistik
BIP	Bruttoinlandprodukt
CCS	Kohlenstoffabscheidung und -speicherung (engl. Carbon capture and storage)
CCU	Kohlenstoffabscheidung und -nutzung (engl. Carbon capture and utilization)
CH ₄	Methan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DACCS	Direct Air Capture mit CCS
EBF	Energiebezugsfläche
EE	Erneuerbare Energien
EEV	Endenergieverbrauch
EU	Europäische Union
EU-ETS	Europäischer Emissionshandel (engl. European emission trading system)
F-Gase	Fluorierte Kohlenwasserstoffe (Gruppe hochwirksamer Treibhausgase)
FuE	Forschung und Entwicklung
HEV	Hybrid Electric Vehicle
IWF	Internationaler Währungsfonds
KI	Künstliche Intelligenz
KVA	Kehrichtverwertungsanlage
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry
MIV	Motorisierter Individualverkehr
MuKE	Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich
N ₂ O	Lachgas
NET	Negativemissionstechnologie
NCCS	National Centre for Climate Services
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
PJ	Petajoule
PP	Prozentpunkte
PtX	Power-to-X (strombasierte synthetische Energieträger)
PV	Photovoltaik
PW	Personenwagen (Privatfahrzeuge)
SAF	Sustainable Aviation Fuel

Seco	Staatssekretariat für Wirtschaft
SITC	Standard International Trade Classification
SPA	Szenarien klimapolitischer Instrumente für die Schweiz (engl. Shared policy assumptions)
SSP-CH	Sozioökonomische Szenarien für die Schweiz (engl. Shared socioeconomic pathways)
THG	Treibhausgas
TWh	Terawattstunde
UNO	Vereinte Nationen
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
WTO	Welthandelsorganisation

Aufbau des Berichtes und Zusammenfassung

Dieser Bericht dokumentiert im Detail die Arbeiten des Projekts Treibhausgasemissionen unter verschiedenen sozioökonomischen und klimapolitischen Szenarien für die Schweiz. Eine detaillierte Zusammenfassung der Modellierungsergebnisse ist in Kapitel 12 zu finden. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Szenarien inklusive eines Fazits und möglicher Anwendungen befindet sich zudem in einem separaten Dokument (Oberpriller et al. 2026) auf folgender Webseite: <https://ssp-ch-szenarien.wsl.ch/de/publikationen>.

1. Einleitung

Das National Centre for Climate Services (NCCS) stellt in mehreren aufeinander abgestimmten Projekten Entscheidungsgrundlagen zu den Folgen des Klimawandels sowie zu Anpassungsoptionen für Akteure im Bereich Klimaanpassung und -schutz bereit. Eines dieser Projekte ist Gegenstand dieses Berichts. Es befasst sich mit der Entwicklung und Modellierung sozioökonomischer Szenarien für die Schweiz. Das Projekt besteht aus zwei Teilen.

Der erste Teil ist die Entwicklung von fünf sozioökonomischen Szenarien für die Schweiz. Aufgrund des englischen Begriffs «shared socio-economic pathways» werden diese Szenarien als SSP-CH abgekürzt. Analog zu den globalen SSP, welche die Grundlage für die Sachstandsberichte zum Klimawandel des IPCC bilden, bieten die SSP-CH eine einheitliche Grundlage für Sozioökonomische Szenarien zur Modellierung von Klimaschutz und Anpassung bis 2100. Die SSP-CH sind vor allem in einer separaten Veröffentlichung dokumentiert (siehe Gubler et al. 2026), aber zur Vollständigkeit auch hier kurz dokumentiert.

Der zweite Teil beschäftigt sich mit der Modellierung der Landnutzungsänderungen, des Energieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen — als eine erste Anwendung der SSP-CH im Bereich Klimaschutz — für jedes SSP-CH bis 2100. Dazu entwickeln wir zudem Pakete von klimapolitischen Instrumenten in der Schweiz («shared policy assumptions»; SPA). Der vorliegende technische Bericht beschreibt vorwiegend diese Modellierung und deren Ergebnisse.

Für die Modellierung haben wir Szenarioparameter («Mengefaktoren») für jedes SSP-CH definiert, welche die technischen und gesellschaftlichen Entwicklungen der SSP-CH grob quantifizieren. Diese sind beispielsweise «klassische» Parameter wie Wohnflächen pro Kopf, BIP pro Kopf, Wohnbevölkerung, technische Effizienzsteigerung oder Verkehrsentwicklung, aber auch «neue» Parameter wie Umweltbewusstsein oder Innovation. Vor allem durch den Einbezug letzterer Gruppe von Parametern unterscheidet sich unsere Arbeit von bisherigen Arbeiten. Für die Übersetzung der SPA in quantifizierbare Wirkungen auf die Emissionen haben wir zusätzliche Annahmen über die (grobe) Wirkung der politischen Instrumente auf die Mengenfaktoren wie auf die spezifischen Energieverbräuche und THG-Emissionsfaktoren abgeleitet und eingespeist.

Grundsätzlich bilden die Szenarien — wie oben angemerkt als Explorationen am Rand der aktuell erwartbaren — gesellschaftliche Entwicklungen eher grobkörnig und qualitativ ab. Die schnellen Veränderungen der letzten Jahre sowohl in den USA, in europäischen Staaten als auch auf weiteren geopolitischen Ebenen zeigen jedoch deutlich, dass solche grösseren Ausschläge des gesellschaftlichen Konsenses gegenüber der heutigen «Normalität» inzwischen als sehr viel wahrscheinlicher gesehen werden (müssen) als noch vor wenigen Jahren. Sowohl die Szenarien als auch ihre möglichen Quantifizierungen sind sehr hoch aggregiert und der

betrachtete Zeitraum bis 2100 sprengt den Rahmen üblicher Betrachtungshorizonte. Die Resultate sind daher mit hohen Unsicherheiten behaftet.¹

Aus dieser Sicht erscheint es als wenig sinnvoll, über den langen Zeithorizont mit sehr detaillierten und hoch aufgelösten Modellen zu rechnen – das würde mit hohem Aufwand nur Scheingenauigkeiten produzieren. Als Modellansatz wurden deshalb die bei INFRAS und Prognos vorhandenen hochaufgelösten Bottom-up Modelle für die sektorale Energienachfrage und das Energieangebot aus den Schweizer Energieperspektiven aggregiert. Die vereinfachte Modellierung beschränkt sich auf die wichtigsten Wirkungspfade. Somit bleiben die relevantesten sektoralen Spezifika erhalten, jedoch wurden die Reaktionen auf Veränderungen in Rahmendaten und politischen Einflussgrössen teilweise über sehr einfache Zusammenhänge abgebildet. Entsprechend sind auch die Modellergebnisse mit starken Unschärfen behaftet und eher qualitativ zu interpretieren. Die Modellierung dient insofern mehr der Illustration der Zusammenhänge und relativen Veränderungen zwischen Szenarien, Politikbündeln und Emissionen und ihrer grundlegenden Tendenzen. Als detaillierte Quantifizierung absoluter Grössen sollte sie nicht verstanden werden. Für die Interpretation sind daher vorwiegend die Trends und deren Unterschiede zwischen den SSP-CH bzw. SPA relevant.

Dieser technische Bericht beschreibt das Vorgehen und die Ergebnisse der Modellierung der Treibhausgasemissionen der fünf SSP-CH und der Kombination mit den SPA bis ins Jahr 2100. Die Ergebnisse unterliegen den oben ausgeführten Einschränkungen.

¹ Der Begriff «Unsicherheit» hat verschiedene Definition. In diesem Kontext sind die Szenarien "unsicher" in einem ontologischen Sinn: auf lange Frist kann einerseits die auf komplexen Wechselwirkungen beruhende Entwicklung nicht vorhergesagt werden, und insbesondere können Technologieentwicklungen ebenso wie gesellschaftliche Trends nicht mit guter Sicherheit aus Vorhandenem abgeleitet werden. Im epistemischen Sinn sind die Ergebnisse darüber hinaus noch "unscharf", da sie hoch aggregiert und vereinfacht sind und daher entsprechende quantitativen Unschärfen (Streubereiche) aufweisen. Diese Streubereiche weisen wir allerdings nicht aus.

2. Beschreibung der verwendeten Szenarien

Wir verwenden in diesem Bericht zwei verschiedene Typen von Szenarien: Sozioökonomische Szenarien für die Schweiz (SSP-CH) und Szenarien politischer Instrumente für die Schweiz (SPA). Diese Szenarien und deren Entwicklung sind im Folgenden beschrieben.

2.1. Sozioökonomische Szenarien für die Schweiz (SSP-CH)

2.1.1. Motivation und Vorgehen zur Entwicklung

Die sozioökonomischen Entwicklungen der SSP-CH wurden von der WSL entwickelt (für Details siehe die separate Publikation (siehe Gubler et al. 2026). In Analogie zu den globalen SSP in den Sachstandsberichten des IPCC beschreiben die SSP-CH ein breites Spektrum an möglichen gesellschaftlichen, ökonomischen als auch technologischen Entwicklungen. Diese sind bewusst so formuliert, dass sie auch grundlegende Änderungen abdecken, z.B. bezüglich des gesellschaftlichen Zusammenhaltes. Sie weichen deshalb bewusst ab von den heute gängigen Vorstellungen über die Zukunft, mit denen auch Planungsgrundlagen für politische Strategien (etwa von BFS und Seco) erstellt werden. Das Ziel ist, ein möglichst breites Spektrum an Möglichkeiten abzudecken. Dies betrifft sowohl mittel- als auch langfristige Veränderungen.

Ausgangspunkt der Arbeiten ist die Erkenntnis, dass die möglichen zukünftigen Entwicklungen von Treibhausgasemissionen eine wichtige Grundlage für die Entscheidungsfindung der Klimapolitik auf nationaler sowie kantonaler und kommunaler Ebene bilden. Bestehende Projektionen, die von der Bundesverwaltung für Planungszwecke verwendet werden, bilden allerdings nicht das gesamte Ausmass des in Zukunft möglichen sozioökonomischen Wandels in der Schweiz ab. Sie beziehen sich zumeist auf Szenarien, die eine eher stetige Entwicklung sozioökonomischer Kenngrössen auf Basis eines impliziten Systems an gesellschaftlichen Wertvorstellungen, die den heutigen ähnlich sind, fortschreiben (sogenannte Trendanalysen). So basieren beispielsweise die Schweizer Energieperspektiven auf einem, seitens des Perspektivstabs des Bundes², vorgegebenen Entwicklungspfad der sozioökonomischen Kenngrössen (BIP, Bevölkerung, Branchenstruktur auf der oberen Ebene). Dieser beschreibt die Rahmenbedingungen der Gesellschaft, die mit Energie versorgt werden soll. Die dort abgebildeten Energie- und Treibhausgasszenarien beschreiben Auswirkungen unterschiedlicher energie- und klimapolitischer Entwicklungen und Zielsetzungen auf der Basis dieser Rahmendaten. Die Abhängigkeit des Systems von moderaten Änderungen dieser Rahmenbedingungen wird in Sensitivitätsanalysen ermittelt. Fundamentale gesellschaftliche Veränderungen und deren Auswirkungen werden nicht untersucht.

² Der Perspektivstab der Bundesverwaltung erarbeitet im Auftrag des Bundesrates Grundlagendokument für die Legislaturplanung alle vier Jahre.

Die fünf neuen SSP-CH werden jeweils durch ein Set an Schlüsselfaktoren modelliert, deren Dynamik fundamental unterschiedliche Entwicklungen der Schweiz darstellen. Es sind sowohl gesellschaftliche, ökonomische als auch technische und innovationsseitige Entwicklungen berücksichtigt. Hierbei geht es um grundsätzliche Veränderungen in wichtigen politischen Positionierungen und gesellschaftlichen Haltungs- und Werteorientierungen, z.B. im Verhältnis zum Ausland, in der Rolle des Staates und der Wirtschaft, zur Akzeptanz von Technologien sowie in Relation zu geopolitischen Rahmenbedingungen. Die SSP-CH sind nicht als Prognose der Zukunft zu verstehen und sind nicht politisch wertend, sondern wurden entwickelt, um ein möglichst breites Spektrum an Möglichkeiten der zukünftigen Entwicklung aufzuzeigen und zu analysieren. Daher sind die Szenarien bewusst eher in den Randbereichen des Möglichen angesiedelt und stellen teils grundlegend veränderte gesellschaftliche Ordnungen dar.

Die Szenarien sind explizit nicht mit Wahrscheinlichkeiten behaftet³ und es wurde bewusst darauf verzichtet, ein «middle of the road» oder «wahrscheinlichstes» Szenario einzuführen, welches in den globalen Szenarien das SSP2 ist. Daher gibt es kein SSP-2-CH. Der Grund ist, dass SSP2 oft fälschlicherweise als «Business-as-usual»-Szenario oder wahrscheinlichstes Szenario interpretiert wird. Um dieser Fehlanwendung vorzubeugen, haben wir uns gezielt an den Rändern des Plausiblen bewegt. So bleibt die Szenariomethode ihrem Zweck treu – nämlich verschiedene mögliche Zukünfte vergleichend zu betrachten. Im Gegensatz zu Trendanalysen, die auf historische Datenreihen, eng abgegrenzte Systeme und kürzere Zeithorizonte fokussieren, sollen Szenarien nicht isoliert, sondern immer im Zusammenspiel verstanden werden.

Die SSP-CH wurden in Anlehnung an die globalen SSP (O'Neill et al. 2017) entwickelt. Dazu wurden Fokusgespräche geführt mit 59 Expertinnen und Experten aus 20 wissenschaftlichen Institutionen der Deutsch- und West-Schweiz. Basierend auf einer Konsistenzanalyse der Schlüsselfaktoren und der möglichen Ausprägungen, wurden mithilfe der ScenarioManagerTM Software fünf Rohszenarien berechnet, die anschliessend in fünf Workshops (85 Teilnehmende) erweitert und konsolidiert wurden. Die resultierenden Szenarien wurden den globalen SSP (O'Neill et al. 2017) und den europäischen SSP (Mitter et al. 2020) gegenübergestellt. Dabei können insbesondere für das SSP5-CH Abweichungen von den übergeordneten SSP5 festgestellt werden. Das SSP0-CH hat kein Pendant. Mit dem Ansatz, mittels Konsistenzanalyse neue SSP zu entwickeln, entsprechen wir Empfehlungen, die von O'Neill et al. 2020 vorgeschlagen werden, um die SSP zu erweitern, zu aktualisieren und nutzbar zu machen.

2.1.2. Beschreibung der fünf sozioökonomischen Szenarien (SSP-CH)

Im Folgenden sind die fünf SSP-CH zusammengefasst wiedergegeben:

³ In explorativen, schlüsselfaktorbasierten Szenarien wird keine Wahrscheinlichkeit, sondern lediglich Plausibilität beurteilt.

SSP0-CH: Die genügsame Schweiz

Die Schweizer Bevölkerung beteiligt sich stark am politischen und gesellschaftlichen Leben. Sie hat einen ausgeprägten Gemeinschaftssinn und ist solidarisch. Der Sozialstaat ist ausgebaut, das Vertrauen in politische Institutionen hoch. Die Menschen konsumieren weniger: Nutzgegenstände werden lange verwendet, Energie wird gespart, die zurückgelegten Wegstrecken pro Tag sind gesunken. Die Wirtschaftsleistung ist insgesamt zurückgegangen. Obwohl die Geburtenrate leicht gestiegen ist, hat die Wohnbevölkerung abgenommen: Aufgrund gesteigerter globaler Lebensqualität und reduzierter Arbeitsmöglichkeiten in der Schweiz, wandern weniger Menschen ein. Weitreichende Umverteilungsmassnahmen haben die Verteilung von Einkommen und Vermögen in der Bevölkerung angeglichen. Materieller Wohlstand und Lebensstandard sind gesunken, das Wohlbefinden ist hingegen hoch. Regionale Zentren und Stadtquartiere wurden gestärkt und bieten eine ausreichende Grundversorgung. Die Bevölkerung ist lokal verwurzelt. Der Selbstversorgungsgrad der Schweiz in der Lebensmittel- sowie Energieproduktion ist hoch, auch weil der Energieverbrauch stark abgenommen und sich die Ernährungsweise geändert hat. Die politischen Beziehungen zur föderalistisch organisierten Europäischen Union (EU) sind eng, die Schweiz ist in europäische Aktivitäten eingebunden. Europäische und weltpolitische Herausforderungen werden international koordiniert angegangen. Die Weltwirtschaft ist allerdings weniger vernetzt als heute.

SSP1-CH: Die effiziente Schweiz

Die Schweizer Gesellschaft stellt Effizienz und Nachhaltigkeit ins Zentrum. Politische Prozesse und Institutionen funktionieren verlässlich, die Bevölkerung vertraut beiden. Vereinheitlichte Verwaltungsabläufe haben dazu geführt, dass gewisse Kompetenzen stärker zentralisiert wurden. Die Wirtschaft hat sich mithilfe effizienter Technologien zu einer Kreislaufwirtschaft entwickelt, der Ressourcenverbrauch und das Abfallaufkommen sind dadurch stark gesunken. Auch andere Gesellschaftsbereiche wie das Gesundheitswesen oder die Mobilität sind stark technologisiert und effizient organisiert. Hohe Innovationsraten und Effizienzgewinne führen zu einer hochproduktiven Wirtschaft. Die Gewinne aus dieser Produktivitätssteigerung kommen durch Rückverteilung der ganzen Bevölkerung zugute. Die Wirtschaftsleistung wächst stetig auf moderatem Niveau - auch aufgrund einer anhaltenden Zuwanderung bei stagnierender Geburtenrate. Die Flächennutzung ist sehr effizient organisiert. Die Städte sind stark verdichtet. Lebensmittel werden grösstenteils importiert. Die noch vorhandene landwirtschaftliche Produktion ist technologisiert und nutzt Flächen optimal. Die Energieproduktion basiert zu 100 Prozent auf erneuerbaren Energiequellen aus dem Inland und Ausland. Die Schweiz pflegt enge politische und wirtschaftliche Beziehungen zum Ausland, insbesondere zur EU. Die Bevölkerung hält sowohl die individuelle Freiheit als auch das Gemeinwohl sehr hoch.

SSP3-CH: Die konfliktreiche Schweiz

Der Wohlstand der Schweizer Bevölkerung hat abgenommen. Die Politik ist polarisiert, lösungsorientierte Kompromisse sind kaum möglich. Korruption und Klientelismus nehmen zu. Unternehmen und Staat investieren kaum in neue Technologien, was zu steigenden Preisen, sinkendem Export und sinkender Qualität führt. Der Zustrom ausländischer Fachkräfte ebbt ab, da Innovationen und Investitionen sinken, die Wirtschaftsleistung geht zurück, viele Menschen wandern aus. Sozialstaatliche Leistungen werden abgebaut und Investitionen in erneuerbare Energien und Landwirtschaft werden eingestellt. Das Produktionsvolumen schrumpft und damit die Wirtschaft, viele Unternehmen wandern aus oder müssen schliessen. Internationale Beziehungen werden nur noch minimal gepflegt, die Schweiz ist zusehends isoliert. Die Grundversorgung der Bevölkerung wird immer schwieriger. Die Bevölkerung, die in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts in Städte gezogen ist, um dort Arbeit zu finden, kehrt zunehmend aufs Land zurück, um sich mittels Selbstversorgung durchzuschlagen. Soziale Gruppierungen und Familienbande bieten soziale Absicherung. Konflikte um Ressourcen nehmen zu. Der Staat setzt seine spärlichen Mittel zur Wahrung der inneren Sicherheit ein. Die EU existiert noch, hat aber viele Mitgliedstaaten verloren. Auch international sind Vernetzung und Handelsabkommen stark reduziert; internationale Organisationen haben an Relevanz verloren.

SSP4-CH: Die ungleiche Schweiz

Die Schweizer Gesellschaft ist gespalten. Eine Elite dominiert das wirtschaftliche und politische Geschehen. Diese ist international gut vernetzt und pflegt einen ressourcenintensiven Lebensstil. Aufgrund produktivitätssteigernder Technologien wächst die Wirtschaft bis ans Ende des Jahrhunderts. Von den daraus resultierenden Produktivitätsgewinnen profitiert hauptsächlich die Elite, während für den Mittelstand zunehmend Erwerbsmöglichkeiten wegfallen oder sich in den Niedriglohnsektor verlagern. Hochspezialisierte Fachkräfte werden international rekrutiert. Die Bevölkerung nimmt in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts ab. Der starke Staat schafft optimale Rahmenbedingungen für die immer stärker auf den Export ausgerichtete Wirtschaft, während er sozialstaatliche Leistungen wie Bildung, Betreuung und Gesundheitsversorgung abbaut oder privatisiert. Der Zugang zu Grundleistungen und sozialer Absicherung ist nicht gesichert. Sie werden für einen Grossteil der Bevölkerung unerschwinglich. Dies führt zu grossen Unterschieden bezüglich des Ausbildungsstands und der Lebenserwartung. Die starke Polarisierung zeigt sich auch räumlich: Die Elite lebt in gesicherten, weiträumigen Quartieren, der ehemalige Mittelstand in dichten Agglomerationen. Insgesamt nimmt die Bevölkerungszahl ab. Energie importiert die Schweiz grösstenteils. Grosse industrielle Landwirtschaftsbetriebe bewirtschaften das Mittelland. Aufgrund der Aufgabe der Landwirtschaft in den Alpen und

Voralpen entstehen grosse Freiflächen, die von Privaten genutzt werden oder verwildern. In der Bevölkerung nehmen soziale Spannungen zu.

SSP5-CH: Die ressourcenintensive Schweiz

Die Schweizer Gesellschaft profitiert bis in die zweite Hälfte des Jahrhunderts von einer stark wachsenden Wirtschaft. Die Immigration ist hoch. Die Wirtschaft basiert auf herkömmlichen Technologien und fossilen Energieträgern. Ressourcen und Flächen sind stark beansprucht durch ressourcenintensive Lebensstile und Konsummuster, industrielle landwirtschaftliche Produktion und flächenintensive Verkehrsinfrastruktur. Grosse Städte und Agglomerationen dominieren das Landschaftsbild. Importe an fossiler Energie decken die hohe Nachfrage. Gegen Ende des Jahrhunderts werden die Handels- und Energieabkommen aus geopolitischen Gründen vermehrt gekündigt, die verbleibenden Partner erhöhen aufgrund begrenzter Ressourcen die Preise. Dies lässt viele Unternehmen abwandern oder schliessen, die Wirtschaftsleistung sinkt, der Wohlstand nimmt ab. Trotz sinkender Einkommen und Vermögen hält die Bevölkerung an ihren ressourcenintensiven Konsummustern fest, kann sich diese aber immer weniger leisten. Weil Sozialleistungen der öffentlichen Hand reduziert sind, kann der Staat den Wohlstandsverlust nicht auffangen, die Menschen beginnen auszuwandern und die Geburtenrate sinkt. Der Zusammenhalt in der Schweizer Gesellschaft ist schwach. Die internationale Konkurrenz um Ressourcen und Energie führt zu protektionistischen Massnahmen und Isolation der Schweiz. Gegen Ende des Jahrhunderts nehmen die Kosten durch die stark degradierte Umwelt zu. Immer öfter muss der Staat Massnahmen per Notrecht umsetzen, da schnelles Handeln erforderlich ist.

2.2. Klimapolitische Instrumente für die Schweiz (SPA)

Komplementär zu den SSP-CH, die von der WSL entwickelt wurden, haben wir in diesem Bericht SPA entwickelt. Die Abkürzung SPA steht für den englischen Begriff «Shared Policy Assumptions». SPA wurde von (Kriegler et al. 2014) eingeführt, um die Modellierung von Politikinstrumenten zu harmonisieren. Dies hat sich aber auf wenige Aspekte beschränkt, z.B. inwiefern CO₂-Preise global harmonisiert eingeführt werden.

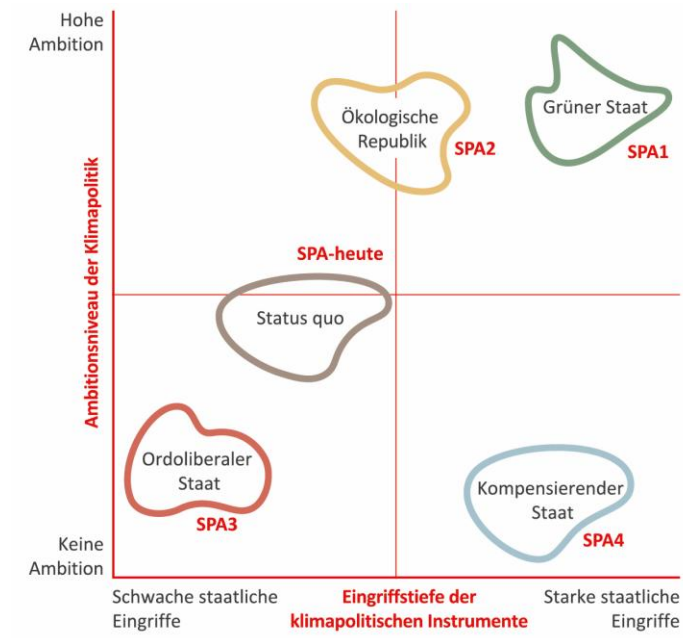
Wir erweitern in diesem Bericht die Anwendung von SPA und definieren vier unterschiedliche SPA (SPA1 bis SPA4), die jeweils konkrete politische Instrumente je Sektor beinhalten. Diese SPA kombinieren wir mit den SSP-CH, um klimapolitische Instrumente und deren Auswirkungen auf die Treibhausgasemissionen systematisch zu analysieren. Bei der Kombination der SPA mit den SSP-CH haben wir darauf geachtet, dass die Art und Ambition der politischen Instrumente der SPA mit den gesellschaftlichen Entwicklungen der SSP-CH kompatibel sind.

Zudem führen wir SPA0 ein, welches die derzeit bereits implementierten politischen Instrumente beschreibt. Ein SSP-CH ist daher immer mit einem SPA kombiniert: Entweder mit SPA0, wenn die Situation ohne geänderte Instrumente betrachtet werden soll. In diesem Fall verzichten wir teilweise darauf, zu erwähnen, dass das SSP-CH mit SPA0 kombiniert ist. Oder das SSP-CH ist mit SPA1 bis SPA4 kombiniert, um klimapolitische Änderungen abzubilden. Diese Kombinationen sind immer explizit genannt (z.B. SSP1-CH / SPA1).

Die konkreten Instrumente der SPA je Sektor und deren Modellierung sind in den jeweiligen Sektor-Kapiteln beschrieben. Allgemein lassen sich die SPA anhand zweier Dimensionen unterscheiden: politische Ziele (Ambition des Klimaschutzes) und politische Mittel (staatlicher Interventionsgrad). Die resultierende Vier-Felder-Matrix erlaubt eine Einordnung der SPA in Bezug auf diese beiden Achsen (siehe Abbildung 1):

- SPA0 (Status Quo): Beschreibt die bestehenden Instrumente der Schweizer Klimapolitik.
- SPA1 (Grüner Staat): Die Schweizer Klimapolitik basiert auf starken staatlichen Eingriffen, um ambitionierte Klimaziele zu erreichen. Die Instrumente stehen im Einklang mit den Zielen.
- SPA2 (Ökologische Republik): Die Schweizer Klimapolitik hat ambitionierte Klimaziele, überlässt deren Umsetzung jedoch weitestgehend der Zivilgesellschaft und Wirtschaft.
- SPA3 (Ordoliberaler Staat – auch: Marktliberaler Staat): Der Staat hat nur geringe klimapolitische Ambitionen und greift nicht in die Marktwirtschaft oder die Zivilgesellschaft ein, um Emissionen zu reduzieren.
- SPA4 (Kompensierender Staat – auch: Erhaltender Staat): Der Staat hat nur geringe klimapolitische Ambitionen und konzentriert sich darauf, die Gesellschaft und Wirtschaft durch substanzielle Eingriffe vor den wirtschaftlichen Belastungen durch Klimapolitik und Klimaschäden zu schützen.

Abbildung 1: SPA und deren Dimensionen



Für eine Beschreibung der Abkürzungen SPA siehe Glossar. Bemerkung: In anderen Publikationen zu dieser Arbeit wird das SPA3 auch *Marktliberaler Staat* und SPA4 auch *Erhaltender Staat* genannt.

Grafik INFRAS.

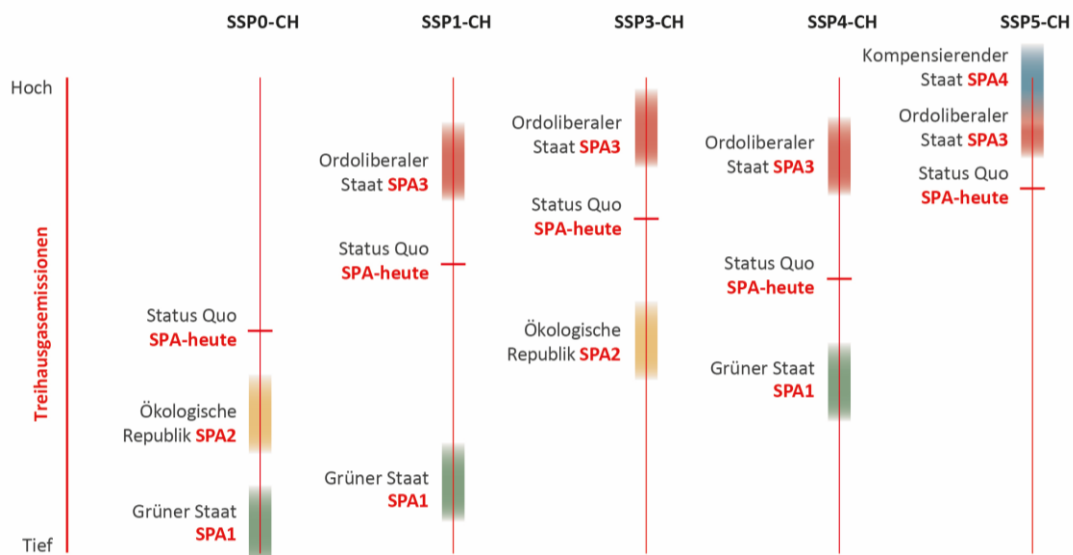
Die Matrix ist grundsätzlich international anschlussfähig und orientiert sich an etablierten politikwissenschaftlichen Typologien. Die konkrete Ausgestaltung der SPA – also die Auswahl und Kombination der Instrumente – basiert jedoch auf den spezifischen Rahmenbedingungen der Schweiz. Grundsätzlich lassen sich die vier idealtypischen SPA auch auf andere Länder wie Deutschland, Frankreich oder die USA übertragen, sofern der jeweilige politische und institutionelle Kontext berücksichtigt wird. Eine Übertragung der SPA-Logik ist also möglich, erfordert aber eine Anpassung an die jeweiligen nationalen Gegebenheiten.

In einem zweiten Schritt kombinieren wir die SPA mit den SSP-CH (siehe Abbildung 2). Diese Kombination erlaubt eine Projektion möglicher zukünftiger Emissionsentwicklungen in der Schweiz unter Annahme unterschiedlicher gesellschaftlicher Rahmenbedingungen und politischer Instrumente. Nicht jede SSP-SPA-Kombination ist plausibel. Je nach SSP-CH variieren die SPA in ihrer Realisierbarkeit und Emissionsminderungskraft erheblich. Beispielsweise ermöglichen SSP1-CH die Umsetzung ambitionierter SPA wie SPA1 (Grüner Staat) oder SPA2 (Ökologische Republik). In Pfaden wie SSP5-CH sind hingegen SPA mit geringer klimapolitischer Ambition, etwa SPA3 oder SPA4, plausibel.

Um den Modellierungsaufwand in Grenzen zu halten und v.a., weil nicht jedes SPA zu jedem SSP-CH passt, modellieren wir nur 7 Kombinationen. Die in der Grafik dargestellten

Kombinationen von SSP-CH und SPA sind deshalb relevant, weil sie klimapolitisch und gesellschaftlich kohärente Zukunftsszenarien abbilden. Ambitionierte SPA wie der „Grüne Staat« (SPA1) passen zu SSP-CH wie SSP1-CH, während weniger ambitionierte SPA (z. B. SPA3 „Ordoliberaler Staat“) mit beispielsweise SSP3-CH oder SSP4-CH korrespondieren. Kombinationen, in denen sich klimapolitische Ziele und sozioökonomische Rahmenbedingungen widersprechen – etwa ein fossiles Wachstumsszenario (SSP5-CH) mit einer stark intervenierenden Klimapolitik (SPA1) – sind hingegen nicht konsistent und deshalb ausgeschlossen. Die Emissionen können sich aufgrund der SPA sowohl erhöhen als auch reduzieren.

Abbildung 2: SSP-CH/SPA-Kombinationen und illustrative Auswirkungen auf Treibhausgasemissionen



Der Status Quo bezeichnet das jeweilige Niveau der Treibhausgasemissionen in den SSP-CH ohne zusätzliche SPA. Die Emissionen mit zusätzlichen SPA liegen dann über oder unter diesem Niveau. Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Ein SPA enthält die gegenüber dem Status Quo wichtigsten implementierten, geänderten, oder gestrichenen Instrumente. In der sektoralen Analyse wurden diese für jeden SPA sektorweise auf Basis eines Literatur-Reviews systematisch gesammelt. Für jedes SPA entwickeln wir also – basierend auf der „Longlist« der Politikinstrumente – spezifische Instrumentenmixe für die folgenden Sektoren: Energie, Verkehr, Landwirtschaft, Industrie, Gebäude, Import/Export, Negativemissionstechnologien und Landnutzung. Für jeden Sektor und jedes SPA schlagen wir eine Auswahl an Instrumenten vor, die die Wirkungslogik und Essenz des jeweiligen SPA repräsentieren.

Die Instrumente sind jeweils für jedes SPA in die Kategorien Autorität, Finanzen, Organisation und Information aufgeteilt (eine klassische Typologie aus der Politikwissenschaft). Die Kategorie Autorität beinhaltet Verbote, Vorschriften und marktbasierende Ansätze wie das Setzen einer CO₂-Steuer. Die Kategorie Finanzen beinhaltet Subventionen und Steueranreize. Organisation betrifft die Gestaltung staatseigener Aktivitäten oder Betriebe, wie über öffentliche Beschaffung oder Richtlinien für staatliche Unternehmen, wie im Bahnverkehr. Die Kategorie Information beinhaltet Informationskampagnen oder sonstige oder andere wissens- und kommunikationsbasierte Ansätze.

3. Beschreibung Modellierungsansatz

3.1. Modellierungsansatz

In der vorliegenden Studie soll der Einfluss der sozioökonomischen Szenarien der Schweiz (SSP-CH) und zugeordneter politischer Instrumente (SPA) auf Treibhausgasemissionen (für die Landnutzungsmuster nur Einfluss SSP-CH) analysiert werden. Eine Schlüsselanforderung für unseren Modellierungsansatz war es, die zunächst qualitativ beschriebenen Entwicklungen der SSP-CH und SPA in eine quantitative Modellierung von Einflussfaktoren und dann in die daraus resultierenden Emissionen zu übersetzen. Daher verwenden wir einen Bottom-up-Ansatz, der massgeschneiderte Module von reduzierter Komplexität für verschiedene Sektoren umfasst. Die modellierten Sektoren sind Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, Industrie, Energie, Import/Export und negative Emissionstechnologien (NETs). Eine detaillierte Beschreibung dieser Sektoren ist in den jeweiligen Kapiteln zu finden.

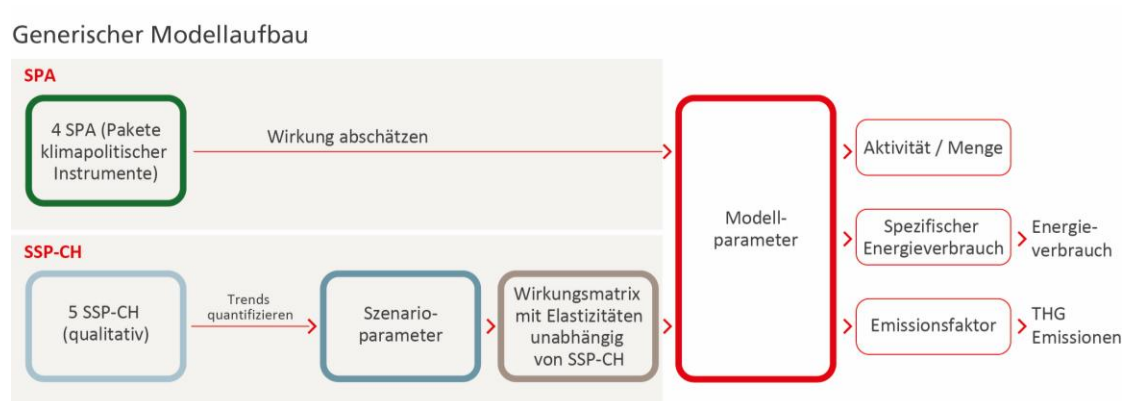
Die Module sind so aufgebaut, dass sie jeweils geeignete Anknüpfungspunkte bieten, um die Wirkung sektorspezifischer Entwicklungen anhand transparenter Wirkungspfade zu berücksichtigen. Komplexe Modelle - wie integrierte Bewertungsmodelle (IAM) oder allgemeine Gleichgewichtsmodelle - haben vordefinierte Andockpunkte (v.a. Preisänderungen), die kaum verändert werden können und daher relativ unflexibel sind. Unser Modell ist hingegen von reduzierter Komplexität, was es uns erlaubt, benutzerdefinierte Anknüpfungspunkte zu erstellen. Dies ermöglicht es, die Auswirkungen der definierten Einflussfaktoren zu simulieren und so nachvollziehbar zu machen. In einem Kontext mit so hoher Unsicherheit der Rahmenbedingungen sind detaillierte Modellierungen nur begrenzt sinnvoll, da sie Scheingenauigkeiten produzieren. Um mit dieser Art der Unsicherheit transparent umzugehen, sind aus unserer Sicht Modelle reduzierter Komplexität daher die beste Wahl.

Die Sektor-Module basieren auf detaillierten bottom-up-Simulationsmodellen, die bei Infras und Prognos für die Berechnung von Energieszenarien vorhanden sind. Sie gehen von den umfassenden Erfahrungen aus der Arbeit mit detaillierten Modellen aus, bezüglich der notwendigen Differenzierung von Emissionsquellen und der Dynamik in den jeweiligen Sektoren und aggregieren diese. Damit bleiben wenige grundsätzliche Mengenfaktoren und ggf. generische Entwicklungen des Energiemixes mit entsprechender Entwicklung der Emissionsfaktoren als Variablen übrig, die in (vermeintlich) einfachen und nachvollziehbaren Zusammenhängen verknüpft werden. Die Erfahrung mit detaillierten Modellen erlaubt es uns somit, alle Elemente, Differenzierungen, Verknüpfungen und Entwicklungen, welche auf die Modellresultate keinen wesentlichen Einfluss haben, wegzulassen und damit das Modell zu vereinfachen.

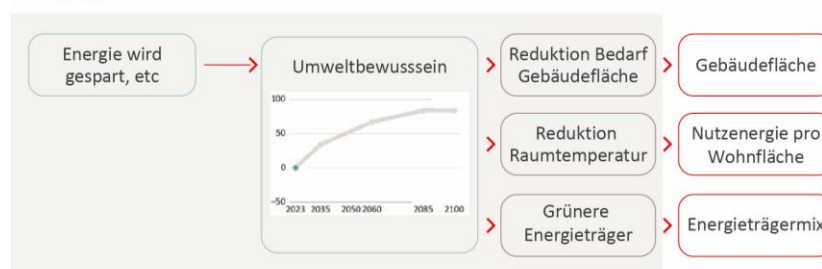
Abbildung 3 zeigt das prinzipielle Vorgehen der Sektor-Modellierung: Für die SSP-CH eine Reihe von «Szenarioparameter» definiert und deren Trends quantifiziert. Die Änderung der

Szenarioparameter wird mittels Elastizitäten in Änderungen der Modellparameter übersetzt. Da es mehrere Szenarioparameter und Modellparameter gibt, bilden die jeweils verknüpfenden Elastizitäten eine Wirkungsmatrix (siehe Kapitel 3.2). Die Szenarioparameter weisen je nach SSP-CH einen anderen Verlauf aus. Die Elastizitäten ändern sich hingegen nicht. Die Emissionen errechnen sich schliesslich auf Basis der Modellparameter als Produkt der jeweiligen Aktivität/Menge (z.B. beheizte Wohnfläche oder zurückgelegte Personenkilometer), dem spezifischen Energieverbrauch (z.B. Nutzenergie pro Wohnfläche oder Energie pro Kilometer) und dem Emissionsfaktor, der sich aus dem entsprechenden Energieträgermix ergibt. Diese einzelnen Schritte werden in den folgenden Kapiteln näher erklärt.

Abbildung 3: Modellierungsansatz



Beispiel: Modellierung SSP0-CH im Gebäudesektor



Beispiel: Steigt das Umweltbewusstsein um 50 Prozent, reduziert sich der Bedarf an Gebäudefläche um 25 Prozent, falls die Elastizität für diesen Wirkungspfad -0.5 beträgt.

Grafik INFRAS.

Um die Kompatibilität und Vergleichbarkeit zwischen den Sektor-Modulen zu gewährleisten, weichen wir so wenig wie möglich von diesem generischen Ansatz ab. Die Module haben wir anhand bestehender Daten, der Literatur und Expertenschätzung validiert und kalibriert. Das betrifft sowohl Inputs als auch Outputs. Falls Inputdaten von guter Qualität vorhanden sind, haben wir diese immer unverändert im Modell verwendet. Für gewisse Inputparameter und

Wirkungspfade sind allerdings kaum Daten verfügbar (z.B. der Einfluss des Umweltbewusstseins). In solchen Fällen haben wir die Inputwerte so kalibriert, dass das Modell nachvollziehbare Resultate liefert. Die Grenzen zwischen den Sektoren entsprechen dem gängigen Vorgehen in anderen Studien und sind so gezogen, dass keine Doppelzählungen, aber auch keine relevanten Lücken in der Analyse entstehen.

Werden Input-Parameter in mehreren Sektoren verwendet (z.B. Bevölkerung oder BIP pro Kopf), wird deren einheitliche Verwendung sichergestellt. Das Gleiche gilt für politische Instrumente, welche in mehreren Sektoren wirken. In einigen Fällen werden die Interaktionen zwischen verschiedenen Sektoren berücksichtigt, z.B. hängt die Stromproduktion und die Wärmeproduktion von der Nachfrage in den relevanten Verbrauchssektoren (Gebäude, Industrie und Verkehr) ab.

Wir modellieren auch relevante Nicht-CO₂-Treibhausgase (z.B. Methan CH₄ und Lachgas N₂O in der Landwirtschaft und F-Gase in der Industrie). Diese sind bereits heute von Bedeutung und dürften in Zukunft einen grösseren relativen Anteil an den gesamten Treibhausgasen ausmachen, da sie teils schwer zu vermeiden sind (z.B. Methanemissionen in der Landwirtschaft). Daher ist der Einbezug von Nicht-CO₂-Emissionen in einer ambitionierten, stringenten Klimapolitik entscheidend. Ausserdem modellieren wir zusätzlich indirekte Emissionen, welche mit dem Import und Export von Gütern verbunden sind und einen Grossteil der Schweizer Emissionen in einer erweiterten Sichtweise ausmachen. Die indirekten Emissionen werden separat ausgewiesen.

Für die Auswirkungen des Klimawandels wird in allen SSP-CH und SPA das globale Emissionsszenario RCP 4.5 unterstellt. Dieses Szenario ist zwar teils nicht konsistent mit den SSP-CH, welche unterschiedliche globale Entwicklungen postulieren. Allerdings überwiegen die Vorteile, ein einziges RCP-Szenario zu verwenden. Insbesondere ist es aus methodischer Sicht vorteilhaft, die Einflüsse des Klimawandels konstant zu belassen, sodass unterschiedliche Emissionen nur die Unterschiede der SSP-CH und SPA widerspiegeln.⁴

Die Module Verkehr, Gebäude und Landwirtschaft modellieren die «Stützjahre» 2023, 2035, 2060, 2085 und 2100. Jahresdaten zwischen diesen Stützstellen sind linear interpoliert. Zudem ist das Jahr 2050 in den Abbildungen separat ausgewiesen, da dies ein wichtiges Zieljahr der Klimapolitik ist. Die Module Industrie und Energiewirtschaft modellieren hingegen alle Einzeljahre, weil diese zeitliche Auflösung auch in den Modellen genutzt wird, die als Ausgangspunkt

⁴ Des Weiteren wäre es einerseits ein bedeutender Mehraufwand, verschiedene RCPs zu modellieren. Andererseits hat die Klimaerwärmung nur beschränkten Einfluss auf die Modellergebnisse. So verringern beispielsweise höhere Temperaturen im Winter den Energieverbrauch für die Raumheizung, der Kühlleistungsbedarf im Sommer steigt jedoch. Solche Effekte sind zwar von Relevanz, jedoch nicht dominant im Vergleich zu den modellierten Einflüssen. Zudem ist der Unterschied zwischen RCP 4.5 und RCP 8.5 erst ab ca. 2050 relevant. Die neuen CH2025 und das deren Konzept der «Global Warming Level» waren zum Zeitpunkt des Projektbeginns noch nicht verfügbar. Das RCP Szenario 4.5 entspricht ca. einer 2° Welt.

für diese Studie genutzt wurden. Dieser Unterschied hat keine relevanten Auswirkungen auf die Ergebnisse

Weil sozioökonomische und technische Entwicklungen und politische Instrumente über lange Zeiträume modelliert werden, zu deren Wirkung es kaum verlässliche Daten gibt, basieren viele Parameter und Annahmen in der Modellierung auf Expert:innenschätzungen durch das Projektteam. Die Ergebnisse dieser Studie sind deshalb als Illustrationen der grundsätzlichen Zusammenhänge und Trends und als mit hohen Unschärfen behaftete Richtungsindikation zu verstehen. Wie schon für die zugrundeliegenden Szenarien gilt auch für die modellierten Emissionen, dass diese eine mögliche, plausible und konsistente Entwicklung der Emissionen innerhalb der SSP-CH darstellen und — aufgrund der nicht spezifizierbaren Eintrittswahrscheinlichkeiten und Unschärfen — keine Projektion oder Prognose darstellen. Die wichtigen und interessanten Aspekte der Ergebnisse sind somit nicht die einzelnen absoluten Werte und Datenpunkte, sondern die grundlegenden Tendenzen und Unterschiede zwischen den SSP-CH und den SPA.

Alle Szenarien in diesem Projekt sind explorativ, d.h. es werden weder in den SSP-CH noch in den SPA Ziele vorgegeben. Der Grund ist, dass wir die Wirkung von gesellschaftlichen, technischen und politischen Entwicklungen modellieren wollen. Im Gegensatz dazu geben normative Szenarien ein Ziel vor und die Modellierung beschäftigt sich dann beispielsweise damit, wie dieses Ziel möglichst effizient erreicht werden kann. Normative Szenarien werden in diesem Projekt nicht verwendet.

Ausgehend vom Startjahr 2023 modellieren wir das Jahr 2035 und anschliessend alle 25 Jahre 2060, 2085 bzw. die letzten 15 Jahre (2100). Diese Zeitschritte wurden von dem Gesamtprojekt SSP-CH so vorgegeben. Die Ergebnisse zwischen diesen Stützjahren sind jeweils interpoliert. Zusätzlich zeigen wir in den Ergebnissen noch explizit das Jahr 2050, wegen seiner zentralen Bedeutung in der Klimapolitik.

3.2. Wirkungsmatrix als Kern der Modellierung

Szenarioparameter und Trendwerte SSP-CH

Die sozioökonomischen Entwicklungen der SSP-CH werden durch die Szenarioparameter abgebildet. Die Szenarioparameter beschreiben sowohl gewöhnlich quantifizierte Grössen (z.B. Wohnbevölkerung oder BIP pro Kopf) als auch Faktoren, die nur indirekt bzw. kaum quantifizierbar sind (z.B. Innovationstätigkeit oder Umweltbewusstsein). Für alle Szenarioparameter wurden Werte auf einer Skala von -3 bis +3 für jedes SSP-CH und jedes Stützjahr festgelegt, welche die Stärke und die Richtung der Veränderung im Vergleich zum heutigen Status Quo

(Wert = 0) widerspiegeln.⁵ Im Anschluss haben wir diese Trends in prozentuale Veränderungen übersetzt (siehe Beispiel in Tabelle 1).

Tabelle 1: Beispiele für die Übersetzung der Trendwerte in % eines Szenarioparameters.

Szenarioparameter	Trendwert						
	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Umweltbewusstsein	-50%	-33%	-17%	0%	33%	67%	100%

Lesebeispiel: Ist der Trend des Szenarioparameters Umweltbewusstsein in einem SSP-CH zu einer bestimmten Zeit +2 bedeutet dies, dass das Umweltbewusstsein um 67 % im Vergleich zu 2023 zunimmt.

Tabelle INFRAS.

Wirkungsmatrix

Die Entwicklung der Szenarioparameter muss nun in eine Entwicklung der damit verknüpften Modellparameter übersetzt werden. Die Modellparameter sind diejenigen Parameter des Modells, die für die Modellierung des jeweiligen Sektors relevant sind (z.B. Personenkilometer im Verkehrssektor oder beheizte Fläche für den Gebäudesektor). Sowohl Szenarioparameter als auch Modellparameter beschreiben die Änderungen gegenüber heute. Die Übersetzung von Szenarioparametern in Modellparameter erfolgt mittels einer Wirkungsmatrix, welche einmalig Elastizitäten definiert. Diese Elastizitäten legen fest, welche prozentuale Änderung eines Modellparameters aus einer prozentualen Änderung eines Szenarioparameters resultiert. Die Elastizitäten sind je Wirkungspfad fix definiert. Das heisst, sie sind unabhängig von der Zeit und den Szenarien.

Beschreiben Szenarioparameter und Modellparameter dieselbe Grösse, sind die Elastizität in diesem trivialen Fall gleich 1 (z.B. bei der Wohnbevölkerung). In anderen Fällen sind die Veränderung des Modellparameters im Vergleich zu den Veränderungen des Szenarioparameters abgeschwächt (Elastizitätswert kleiner als 1), verstärkt (Elastizitätswert grösser als 1) oder invers (negativer Elastizitätswert), sodass die Elastizität in solchen Fällen ungleich 1 ist.

Nimmt etwa der Szenarioparameter «Umweltbewusstsein» zu, verringert sich der Fahrzeugbestand mit Verbrennermotoren im Flottenmix der Personenwagen (PWs) (*ceteris paribus*). Eine Elastizität von z.B. «-0.5» würde dann konkret bedeuten, dass ein steigendes Umweltbewusstsein von 10% den «Anteil Benzinmotoren im Flottenmix PWs» um 5% reduziert.

Jeder Modellparameter kann über die Wirkungsmatrix durch einen oder mehrere Szenarioparameter beeinflusst werden. Die finale Veränderung des Ausgangswerts jedes

⁵ Für ca. die Hälfte der Parameter geschah das im Rahmen von mehreren Workshops. Die restlichen Trends wurden im Nachgang vom Modellierungsteam in Zusammenarbeit mit der WSL bestimmt. Grundlage für diese Übersetzungen bilden Studien und Experteneinschätzungen. Für die Szenarioparameter Wohnbevölkerung und BIP pro Kopf wurden die Ergebnisse aus den Workshops im Nachgang anhand weiterer Überlegungen noch angepasst, um ein möglichst plausibles Bild zu erhalten.

Modellparameters wird sodann aus der Summe der Produkte aller Faktoren, die auf ihn einwirken, berechnet:

$$P_{SSP-CH,t} = P_{Basis} * \left[1 + \sum_{s=1}^S (f_{s,SSP-CH,t} * \varepsilon_{s,p}) \right]$$

Variable	Bedeutung
$P_{SSP-CH,t}$	Wert des Modellparameters P im SSP-CH im Jahr t
P_{Basis}	Basiswert des Modellparameters P (zumeist Wert im Ausgangsjahr t=2023)
$f_{s,SSP-CH,t}$	Prozentuale Änderung des Szenarioparameters s im SSP-CH im Jahr t gegenüber Ausgangsjahr 2023 in %
$\varepsilon_{s,p}$	Elastizität ε zwischen Szenarioparameter s und Modellparameter p (die Elastizität ist unabhängig von SSP-CH und t)

So ist beispielsweise im Sektor Verkehr ein Modellparameter die jährliche Energieeffizienzverbesserung für PW mit Elektromotor. Der Basiswert ist eine Verbesserung von 0.2% pro Jahr. Die Szenarioparameter Innovationstätigkeit und Produktnutzungsdauer beeinflussen diesen Basiswert mit den Elastizitäten 3 bzw. -0.5. Wenn ein SSP-CH vorgibt, dass die Innovationstätigkeit um 30% steigt und die Produktnutzungsdauer um 20% sinkt, so erhöht sich die jährliche Rate der Energieeffizienzverbesserung um den Faktor 1.8 von 0.2% auf 0.36%.⁶

Für die Elastizitäten gilt die Ceteris-paribus-Annahme.⁷ Interaktionen zwischen verschiedenen Szenarioparametern berücksichtigen wir nicht. Beispielsweise ist nicht berücksichtigt, dass ein Anstieg des BIP pro Kopf auch das Umweltbewusstsein ändern könnte. Solche Interaktionen sind allenfalls indirekt damit berücksichtigt, dass beide Einflusskanäle im SSP-CH abgebildet sind.

In der Modellierung gehen wir von einer Basisentwicklung aus, die sich an geeigneten Szenarien der EP2050+ orientiert (Bundesamt für Energie (BFE) 2022). Die Basisentwicklungen schreiben die historischen Trends fort und bilden zudem technologische Entwicklungen ab. Von diesen Basisszenarien weichen die SSP-CH ab, unter Berücksichtigung der jeweiligen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und weiteren technischen Entwicklungen. In manchen Fällen (z.B. Sektor Landwirtschaft) entspricht die Basisentwicklung dem Ausgangswert von 2023 (d.h. wir treffen die Annahme, dass die Basisentwicklung keine Änderung gegenüber 2023 aufweist).

Details der Modellierung einzelner Sektoren können den Beschreibungen in den jeweiligen Sektor-Kapiteln entnommen werden. Die folgende Box zeigt zwei Beispiele zur Funktionsweise der Wirkungsmatrix aus dem Sektor Gebäude.

⁶ $P_{SSP-CH,t} = P_{Basis} * (1 + \sum_{s=1}^S (f_{s,SSP-CH,t} * \varepsilon_{s,p})) = 0.2\% * (1 + 30\% * 3 + 20\% * (-0.5)) = 0.2\% * 1.8 = 0.36\%$

⁷ Die ceteris-paribus-Annahme bedeutet, dass bei der Untersuchung des Zusammenhangs zwischen zwei Variablen alle anderen Einflussfaktoren als konstant betrachtet werden. Dadurch lässt sich isoliert erkennen, welchen Effekt eine Veränderung einer Variablen auf eine andere hat, ohne dass Störeinflüsse das Ergebnis beeinflussen.

Beispiele Funktionsweise Wirkungsmatrix

Beispiel 1

Die erste Zeile zeigt die Basisentwicklung des Modellparameters Energiebezugsfläche (EBF). Diese Entwicklung wird vom Szenarioparameter Wohnraum pro Kopf beeinflusst (zweite Zeile), welcher in SSP0-CH z.B. eine Reduktion verzeichnet. Die Elastizität ist in diesem Fall 1 (dritte Zeile). Aufgrund der Abnahme des Szenarioparameters in 2050 um 9.8% reduziert sich die Energiebezugsfläche von 48.9 m² EBF pro Kopf in der Basisentwicklung auf 44.1 m² EBF pro Kopf für SSP0-CH.

		2035	2050	2060
Modellparameter Basis Entwicklung	Energiebezugsfläche [m ² EBF /Kopf]	47.9	48.9	49.6
Szenarioparameter SSP0-CH	Wohnraum pro Kopf ggü. 2023	-3.5%	-9.8%	-14.1%
	Elastizität		1	
Modellparameter SSP0-CH	Energiebezugsfläche [m ² EBF /Kopf]	46.2	44.1	42.6

Beispiel 2

In diesem komplexeren Beispiel wird der Modellparameter durch zwei Szenarioparameter (BIP pro Kopf und Umweltbewusstsein) beeinflusst. Die Einflüsse der beiden Modellparameter Sanierungsrate im Jahr 2060 sind beispielsweise: $(1-1.3\%*0.6-16.7\%*0.1)*0.65 = 0.63$.

		2035	2050	2060
Modellparameter Basis Entwicklung	Sanierungsrate [%]	1.3	0.65	0.65
Szenarioparameter SSP3-CH	BIP/Kopf ggü. 2023	+2.4%	+0.1%	-1.3%
	Elastizität (Sanierungsrate vs. BIP/Kopf)		0.6	
Szenarioparameter SSP3-CH	Umweltbewusstsein ggü. 2023	-8.3%	-13.3%	-16.7%
	Elastizität (Sanierungsrate vs. Umweltbewusstsein))		0.1	
Modellparameter SSP3-CH	Sanierungsrate [%]	1.31	0.64	0.63

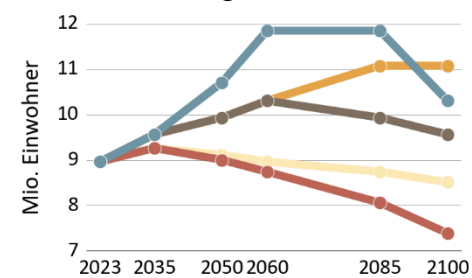
3.3. Szenarioparameter

Eine Übersicht aller Szenarioparameter und ihrer sektorspezifischen Relevanz ist in Tabelle34 in Anhang A1 zu finden. Eine Reihe von Szenarioparametern werden für verschiedene Sektoren

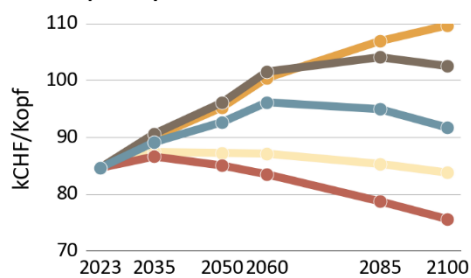
genutzt (z.B. Wohnbevölkerung, BIP pro Kopf oder Umweltbewusstsein). Andere sind sektorspezifisch (z.B. Urbanisierungsgrad oder Tierbestand pro Kopf). Abbildung 4 zeigt beispielhaft die Entwicklung einer Reihe wichtiger Szenarioparameter (v.a. Wohnbevölkerung und BIP pro Kopf). Für Parameter, die keine gängige Einheit haben (z.B. Umweltbewusstsein) sind die Veränderungen immer relativ zum Status Quo (=100%).

Eine ausführlichere Übersicht der Entwicklung der Szenarioparameter ist in einem begleitenden Excel zu finden, welches parallel veröffentlicht wird. Die meisten Szenarioparameter wurden in (siehe Gubler et al. 2026) von der WSL entwickelt. Eine Reihe vorwiegend sektorspezifischer Parameter wurden allerdings auch vom Modellierungsteam — in Absprache mit der WSL — gesetzt.

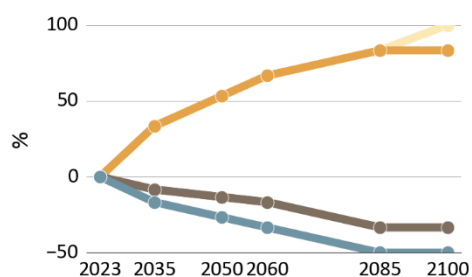
Abbildung 4: Entwicklung Szenarioparameter
Wohnbevölkerung



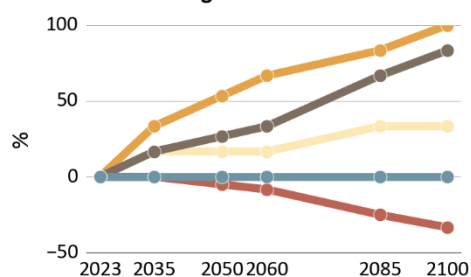
BIP pro Kopf



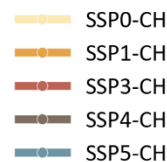
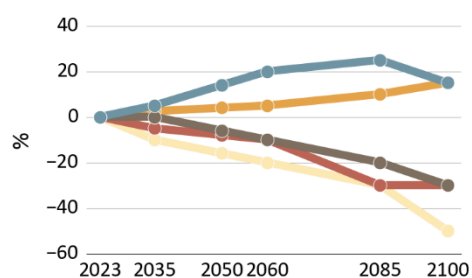
Umweltbewusstsein



Innovationstätigkeit



Individuelles Konsumniveau



Bei «Umweltbewusstsein» entspricht der Trend für SSP3-CH exakt dem Trend von SSP4-CH und ist daher nicht sichtbar.

Grafik INFRAS.

Die für die jeweiligen Sektoren relevanten Szenarioparameter werden in den Sektor-Kapiteln näher beschrieben.

3.4. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Zur Einschätzung der potenziellen Emissionsminderungen durch die verschiedenen SPA der Schweiz haben wir sektorale Instrumentenpakete modelliert und deren Wirkung auf relevante Mengenparameter (z. B. Energieverbrauch, Emissionsfaktoren) quantifiziert. Die Grundlage dafür bildete eine Kombination aus Literaturrecherche, Ex-post-Analysen und pauschalen Wirkungsannahmen. Für jeden SPA haben wir die Emissionsminderungspotenziale der eingesetzten Instrumente auf sektoraler Ebene aggregiert, um die Gesamtwirkung des jeweiligen Mixes zu erfassen.

Ein Blick auf historische Reduktionserfolge liefert wertvolle Anhaltspunkte zur Kalibrierung dieser Effekte: Zwischen 1970 und 2018 konnten 24 Länder – vorwiegend europäische Staaten, aber auch die USA – ihre CO₂- und Treibhausgasemissionen signifikant senken. Die durchschnittlichen jährlichen Reduktionsraten lagen zwischen –0.5 % und –3 %, wobei insbesondere Energiesektoren und Industriesektoren zur Reduktion beitrugen – vor allem durch geringeren Energieverbrauch und den Rückgang fossiler Energieträgeranteile (Lamb et al. 2022). Die kausale Zuschreibung dieser Effekte allein auf Klimapolitik bleibt jedoch schwierig, da auch makroökonomische Trends, technologische Entwicklungen, Energiepreise und nicht-klimapolitische Regulierungen eine wichtige Rolle spielen.

Zur Kalibrierung der SPA-Wirkung haben wir daher auch Ergebnisse aus der jüngeren Wirkungsforschung berücksichtigt. Eine Metaanalyse erfolgreicher klimapolitischer Interventionen in 41 Ländern zeigt beispielsweise, dass 63 identifizierte Instrumente im Durchschnitt eine Emissionsreduktion von 19 % innerhalb eines Zweijahreszeitraums erzielten (Stechemesser et al. 2024). Für das Jahr 2020 reichen Schätzungen globaler Emissionsminderungen durch Klimapolitik von 4 % bis 15 % gegenüber einem Szenario ohne politische Eingriffe (Hoppe et al. 2023). Insbesondere Gebäudesektoren, Energiesektoren und Industriesektoren zeigten in der Vergangenheit hohe Einsparungen.

Die Wirkungsschätzungen der SPA in diesem Modellansatz sind jedoch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Diese resultieren aus der Heterogenität der Umsetzung einzelner Instrumente, potenziellen Wechselwirkungen zwischen Instrumenten sowie aus Rückkopplungseffekten mit externen Faktoren wie technologischem Fortschritt oder gesellschaftlichen Verhaltensänderungen. Die quantifizierten Effekte stellen daher lediglich grobe Näherungen dar und dienen primär dem Vergleich unterschiedlicher klimapolitischer Strategien.

Wo möglich, haben wir für die Wirkung vorhandene Literatur (z.B. Wirkungsabschätzungen oder Evaluationen) verwendet. In den meisten Fällen war dies allerdings nicht möglich. Da

haben wir, auf Basis der obigen Daten und Überlegungen, als pragmatischen Ansatz, den verschiedenen Typen von Politikinstrumenten, folgende pauschalisierte maximale Wirkungen zugewiesen:

- autoritätsbasierte Instrumente (z. B. Vorschriften, Verbote): $\pm 20\%$, bei Verboten bis zu -100% ,
- finanzielle Instrumente (z. B. Steuern, Subventionen): $\pm 10\%$,
- organisatorische und strategische Massnahmen (z. B. Planungsprozesse, institutioneller Aufbau): $\pm 5\%$.

Die Wirkung bezieht sich immer auf die Entwicklung ohne das Instrument zum jeweiligen Zeitpunkt. In der Regel wirken die Instrumente nicht sofort in dieser maximalen Höhe. Daher modellieren wir einen schrittweisen Anstieg, zumeist über einen Modellschritt (ca. 15 Jahre).

3.5. Systematik und Systemgrenze der Treibhausgasbilanzierung

In dieser Studie verwenden wir mehrere Bilanzierungssystematiken, um die Emissionen der SSP-CH zu ermitteln:

- Systemgrenze und Systematik der territorialen Quellenbilanz entlang Sektoren, in enger Anlehnung an die Systematik der nationalen Treibhausgasinventare, ergänzt um
- erweiterte Systemgrenze
 - Internationale Flugemissionen (in keinem Treibhausgasinventar enthalten)
 - Import-Export-Bilanz

Diese beiden Systemgrenzen werden im Folgenden näher beschrieben.

3.5.1. Systemgrenze des Treibhausgasinventars (territoriale Quellenbilanz entlang Sektoren)

Die territoriale Quellenbilanz liegt dem Schweizer nationalen Treibhausgasinventar (und allen existierenden nationalen Treibhausgasinventaren) zugrunde und verwendet eine Zuordnung nach Sektoren. Die THG-Inventare setzen – mit geringen Abweichungen in den Definitionen und Summenbildungen - auf der Bilanzierungssystematik der nationalen Energiebilanzen auf und erweitern diese, z.B. um nicht-energiebedingte Emissionen. Die nach dieser Systematik ermittelten THG-Emissionen werden nach international abgestimmten Standards in allen Ländern konsistent ermittelt und tragen zur globalen THG-Berichterstattung bei. Durch die territoriale Abgrenzung sind sie eindeutig und präzise definiert. Zudem sind sie additiv, d.h. die Summe aller auf diese Weise ermittelten nationalen THG-Emissionen ergibt die globalen Emissionen

ohne Doppelzählungen. Derzeit nicht einzelnen Ländern zugerechnet werden Emissionen des internationalen Flug- und Schiffsverkehrs.

Die Systematik der territorialen Quellenbilanz betrachtet die auf dem Gebiet der Schweiz direkt innerhalb eines Jahreszeitraums emittierten Treibhausgase, aufgeteilt auf die Sektoren Private Haushalte, Dienstleistungen, Industrie, Verkehr, Umwandlungssektor (vor allem Energiewirtschaft, insbesondere Stromerzeugung), Landwirtschaft, Abfall sowie LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry).

Im Sektor Private Haushalte werden die direkten Emissionen sämtlicher in Gebäuden direkt verbrauchten Energieträger zugerechnet, also insbesondere aus der Verbrennung von Öl und Gas zur Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser. Im Sektor Dienstleistungen kommen beispielsweise noch Energieträger für die Erzeugung von Prozesswärme hinzu, beispielsweise Kochen in der Gastronomie, Heissdampf in Wäschereien und Reinigungen o.ä.. Diese beiden Sektoren sind in diesem Bericht primär im Sektor «Gebäude» erfasst.

Im Industriesektor werden neben der Erzeugung von Raumwärme auch Energieträger zur Erzeugung von Prozesswärme, aber auch z.B. zur Produktion von mechanischer Energie in Motoren, eingesetzt und bilanziert. Zusätzlich fallen insbesondere in den Branchen Chemie, Metallherzeugung und Baustoffe (Kalk und Zement) Prozessemissionen aus chemischen Reaktionen in Produktionsprozessen an. Hier werden auch die Emissionen aus Kältegasen und F-Gasen verbucht.

Im Verkehrssektor fallen vor allem Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger in Verbrennungsmotoren in Pkw und Lkw sowie im Inlandsflugverkehr an. Gemäss den internationalen Bilanzierungsregeln werden die Emissionen des internationalen Flugverkehrs nach dem Absatzprinzip nachrichtlich ermittelt, aber nicht dem nationalen Inventar zugerechnet.

In den «Nachfragesektoren» Private Haushalte, Dienstleistungen, Industrie und Verkehr werden die direkten Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger zugerechnet. Die bei der Produktion der Sekundärenergieträger Fernwärme und Elektrizität entstehenden Emissionen werden im Sektor Energiewirtschaft (Umwandlungssektor) ermittelt und verbucht. Hierzu gehören auch die Emissionen, die bei der Produktion von Strom und / oder Fernwärme in Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) aus dem fossilen Anteil des Abfalls entstehen. Im Sektor Energiewirtschaft werden darüber hinaus auch allfällig anfallende Emissionen der (noch) existierenden Umwandlung von Erdölprodukten (Raffinerien, Produktion von z.B. Verkehrstreibstoffen) verbucht. Entsprechend werden bei der Bilanzierung in den Nachfragesektoren den beiden Endenergieträgern Strom und Fernwärme keine spezifischen Emissionen zugeschrieben, um Doppelzählungen zu vermeiden.

Entsprechend dieser Bilanzierungen wird bei der Ermittlung der Emissionen in den Szenarien (SSP-CH) nach dieser Systematik vorgegangen: In den einzelnen Szenarien werden die

Sektoren «durchdekliniert», und die Berechnung der territorialen Gesamtemissionen erfolgt durch Addition der Emissionen aller Sektoren, sowohl der Energienachfrage als auch der Energieumwandlung, ergänzt durch die nicht energiebedingten Emissionen der Sektoren Landwirtschaft und Abfall (z.B. Deponien, Abwasserreinigung). Die Emissionen aus dem LULUCF-Sektor berechnen wir nicht.

Für die Verbuchung von «Negativemissionen» existieren noch keine eindeutigen Bilanzierungsregeln. Wir verwenden in den hier vorgestellten Szenarien folgende Zuordnung:

- Negativemissionen, die in der Industrie (z.B. Zementindustrie) oder im Umwandlungssektor (z.B. Stromerzeugung und Wärmeenergieerzeugung in KVA) durch Einsatz von Biomasse und Carbon Capture and Storage (CCS) «entstehen», werden diesen Sektoren zugerechnet und sind nicht separat ausgewiesen.
- Sonstige Negativemissionen (zur Kompensation von Restemissionen), die per Direct Air Capture mit CCS (DACCS) oder anderen Negativemissionstechnologien (NET) «erzeugt» werden, werden gesondert als «NET (Ausland)» ausgewiesen.

3.5.2. Erweiterte Systemgrenze

3.5.2.1. Import-Export-Bilanz

Die territoriale Quellenbilanz ergänzen wir um eine Import-Export-Bilanz. Diese berücksichtigt diejenigen Emissionen, welche durch Güter anfallen, welche die Schweiz aus dem Ausland importiert bzw. ins Ausland exportiert.⁸ Diese erweiterte Sichtweise führt zu mehr Emissionen gegenüber der territorialen Quellenbilanz, da die Schweiz mehr Güter importiert als exportiert.

Eine solche Import-Export-Bilanz im Detail zu erstellen, ist sehr komplex, da eine Vielzahl an Produkten und Handelspartnern berücksichtigt werden müsste. Aus Aufwandsgründen verwenden wir in diesem Bericht daher eine stark vereinfachte Bilanzierung auf aggregierter Ebene. Konkret verwenden wir sowohl für die Importe als auch für die Exporte die Produktkategorien bis zur zweiten Ziffer aus der Standard International Trade Classification (SITC), deren Handelsströme bekannt sind (siehe Tabelle 35). Für diese Produktkategorien nutzen wir Emissionsfaktoren aus der Literatur.⁹ Zu Vereinfachung differenzieren wir allerdings nicht zwischen Ländern: Das heisst, wir gehen davon aus, dass sich die Emissionen der Güterproduktion weder zwischen der Schweiz und dem Ausland noch zwischen unterschiedlichen Handelspartnern unterscheiden.¹⁰ Für eine detaillierte Beschreibung der Methodik siehe Kapitel 10.

⁸ Nicht berücksichtigt sind Emissionen durch den Handel mit Dienstleistungen oder durch Tourismus von Schweizern im Ausland und umgekehrt.

⁹ Die Emissionsfaktoren der Produktkategorien aus der Literatur beinhalten auch die Vorkettenemissionen. Ist diese Vorkette bei einem Produkt, das aus der Schweiz exportiert wird, teilweise im Ausland, resultiert eine Überschätzung der exportierten Emissionen und umgekehrt.

¹⁰ Allerdings nehmen wir an, dass sich die Emissionsfaktoren in der Schweiz schneller reduzieren als im Ausland.

Die erweiterte Sichtweise ist somit wesentlich gröber modelliert als die Sektoren der territorialen Quellenbilanz. Zudem ist die Modellierung dahingehend nicht konsistent, als dass wir keinen expliziten Abgleich zwischen der Modellierung der Emissionen des Sektors Industrie und den Emissionsfaktoren der exportierten Emissionen (die ja weitestgehend aus dem Sektor Industrie stammen) vornehmen konnten. Trotzdem ist es aufgrund der Bedeutung der importierten und exportierten Güter der Schweiz — als kleines Land mit intensiven Handelsbeziehungen zum Ausland — wichtig, diese erweiterte Sichtweise einzunehmen.

3.5.2.2. Internationale Flugemissionen

Internationale Flugemissionen sind im nationalen Treibhausgasinventar nicht erfasst. Wir haben diese daher separat erfasst. Dies beinhaltet sowohl die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Kerosin als auch die Nicht-CO₂-Wirkung aufgrund des Ausstosses klimaaktiver Substanzen (v.a. Russpartikel, die zu Kondensstreifen führen). Für mehr Details siehe Kapitel 4.1.4.

3.5.3. Weitere Systematiken

3.5.3.1. Graue Emissionen

Der Begriff «graue Emissionen» beschreibt alle diejenigen Emissionen, die nicht im Betrieb des Produkts entstehen. Diese sind v.a. die Emissionen, die bei der Herstellung anfallen, aber auch bei der Entsorgung oder Bereitstellung der Infrastruktur. Graue Emissionen sind konzeptionell analog zu den «Scope 3 Emissionen» der Systematik der Treibhausgasbilanzierung, welche die Emissionen der diversen Schritte der Wertschöpfungskette von Produkten beschreiben.¹¹ Die Werte in der Literatur unterscheiden sich in der Regel stark aufgrund unterschiedlicher Daten, Berechnungsmethoden und einbezogener Schritte.

Graue Emissionen können nicht zu den Emissionen gemäss der territorialen Quellenbilanz oder importierten und exportierten Emissionen addiert werden, da dies zu einer Doppelzählung führen würde. Der Grund ist, dass die grauen Emissionen eines Produkts auch immer als Emission in einem Sektor (im Inland oder Ausland) gezählt werden.

Wir modellieren graue Emissionen daher in unserem Bericht nur für ausgewählte interessante Fälle zur Information (z.B. batterieelektrisch betriebene Autos). Diese Ergebnisse fliessen aber nicht in die Gesamtbetrachtung ein, da sonst eine Doppelzählung mit den Sektoren Importe, Energie und Industrie resultieren würde.

¹¹ Siehe z.B. <https://ghgprotocol.org/corporate-value-chain-scope-3-standard>

3.5.3.2. Konsumperspektive

Die Konsumperspektive betrachtet die Gesamtheit der Emissionen eines Produkts und rechnet diese dem Nutzer an. Dazu werden neben den Emissionen aus dem Betrieb auch die grauen Emissionen (d.h. Herstellung, Bereitstellung und Entsorgung) berücksichtigt. Diese Perspektive wird in der Literatur sowohl für einzelne Personen, für Sektoren als auch für Länder verwendet.

In der sektoralen Verwendung würde dies beispielsweise bedeuten, dass die Sektoren Industrie und Importe aufgelöst und deren Emissionen als zusätzliche graue Emissionen in den «Konsumsektoren» (z.B. Gebäude, Verkehr) addiert werden. Auch bei der Verwendung der Konsumperspektive ist es daher wichtig, passende Systemgrenzen zu definieren, um Doppelzählungen wie auch Fehlstellen zu vermeiden.

Die Konsumperspektive wird in diesem Bericht nicht verwendet.

4. Verkehr

Die Emissionen im Sektor Verkehr werden bottom-up basierend auf Aktivitätsdaten (Fahrleistungen), spezifischen Energieverbräuchen und Emissionsfaktoren berechnet. Das Modell ermittelt die Werte für die Jahre 2023 (Basisjahr), 2035, 2050, 2060, 2085 und 2100. Zwischenjahre werden interpoliert. Für jedes Jahr wird eine Basisentwicklung vorgegeben, welche dann durch die sozioökonomischen Szenarien (SSP) und politischen Instrumente (SPA) beeinflusst wird. Die Auswirkung der SSP-CH und SPA auf die Emissionen wird mittels einer Wirkungsmatrix berücksichtigt (für Details siehe Kapitel 3.2). Angesichts der Vielzahl an Informationen aus den SSP-CH und SPA sind diverse Annahmen und Vereinfachungen erforderlich. Im Folgenden werden die Struktur des Modells sowie die einzelnen Schritte zur Berechnung der Emissionen erläutert.

Die einzelnen Berechnungsschritte des Modells bzw. die Modellparameter sind in Kapitel 4.1 beschrieben. In Kapitel 4.2 sind Quellen aufgeführt, die wir — wo nötig und vorhanden — für die Basisentwicklungen bzw. die Ausgangswerte als Grundlage der SSP-CH sowie für Wirkungsabschätzungen verwendet haben. Kapitel 4.3 beschreibt die Szenarien und Kapitel 4.4 zeigt, wie die Szenarioparameter der SSP-CH die Entwicklungen der Treibhausgasemissionen der SSP-CH mittels einer Wirkungsmatrix beeinflussen. Die Resultate sind in Kapitel 4.5 dargestellt.

4.1. Modellbeschreibung

Dieses Kapitel beschreibt die Modellierung der Emissionen des Sektors Verkehr auf Grundlage der Modellparameter. Änderungen der Modellparameter, hervorgerufen durch den Einfluss der Szenarioparameter aus den SSP-CH, bzw. durch den Einfluss der SPA, sind in diesem Kapitel noch nicht relevant. Dieser Schritt ist in Kap. 4.4 beschrieben.

Das Modell berücksichtigt die Emissionen aus den Kategorien Personenverkehr und Güterverkehr im Landverkehr (auf Strasse und Schiene), Non-Road (Traktoren, Baufahrzeuge) und Flugverkehr. Die vorliegende Dokumentation konzentriert sich auf den Personenverkehr, da die Berechnung für den Güterverkehr und Non-Road analog erfolgt. Die Emissionsberechnung für den Flugverkehr wird separat in Kapitel 4.4.1.4 vorgestellt.

Alle Schritte sind nach Verkehrsmitteln unterteilt. Berücksichtigt sind Fussgänger und (E-)Velo, der motorisierte Individualverkehr (MIV) bestehend aus Personenwagen (PW) bzw. Motorrad, sowie der öffentliche Verkehr (ÖV) auf Strasse (Trolley- und Stadtbus) und Schiene (Eisenbahn, Tram). Jedes Verkehrsmittel wird, wo nötig, hinsichtlich verschiedener Antriebstechnologien (Benzin, Diesel, Gas, Batterieelektrisch BEV) differenziert.

Für alle Verkehrsmittel (VM) und ihre jeweiligen Antriebstechnologien (AT) werden die Gesamtemissionen pro Jahr berechnet. Dabei ist der Fokus auf den Betriebsemissionen, deren Berechnungsweise in den Kapiteln 4.1.1 bis 4.1.4 beschrieben ist.

Graue Emissionen (Emissionen aus der Herstellung, Wartung und Entsorgung) sind nicht Bestandteil der Ergebnisse, weil dann eine Doppelzählung mit den Emissionen aus Importen und Industrie resultieren würde. Um die Bedeutung der grauen Emissionen zu veranschaulichen, haben wir diese dennoch modelliert und in Kapitel 4.1.5 den Betriebsemissionen gegenübergestellt.

4.1.1. Personenverkehr

Betriebsemissionen E_{Betrieb} sind alle direkten CO_2 -Emissionen der Abgase eines Fahrzeugs, die bei dessen Nutzung emittiert werden. Ihre Berechnung setzt sich bottom-up aus drei Teilen zusammen:

- Distanz – Wie weit wird mit welchem Verkehrsmittel gefahren? (Aktivitätsdaten)
- Energieverbrauch – Wie viel Energie wird benötigt, um diese Distanz zu fahren? (spezifischer Verbrauch)
- Emissionen – Wie viele CO_2 -Emissionen entstehen, um die Energie bereitzustellen? (energieträgerspezifischer Emissionsfaktor)

Im Modell-Teil «Distanz» wird berechnet, wie sich die totale zurückgelegte Gesamtdistanz pro Jahr und Person auf die verschiedenen Verkehrsmittel (z.B. motorisierte Verkehrsmittel, aber auch Velo- und Fussverkehr) verteilt. Für diesen Schritt sind z.B. der Modalsplit und der Besetzungsgrad wichtige Parameter. Im Teil «Energieverbrauch» wird berechnet, wie viel Energie das Verkehrsmittel für die gefahrenen Kilometer benötigt. Dazu werden die Verkehrsmittel nach Antriebstechnologien differenziert und die jeweiligen spezifischen Energieverbräuche des Flottendurchschnitts¹² erfasst. Der Anteil jeder Antriebstechnologie an der Gesamtfahrleistung eines Verkehrsmittels spiegelt sich im Flottenmix wider. So ist in der Modellierung abgebildet, wie sich der Fahrzeugbestand von Verbrennermotoren hin zur Elektromobilität entwickelt.

Der gesamte Energieverbrauch für ein Verkehrsmittel EV_{VM} ist dann die Summe des Energieverbrauchs über alle zugehörigen Antriebstechnologien AT. Im Fuss- und Velo-Verkehr wird nur für E-Velos ein Energieverbrauch berechnet.

$$EV_{VM} = \sum_{AT} EV_{VM,AT} = \sum_{AT} \text{spez. } EV_{VM,AT} * \text{Flottenmix}_{VM,AT} * \text{Distanz}_{VM}$$

¹² d.h. der Durchschnitt über alle Grössenklassen des jeweiligen Verkehrsmittels mit einer bestimmten Antriebstechnologie.

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel ¹³ (2023)
EV_{VM}	Gesamter Energieverbrauch des Verkehrsmittels VM	PJ	144 PJ für PW
$EV_{VM,AT}$	Energieverbrauch des Verkehrsmittels VM mit Antriebstechnologie AT	PJ	79 PJ für PW mit Benzinmotor
$spez.EV_{VM,AT}$	Spezifischer Energieverbrauch des Verkehrsmittels VM mit Antriebstechnologie AT	MJ/Fzg-km	2.26 MJ/Fzg-km für PW Diesel
$Flottenmix_{VM,AT}$	Anteil der Antriebstechnologie AT am Fahrzeugbestand des Verkehrsmittels VM	%	58% PW mit Benzinmotor
$Distanz_{VM}$	Fahrleistung des Verkehrsmittels VM	Mrd. Fzg-km	89 Mrd. Fzg-km mit PW

Der spezifische Energieverbrauch wird über zwei Modellparameter beeinflusst. Zum einen sinkt er durch technische Energieeffizienzverbesserungen der Antriebstechnologien über die Jahre. Dies berücksichtigen wir mit einer jährlichen Verbesserungsrate in Prozent.

$$spez.EV_t = spez.EV_{t=0} * (1 - rate_{Energieeffizienz})^t$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für PW mit Benzinmotor)
$spez.EV_{t=0}$	Spezifischer Energieverbrauch in Jahr 0	MJ/Fzg-km	2.26 MJ/Fzg-km in 2023
$spez.EV_t$	Spezifischer Energieverbrauch in Jahr t	MJ/Fzg-km	2.19 MJ/Fzg-km in 2035
$rate_{Energieeffizienz}$	Jährliche Energieeffizienzverbesserung	%/Jahr	0.3%/Jahr zwischen 2023 und 2035
t	Anzahl Jahre	Jahre	12

Hinweis: Die Höhe der jährlichen Energieeffizienzverbesserung kann zwischen den modellierten Jahren (2023-2035, 2035-2050, 2050-2060, 2060-2085, 2085-2100) variieren. Das «Jahr 0» bezieht sich jeweils auf das vorige modellierte Stützjahr.

Zum anderen spielt im MIV die Grösse der Fahrzeuge eine Rolle: Verschiebt sich beispielsweise der Fahrzeugbestand hin zu durchschnittlich grösseren Fahrzeugen, steigt der spezifische Energieverbrauch des Flottendurchschnitts.¹⁴

Effizienzverbesserungen und Fahrzeuggrösse können den spezifischen Energieverbrauch nicht beliebig reduzieren. Daher ist im Modell der spezifische Energieverbrauch für jedes Verkehrsmittel und für Antriebstechnologien mit einer unteren Schranke begrenzt. Diese ergibt

¹³ In den Beispielen ist jeweils die für die Quellen übliche Einheit angegeben. Eine allfällig nötige Korrektur der Grössenordnungen ist dem Modell umgesetzt, in den Formeln aber nicht abgebildet.

¹⁴ Wir modellieren keine unterschiedlichen Grössenklassen, sondern berücksichtigen den Einfluss der Durchschnittsgrösse nur durch die Änderung des spezifischen Energieverbrauchs.

sich aus der kleinsten Fahrzeugklasse nach Umsetzung des (aus heutiger Sicht) maximalen Potenzials für Energieeffizienzsteigerungen.¹⁵

Aus dem Energieverbrauch pro Verkehrsmittel und Antriebstechnologie und dem Emissionsfaktor der Antriebstechnologie berechnen wir letztlich die Betriebsemissionen (Teil «Emissionen»). Die Emissionsfaktoren reduzieren sich abhängig vom Anteil erneuerbarer Treibstoffe.

$$E_{\text{Betrieb,VM}} = \sum_{\text{AT}} E_{\text{Betrieb,VM,AT}} = \sum_{\text{AT}} EV_{\text{VM,AT}} * EF_{\text{AT}} * (1 - \text{frac}_{\text{erneuerbar,AT}})$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel
$E_{\text{Betrieb, VM}}$	Gesamte Betriebsemissionen des Verkehrsmittels VM	Mt CO ₂	10.0 Mio. tCO ₂ eq für PW
$E_{\text{Betrieb, VM, AT}}$	Betriebsemissionen des Verkehrsmittels VM mit Antriebstechnologie AT	Mt CO ₂	5.8 Mio. tCO ₂ eq CO ₂ für PW mit Benzinmotor
EF_{AT}	Emissionsfaktor der Antriebstechnologie AT (bzw. des zugrundeliegenden fossilen Brennstoffs)	gCO ₂ /MJ	73.0 gCO ₂ /MJ Benzin
$\text{frac}_{\text{erneuerbar, AT}}$	Anteil erneuerbarer Treibstoff für Antriebstechnologie AT	%	1% für Benzinmotoren

Für die Modellierung haben wir des Weiteren folgende Annahmen bzw. Abgrenzungen getroffen:

- Fahrzeuge mit hybriden Antriebstechnologien (HEV und PHEV) werden im Modell nicht explizit erfasst. Ihr Anteil am Fahrzeugbestand sowie ihre Energieverbräuche und Emissionsfaktoren fließen in die Kennwerte der Benzin- bzw. Diesel-Fahrzeuge und BEVs ein.
- Als erneuerbare Treibstoffe für Benzin-, Diesel- und Gas-Motoren werden biogene Treibstoffe berücksichtigt.¹⁶
- Wir gehen davon aus, dass strombasierte synthetische Treibstoffe¹⁷ aus Kostengründen im Personenverkehr nicht zum Einsatz kommen.
- Die CO₂-Flottengrenzwerte der EU werden eingehalten.
- Tanktourismus wird nicht modelliert.
- Für BEVs werden die Emissionen aus der Stromproduktion für den Antrieb nicht im Verkehrssektor, sondern im Energiesektor zugewiesen.

¹⁵ Zur Vollständigkeit ist auch eine obere Schranke definiert, welche sich aus der grössten Fahrzeugklasse und ohne die Umsetzung technischer Verbesserungen ergibt.

¹⁶ z.B. Bioethanol statt Benzin, FAME (Fatty acid methyl ester) und HVO (hydrogenated vegetable oils) statt Diesel, Biogas statt Erdgas

¹⁷ PtX (Power to X)

4.1.2. Güterverkehr

Die Emissionsberechnung für den Güterverkehr erfolgt grundsätzlich in Analogie zum Personenverkehr anhand der relevanten Verkehrsmittel und Antriebstechnologien (Flottenmix): Verkehrsmittel beinhalten leichte und schwere Nutzfahrzeuge (LNF, SNF) auf der Strasse sowie den Schienengüterverkehr. Die Antriebstechnologien umfasst Fahrzeuge mit Benzin-, Diesel- und Gas-Motoren und BEV sowie in Güterverkehr auch wasserstoffbetriebene Fahrzeuge.¹⁸ Die Fahr- bzw. Betriebsleistung berechnet sich aus der Verkehrsleistung und der durchschnittlichen Beladung.

4.1.3. Non-Road

Der Non-Road-Sektor fasst eine Reihe von Maschinenkategorien zusammen, die überwiegend nicht auf der Strasse genutzt werden.¹⁹ Die Berechnung der Emissionen beruht auf der jährlichen Arbeitsleistung jeder Maschine. Die Arbeitsleistung wird über den Wirkungsgrad pro Antriebstechnologie in den jährlichen Energieverbrauch der Maschine umgerechnet (Details siehe BAFU, 2015²⁰). Pro Maschinenkategorie berechnet sich der totale Energieverbrauch folglich aus dem totalen Maschinenbestand, dem Flottenmix der Antriebstechnologien und dem spezifischen Energieverbrauch pro Antriebstechnologie. Konkret lautet die Formel:

$$EV_{MaKat} = \sum_{AT} EV_{MaKat,AT} = \sum_{AT} Bestand_{MaKat} * Flottenmix_{MaKat,AT} * spez. EV_{MaKat,AT}$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für Jahr 2023)
EV_{MaKat}	Gesamter Energieverbrauch der Maschinenkategorie MaKat	PJ	0.35 PJ für Diesel aus Minibagger
$EV_{MaKat, AT}$	Energieverbrauch der Maschinenkategorie MaKat mit Antriebstechnologie AT	PJ	0.35 PJ für Minibagger mit Dieselmotor
$Bestand_{MaKat}$	Bestand der Maschinenkategorie MaKat	-	9'361
$Spez. EV_{MaKat, AT}$	Spezifischer Energieverbrauch der Maschinenkategorie MaKat mit Antriebstechnologie AT pro Maschine	GJ/a	37.6 GJ/a für Minibagger mit Dieselmotor
$Flottenmix_{MaKat, AT}$	Anteil der Antriebstechnologie AT am Bestand der Maschinenkategorie MaKat	%	100% Minibagger mit Dieselmotor

¹⁸ Für den Personenverkehr gehen wir hingegen davon aus, dass wasserstoffbetriebene Fahrzeuge nicht relevant sind.

Die Herstellung des Wasserstoffs (grün – Elektrolyse von Wasser mithilfe erneuerbaren Energien/blau – Dampfreformierung von Erdgas mit CCS/grau – Dampfreformierung von Erdgas ohne CCS) wird je nach SSP-CH definiert.

¹⁹ Maschinenkategorien der Maschinensektoren Baumaschinen, Industrie, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Gartenpflege/Hobby, Schiene, Schiffe, Militär (siehe BAFU, 2015).

²⁰ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/energieverbrauch-und-schadstoffemissionen-des-non-road-sektors.html>

Die sonstigen Elemente der Emissionsberechnung sind analog zum Personen- und Güterverkehr (autonome Verbesserung des spezifischen Energieverbrauchs pro Jahr, untere Schranke für den spezifischen Energieverbrauch pro Maschinenkategorie, Berücksichtigung eines Anteils erneuerbarer Treibstoffe).

4.1.4. Flugverkehr

Die Emissionen des Flugverkehrs werden ebenfalls nach dem generellen Modellierungsansatz mittels Aktivitätsdaten, spezifischem Energieverbrauch und energieträgerspezifischem Emissionsfaktor berechnet. Dabei verwenden wir als Systemgrenze das Absatzprinzip, d.h. es werden alle Emissionen einbezogen, die durch das Verbrennen von Treibstoff verursacht werden, der in der Schweiz getankt wird. Es spielt keine Rolle, ob der Treibstoff im inländischen oder ausländischen Luftraum verbrannt wird.²¹ Unter dieser Systemgrenze sind die Aktivitätsdaten die Anzahl abfliegender Passagiere ab Schweizer Flughäfen für die zivile Luftfahrt. Dabei unterscheiden wir zwischen nationalen und internationalen Flügen. Der Flugverkehr des Militärs und Güterverkehr sowie privater Luftverkehr sind nicht Teil des Modells.²²

Der spezifische Energieverbrauch ist pro Passagier definiert, d.h. es wird eine durchschnittliche Flugdistanz zugrunde gelegt. Im Modell lässt sich nur beeinflussen, ob geflogen wird oder nicht (via der Aktivität Passagiere). Die vereinfachende Annahme geht davon aus, dass die durchschnittliche Flugdistanz in Zukunft unverändert bleibt. Der Einfluss der Flugdistanz auf den spezifischen Energieverbrauch pro Passagier wird nicht modelliert. Dies ist dahingehend unkritisch, da das Modell nur sehr aggregiert ist und die Änderungen der Aktivitätsrate auch als eine Mischung aus der Anzahl Passagiere und deren Flugdistanz interpretiert werden können. Für eine allfällige zukünftige detaillierte Untersuchung des Flugsektors könnte das Modell an dieser Stelle präzisiert werden.

Der spezifische Energieverbrauch reduziert sich über die Jahre durch Energieeffizienzverbesserungen, welche das Potenzial für technische Weiterentwicklungen an den Flugzeugen und eine erhöhte Auslastung sowie für optimierte Abläufe an den Flughäfen widerspiegeln. Eine untere Schranke begrenzt die mögliche Optimierung.

Der Emissionsfaktor von fossilen Flugtreibstoffen reduziert sich mit der zunehmenden Beimischung erneuerbarer Treibstoffe (sustainable aviation fuel, SAF). Als SAF gelten

²¹ Das Absatzprinzip schliesst also auch den Verbrauch internationaler Passagiere ein, die aus der Schweiz starten. Andererseits ist der Verbrauch von Schweizer Passagieren, die ausserhalb der Schweiz starten, ausgeschlossen. Wir haben uns aufgrund der Datenverfügbarkeit für das Absatzprinzip entschieden; und weil die globalen Flugemissionen komplett erfasst sind, wenn alle Länder dieselbe Systemgrenze ziehen. Eine andere gängige Abgrenzungsmethode ist das Halbstreckenprinzip, welches die Emissionen aus der Hälfte der Flugstrecke aller Flüge vom Start in der Schweiz und bei Landung in der Schweiz erfasst. Die Summe der Emissionen entspricht in etwa dem Absatzprinzip.

²² Diese Annahmen dienen zur Vereinfachung und weil die Datengrundlage komplex ist. Güter werden teilweise auch per Belly-Fracht in den Passagierflugzeugen transportiert. Deren Emissionen sind im Modell daher enthalten. Reine Güterflüge hingegen nicht.

strombasierte, synthetische (PtKerosin) und biogene Treibstoffe. Alternative Motortypen (wasserstoffbasiert oder elektrisch) sind wie in den EP2050+ nicht Teil des Modells, da sie leistungsmässig in Zukunft wahrscheinlich nicht mit den herkömmlichen Motortypen für die zivile Luftfahrt konkurrieren können.

Aus Aktivitätsdaten, spezifischem Energieverbrauch und Emissionsfaktor ergibt sich für die Emissionen folgende Formel:

$$E_{\text{Flug}} = P * \text{spez. EV} * EF_{\text{fossil}} * (1 - \text{frac}_{\text{PtKerosin}} - \text{frac}_{\text{biogen}})$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für das Jahr 2023; internationale Flüge)
E_{Flug}	Emissionen Flugverkehr	Mio. tCO ₂ eq	5.0 Mio. tCO ₂ eq
P	Anzahl abfliegender Passagiere	Passagier	26.7 Mio. Passagiere
Spez. EV	Spezifischer Energieverbrauch für einen Flug pro Passagier	GJ/Passagier	2.57 GJ/Passagier
EF_{fossil}	Emissionsfaktor fossile Flugtreibstoffe	gCO ₂ /MJ	72.8 gCO ₂ /MJ
$\text{frac}_{\text{PtKerosin}}$	Anteil strombasierter Flugtreibstoffe	%	0%
$\text{frac}_{\text{biogen}}$	Anteil biogener Flugtreibstoffe	%	0%

Diese Berechnung erfolgt je analog für den nationalen und internationalen Flugverkehr. Der nationale Flugverkehr verursacht nur einen Bruchteil der Gesamtemissionen aus dem Schweizer Flugverkehr (ca. 2%, Stand 2023).

Bei internationalen Flügen berechnet das Modell zusätzlich Nicht-CO₂-Effekte.²³ Diese werden durch klimawirksame Effekte wie Kondensstreifen, Zirruswolkenbildung und Stickoxidemissionen verursacht, die beim Verbrennen von Flugtreibstoffen in Reiseflughöhe entstehen. Es ist üblich, die Nicht-CO₂-Effekte mittels eines Nicht-CO₂-Faktors $f_{\text{Nicht-CO}_2}$ zu berücksichtigen, der mit den CO₂-Emissionen multipliziert wird. Der Nicht-CO₂-Faktor hat somit die gleiche Rolle wie ein GWP-Faktor, der bei «herkömmlichen» Nicht-CO₂ Treibhausgasen wie Methan oder Lachgas verwendet wird. Die Verwendung eines Nicht-CO₂-Faktors ist methodisch fragwürdig, weil die Klimawirkung v.a. von Kondensstreifen zwar relativ hoch, aber zeitlich begrenzt ist (Stunden bis maximal Tage), während CO₂-Emissionen eine sehr lange Klimawirkung haben (mindestens mehrere Jahrhunderte). Zudem ist die Klimawirkung der Nicht-CO₂-Emissionen Gegenstand aktiver Forschung. Es bestehen erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich des physikalischen

²³ Für nationale Flüge sind Nicht-CO₂-Effekte nicht relevant, da diese erst ab einer gewissen Flughöhe wirken, die auf nationalen Flügen im Normalfall nicht erreicht wird.

Prozesses und die Datengrundlage ist schlecht (siehe z.B. Schweizer Akademien der Wissenschaften (SCNAT) 2021 oder Lee et al. 2021).

Aufgrund der relevanten Grössenordnung berücksichtigen wir Nicht-CO₂-Effekte in der Modellierung. Trotz der physikalischen und methodischen Unsicherheiten verwenden wir den Nicht-CO₂-Faktor, da diese Methode etabliert ist und derzeit keine andere Methode existiert, die wir in unserem Modell verwenden könnten. Wir wählen den Wert $f_{\text{Nicht-CO}_2} = 2.5$. Dies ist unsere Einschätzung auf Basis von Tabelle 4 in SCNAT 2021 und Table 5 in Lee et al. 2021.²⁴

Die Forschung geht derzeit davon aus, dass SAF geringere Nicht-CO₂-Effekte haben, weil vermutlich weniger Russ und kein Schwefel entsteht und so weniger Kondensstreifen gebildet werden könnten.²⁵ Es existieren bisher allerdings kaum verlässliche Daten, um diese Hypothese zu quantifizieren. Wir berücksichtigen diesen Effekt, indem wir den Nicht-CO₂-Faktor für SAF um 25% gegenüber fossilen Treibstoffen reduzieren.

Des Weiteren können Nicht-CO₂-Effekte auch durch technische Massnahmen wie z.B. die Routenwahl und modifizierte Triebwerke verringert werden. Daher reduzieren der Parameter Innovation sowie Instrumente der SPA den Nicht-CO₂-Faktor. Wir gehen davon aus, dass dadurch eine maximale Reduktion des Nicht-CO₂-Faktors um 25% erzielt wird.

$$E_{\text{Nicht-CO}_2} = EV_{\text{int}} * EF_{\text{fossil}} * (f_{\text{Nicht-CO}_2, \text{fossil}} * (1 - A_{\text{SAF}}) + f_{\text{Nicht-CO}_2, \text{SAF}} * A_{\text{SAF}}) * (1 - RF_{\text{tech}})$$

²⁴ Für die Bestimmung der externen Kosten des Verkehrs in der Schweiz wurde nicht der Ansatz mittels eines Nicht-CO₂-Faktor gewählt, sondern die spezifischen externen Kosten je Menge NO_x und ultrafeinen Partikel einmalig bestimmt (via einem ähnlichen Ansatz, der auch der Bestimmung des Nicht-CO₂-Faktors zugrunde liegt). Diese spezifischen externen Kosten werden mit der gemessenen Menge NO_x und ultrafeinen Partikel multipliziert, um die externen Kosten der Nicht-CO₂ Effekte zu bestimmen (für Details siehe https://www.infras.ch/media/filer_public/4b/3d/4b3daad5-4d43-46f5-aa26-0cf3737db47c/3773a_externe_effekte_verkehr_schlussbericht.pdf). Ein solcher Ansatz hätte im Rahmen dieses Projekts die Modellierung verkompliziert und würde die gleichen Resultate liefern, weil wir die Menge NO_x und ultrafeinen Partikel auf Basis der CO₂-Emissionen ableiten müssten.

²⁵ Siehe z.B. https://www.bazl.admin.ch/bazl/de/home/themen/umwelt/klima/emissionen/co2_nicht-co2_emissionen.html (11.05.2025)

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für das Jahr 2023)
$E_{\text{Nicht-CO}_2}$	Nicht-CO ₂ -Effekte des internationalen Flugverkehrs der Schweiz	Mt CO ₂ eq	12.5 Mio. tCO ₂ eq
EV_{int}	Energieverbrauch des internationalen Flugverkehrs gestartet in der Schweiz	PJ	68.9 PJ
EF_{fossil}	Emissionsfaktor fossile Flugtreibstoffe	gCO ₂ /MJ	72.8 gCO ₂ /MJ
$f_{\text{Nicht-CO}_2, \text{fossil}}$	Nicht-CO ₂ -Faktor für fossile Flugtreibstoffe	-	2.5
A_{SAF}	Anteil Sustainable Aviation Fuel SAF	-	0%
$f_{\text{Nicht-CO}_2, \text{SAF}}$	Nicht-CO ₂ -Faktor SAF ²⁶	-	1.875 (=2.5*0.75)
RF_{tech}	Reduktion Nicht-CO ₂ -Effekte durch technische Massnahmen	-	maximal 25%

4.1.5. Graue Emissionen

Graue Emissionen fallen bei der Fahrzeugherstellung, -wartung und-entsorgung an, sowie bei der Treibstoffherstellung und der Bereitstellung der Infrastruktur (Bau und Instandhaltung von Strassen und Schienen). Diese Emissionen sind in den Ergebnissen des Sektors Verkehr nicht direkt berücksichtigt. Allerdings sind sie auf einer hohen Aggregationsebene im Modul Importe und Exporte enthalten sowie teils auch in den Modulen Industrie und Energie.

Um den Einfluss der grauen Emissionen abzuschätzen und weil entsprechende Daten existieren, haben wir im Modell die grauen Emissionen pro Verkehrsmittel und Antriebstechnologie des Personenverkehrs gemäss folgender Formel berechnet.

$$E_{\text{grau}, \text{VM}} = \sum_{\text{AT}} E_{\text{grau}, \text{VM}, \text{AT}} = \sum_{\text{AT}} \text{spez. } E_{\text{grau}, \text{VM}, \text{AT}} * \text{Flottenmix}_{\text{VM}, \text{AT}} * \text{Distanz}_{\text{VM}}$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel
$E_{\text{grau}, \text{VM}}$	Gesamte Graue Emissionen des Verkehrsmittels VM	Mio. tCO ₂	2.4 Mio. tCO ₂ für Herstellung fossile PW
$E_{\text{grau}, \text{VM}, \text{AT}}$	Graue Emissionen des Verkehrsmittels VM mit Antriebstechnologie AT	Mio. tCO ₂	1.4 Mio. tCO ₂ für Herstellung PW mit Benzinmotor
Spez. $E_{\text{grau}, \text{VM}, \text{AT}}$	Spezifischer Emissionsfaktor für Graue Emissionen des Verkehrsmittels VM der Antriebstechnologie AT	gCO ₂ /Fzg-km	39.2 gCO ₂ /Fzg-km für Herstellung PW mit Benzinmotor
$\text{Distanz}_{\text{VM}}$	Fahrleistung des Verkehrsmittels VM	Mrd. Fzg-km	35.2 Mrd. Fzg-km PW mit Benzinmotor

²⁶ Unter der Annahme, dass vor allem synthetische Treibstoffe und nur geringe Mengen Biotreibstoffe verwendet werden.

Diese Werte werden in den Ergebnissen zur Veranschaulichung aufgeführt, fliesen aber des Weiteren nicht in das Modell ein, da sonst eine Doppelzählung mit den Sektoren Importe und Industrie resultieren würde. Wir haben Graue Emissionen nur für die SSP-CH modelliert, nicht für die SPA.

4.2. Bestehende Arbeiten und Datenquellen

Wir haben folgende Datenquellen verwendet:

- Bundesamt für Statistik für Wohnbevölkerung, Distanzen, Verkehrsleistung und Modalsplit des Personen- und Güterverkehrs²⁷ für das Startjahr 2023
- Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA) für den spezifischen Energieverbrauch und aktuelle Weiterentwicklung der Energieperspektiven 2050+ (v.a. ZERO Basis) für Flottenmix und Anteil erneuerbarer Treibstoffe
- Plattform mobitool²⁸ für spezifische graue Emissionsfaktoren
- BAFU Non-Road Datenbank²⁹ für Ausgangswerte des Non-Road-Sektors
- Bundesamt für Statistik (Sektion Mobilität) und Bundesamt für Zivilluftfahrt für Passagierströme und Treibstoffverbrauch des Schweizer Flugverkehrs

Diese Quellen definieren die Ausgangswerte des Modells, welches im Jahr 2023 beginnt. In manchen Fällen dienen die Daten zudem dazu, eine Basisentwicklung bis in das Jahr 2060 zu definieren, von der die fünf SSP-CH abweichen. Für den Zeitraum nach 2060 gibt es keine Basisentwicklung.

4.3. Beschreibung Szenarien für Sektor Verkehr

4.3.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

SSPO-CH

Der Pendlerverkehr sowie auch der Freizeitverkehr sind stark reduziert. Die Schweiz ist dezentral und kleinräumig strukturiert, es findet sich ein vielfältiges Angebot auf engem Raum. Auch ländliche Zentren verfügen über sämtliche öffentliche Dienstleistungen und sind entsprechend gewachsen. Trotz mannigfaltiger Mobility-Sharing-Angebote ist das Pendeln so teuer geworden, dass sich viele Leute für einen Umzug in die Zentren entschieden haben. Bei einem Wechsel des Arbeitsortes ist es heute üblich, auch den Wohnort zu wechseln. Die ländliche Bevölkerung ausserhalb der

²⁷ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/personenverkehr/leistungen.html>;
<https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/mobilitaet-verkehr/gueterverkehr/strasse.html>

²⁸ <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v3-0-25.html>

²⁹ <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/non-road-datenbank.html>

Zentren ist vor Ort tätig. Die hohe Qualität der sozialen Strukturen und des öffentlichen Raums ermöglicht eine lebenswerte Wohn- und Freizeitgestaltung für viele Menschen auf relativ kleinem Raum.

SSP1-CH

Effiziente Batterien und Wasserstoffantriebe haben es ermöglicht, den Energieverbrauch pro zurückgelegtem Kilometer auf ein Minimum zu reduzieren und gleichzeitig die hohen Mobilitätsansprüche der Bevölkerung zu befriedigen. Der öffentliche Verkehr ist gut ausgebaut und günstig. Autonome Fahrzeuge sind verbreitet. Pendeln ist ebenso üblich wie das Zurücklegen langer Distanzen für die Freizeitbeschäftigung. Die Mobilitätsinfrastruktur ist kapazitätsintensiv und flächensparend.

SSP3-CH

Wegen hoher Energiepreise sind die Menschen viel weniger mobil als früher. Der Staat unterhält Teile der Verkehrsinfrastrukturen nicht mehr. Dies führte zunächst zu einem Wachstum der grossen Städte, weil die Menschen in die Nähe möglicher Arbeitsstellen zogen. Gegen Ende des Jahrhunderts kehrt sich dieser Trend wieder um und die Leute kehren vermehrt aufs Land zurück. Den grössten Anteil des Verkehrs stellen Velo und Fussverkehr.

SSP4-CH

Während die Elite eine energieintensive globale Mobilität in Anspruch nimmt, verkürzen sich die Wege der Unterschicht zusehends. Die vermögendsten 20 Prozent der Bevölkerung nutzen den internationalen Flugverkehr. Der Rest ist weitgehend immobil oder mit schlecht ausgebautem ÖV unterwegs. Der Warenverkehr und der Personenverkehr sind entkoppelt. Aufgrund sinkender Preise von alternativen Antrieben und neuer Technologien kommen immer mehr unbemannte Lieferroboter zum Einsatz.

SSP5-CH

Die Mobilität in der Schweiz basiert stark auf fossilen Energieträgern. Sowohl das Freizeitverkehrsaufkommen als auch das Pendlerverkehrsaufkommen erreichten Mitte des Jahrhunderts ein sehr hohes Niveau. Die Verkehrsinfrastruktur für den Individualverkehr wurde stark ausgebaut und nimmt entsprechend sehr viel Fläche in Anspruch. Seit der Verteuerung der fossilen Energie hat der Individualverkehr stark abgenommen. Eine stabile individuelle Mobilität sowie Flugreisen können sich am Ende des Jahrhunderts nur noch wenige leisten. Auch der internationale Güterverkehr nimmt gegen Ende des Jahrhunderts ab, erstens wegen des Konsumrückgangs, durch die

Wohlstandsabnahme, zweitens wegen der zusehends polarisierten Weltordnung und Handelseinschränkungen.

4.3.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Im Folgenden werden die SPA für den Sektor Verkehr beschrieben (für mehr Details siehe Kapitel 4.7).

SPA0: Status Quo

Die schweizerische Verkehrspolitik zielt darauf ab, die steigende Mobilitätsnachfrage zu befriedigen und gleichzeitig sektorale Klimaziele zu erreichen. Herausforderungen sind die Elektrifizierung der Fahrzeugflotte, Erhöhung der Effizienz, die Reduktion der Emissionen im Flugverkehr sowie die Förderung von Schiene und öffentlichem Verkehr. Bestehende Instrumente fokussieren auf Steuern und Emissionsstandards, Schienenverkehr wird gefördert.

SPA1: Grüner Staat

Dieses Szenario ist geprägt von starken staatlichen Eingriffen. Die Elektrifizierung des Verkehrs wird massiv gefördert, während der motorisierte Individualverkehr durch CO₂-Abgaben und Verbrennerverbote stark eingeschränkt wird. Der öffentliche Verkehr wird weiter ausgebaut, während der Flugverkehr durch Steuermassnahmen und SAF-Beimischung reguliert wird.

SPA2: Ökologische Republik

Die Verkehrspolitik fokussiert auf die Förderung von öffentlichem Verkehr und von Fuss- sowie Radverkehr. Im Gegensatz zum SPA 1 setzt SPA 2 weniger auf regulatorische Politikinstrumente, und fokussiert weniger auf die Elektrifizierung von Individualverkehr.

SPA3: Ordoliberaler Staat

In diesem Szenario werden staatliche Eingriffe und Förderungen auf ein Minimum reduziert. Steuererleichterungen begünstigen den motorisierten Individualverkehr und schwächen den öffentlichen Verkehr. Es gibt keinen verpflichtenden SAF-Anteil im Flugverkehr. SPA 3 hat demnach keine starke Lenkungswirkung in Richtung Dekarbonisierung.

SPA4: Kompensierender Staat

Dieses Szenario priorisiert den fossilen Individualverkehr und den Ausbau der Strasseninfrastruktur. Fossile Mobilität wird finanziell gestützt. Der Flugverkehr wird ausgebaut und von SAF-Verpflichtungen befreit. Die Verkehrspolitik fokussiert auf Kostenentlastung der Bevölkerung statt Emissionsreduktion.

4.4. Modellierung Wirkung

4.4.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Die folgenden Kapitel beschreiben, in welchen Schritten und auf Basis welcher Datengrundlagen wir die Emissionen des Verkehrssektors berechnen. Dieses Kapitel beschreibt, wie die Ausgangswerte bzw. die Basisentwicklung mittels der sektorspezifischen SSP-Wirkungsmatrix beeinflusst wird, um die Entwicklung der Emissionen pro SSP-CH zu modellieren. In der Wirkungsmatrix werden die Szenarioparameter der SSP-CH und die Modellparameter des Sektors miteinander gekoppelt (siehe auch Kapitel 3.2).

Dieses Kapitel beschreibt die zentralen Wirkungen zwischen den Szenarioparametern der SSP-CH und den Modellparametern des Verkehrssektors. Die vollständigen Wirkungsmatrizen für jeweils Personenverkehr, Güterverkehr, Non-Road-Verkehr und Flugverkehr sind in Kapitel 4.6 dargestellt. Der Fokus liegt auf dem Personenverkehr, welcher in den SSP-CH die grösste Relevanz hat.

4.4.1.1. Personenverkehr

Die SSP-CH wirken anhand der Szenarioparameter auf die Nachfrage Mobilität, die Art Mobilität und die Energieeffizienz.

Nachfrage Mobilität

Die Szenarioparameter Wohnbevölkerung, Personenkilometer und Verdichtungslevel³⁰ bestimmen die jährliche Gesamtdistanz, die pro Jahr von der Schweizer Bevölkerung über alle Verkehrsmittel zurückgelegt wird. Die Entwicklung dieser Szenarioparameter wird mit einer Elastizität von 1 (bzw. -1 für Verdichtungslevel) an den Modellparameter Gesamtdistanz weitergegeben. Das bedeutet: Steigt z.B. die Wohnbevölkerung um 10%, steigt auch die Gesamtdistanz im Modell um 10%.

Verkehrsmittel (Art der Mobilität)

Welches Verkehrsmittel genutzt wird, hängt von den Szenarioparametern Verdichtungslevel, BIP pro Kopf und Umweltbewusstsein ab. Diese beeinflussen in Kombination die Modellparameter Modalsplit (prozentualer Anteil des Verkehrsmittels bezogen auf die zurückgelegten Personenkilometer) und das Gewicht der Fahrzeuge. Besonders entscheidend für die Emissionen ist die Entwicklung des Anteils MIV (motorisierter Individualverkehr) am Modalsplit. Wir nehmen an, dass der Anteil MIV und die Fahrzeuggrösse mit steigendem BIP pro Kopf steigen und

³⁰ Dieser Parameter beeinflusst zusätzlich die durchschnittliche Wegstrecke, weil in einem verdichteten Raum weniger Distanz zurückgelegt wird.

mit steigendem Umweltbewusstsein oder Verdichtungslevel sinken.³¹ Ausserdem ist für die Emissionen relevant, ob der MIV elektrisch (BEV) oder mit einem Verbrennermotor betrieben wird. Die Entwicklung des entsprechenden Modellparameters Flottenmix wird explizit über den Szenarioparameter Anteil BEV am Flottenmix abgedeckt. Für die Verbrennermotoren wird auch berücksichtigt, ob sie mit fossilen oder erneuerbaren Treibstoffen betrieben werden (Szenarioparameter Anteil erneuerbarer am Gesamtmix). Zusätzlich beinhaltet das Modell, falls nötig, eine Skalierung der Verkehrsmittel, um den Modalsplit und Flottenmix auf gesamt 100 % zu begrenzen (siehe Annex A3).

Energieeffizienz der Mobilität

Die Energieeffizienz der Verkehrsmittel hängt von den Szenarioparametern Innovationstätigkeit und Produktnutzungsdauer ab: Steigende Innovationstätigkeit führt zu einer schnelleren Verbesserung der Energieeffizienz durch technischen Fortschritt. Eine längere Produktnutzungsdauer verlangsamt diese Entwicklung, da ältere, weniger effiziente Fahrzeuge länger in Betrieb bleiben.³²

Die Elastizitäten dieser Wirkungspfade (siehe Kapitel 3.2) haben wir, wo möglich, auf Basis der Literatur festgelegt. Die Bandbreiten sind aber in der Regel gross. Oft existiert auch keine Literatur (v.a. für abstrakte Szenarioparameter wie Umweltbewusstsein). Schlussendlich haben wir daher v.a. Expertenschätzungen und Plausibilisierungen verwendet. Die Elastizität der Wirkungspfade ist dabei so kalibriert, dass die Entwicklungen der Szenarioparameter die plausible Bandbreite der Modellparameter voll ausschöpfen.³³

4.4.1.2. Güterverkehr

Aufbau und Kalibrierung der Wirkungspfade im Güterverkehr folgen derselben Logik (aber mit anderen Elastizitäten) wie im Personenverkehr. Die Komplexität ist etwas reduziert. Zwei Wirkungspfade sind dabei hervorzuheben:

- Der Einfluss des Szenarioparameters Umweltbewusstsein beeinflusst massgeblich den Umstieg auf den Schienengüterverkehr.

³¹ Mit diesem Vorgehen decken wir jeweils die direkteste Wirkung zwischen den Parametern ab. Sättigungseffekte, z.B. dass der Anteil MIV nur bis zu einer gewissen Schwelle mit dem BIP pro Kopf steigt, werden nicht berücksichtigt.

³² Die grauen Emissionsfaktoren je Verkehrsmittel verringern sich durch technische Verbesserungen (via Innovationstätigkeit) oder längere Produktnutzungsdauer verringern. Diese Emissionsfaktoren hängen zudem vom Anteil erneuerbarer am Gesamtmix (für Energieerzeugung) ab – je höher dieser Anteil, desto weniger Emissionen fallen während Infrastruktur, Produktion und Entsorgung der Fahrzeuge an, unter der Annahme, dass die Entwicklung im Ausland, wo viele dieser Emissionen anfallen, ähnlich wie in der Schweiz ist.

³³ Zum Beispiel haben wir die Elastizität so gewählt, dass für das SSP-CH mit der höchsten Innovationstätigkeit der spezifische Energieverbrauch der Fahrzeuge den kleinstmöglichen Wert erreicht.

- Speziell für den Güterverkehr wurde der Szenarioparameter Verbreitung Wasserstoff als Energieträger definiert, der den Anteil von wasserstoffbetriebenen Fahrzeugen im Schwerverkehr sowie die technische Entwicklung solcher Fahrzeuge bestimmt.

4.4.1.3. Non-Road

Tabelle 7 zeigt die Wirkungspfade des Non-Road-Sektors. Der Bestand der Maschinen ist abhängig vom BIP pro Kopf und der Wohnbevölkerung und, für Maschinen der Landwirtschaft, der Fläche für den Ackerbau (abgeleitet vom Vorgehen in Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2015). Die Entwicklung des Flottenmixes (fossil betrieben vs. batterieelektrisch oder wasserstoff-basiert) wird nicht eigenständig modelliert, sondern vom Strassen-Güterverkehr mit einer Verzögerung von einem modellierten Zeitschritt übernommen.³⁴ Damit wird abgebildet, dass in der Regel dieselben Technologien der Lastwagen verzögert auch im Non-Road-Sektor zum Einsatz kommen.

4.4.1.4. Flugverkehr

Relevante Wirkungspfade im Flugverkehr sind zum einen die Entwicklung der Nachfrage, die über die Szenarioparameter Wohnbevölkerung, BIP pro Kopf und Umweltbewusstsein definiert wird. Je höher die Wohnbevölkerung und je reicher die Bevölkerung, desto mehr Personen fliegen. Mit steigendem Umweltbewusstsein reduziert sich die Anzahl der Flüge. Ein Spezialfall ist SSP4: Trotz steigendem durchschnittlichen BIP pro Kopf, fliegen nur die reichen 20% der Bevölkerung mehr, der Rest fliegt wesentlich weniger.

Ein Anstieg des Szenarioparameters Innovationstätigkeit erhöht die Energieeffizienz und reduziert die Nicht-CO₂-Effekte. Der Anteil erneuerbarer Treibstoffe (SAF) im Flugverkehr wird über eine Reihe von Szenarioparametern (Anteil Erneuerbarer am Gesamtmix, Innovationstätigkeit und Umweltbewusstsein) jeweils erhöht. Zudem steigt der Anteil an synthetischen Treibstoffen (PtKerosin) noch zusätzlich mit dem BIP pro Kopf, da diese teurer sind als herkömmliches Kerosin.

4.4.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Für jedes SPA haben wir Instrumente ausgewählt, mit denen die im vorigen Kapitel beschriebenen sozioökonomischen und technischen Trends ergänzt werden. Eine Zusammenstellung der Instrumente je SPA findet sich in Kapitel 4.7

Die Wirkung eines SPA auf die Modellparameter variiert, je nachdem, mit welchem SSP-CH es kombiniert wird. Bei SPA, die mit mehreren SSP-CH verknüpft werden (SPA1, SPA3), wird deshalb in der Tabelle ein Wirkungsbereich angegeben. Die Unterschiede kommen daher, dass

³⁴ Je nach Maschinenkategorie wird der Flottenmix der LNF oder SNF übernommen.

die Wirkungen der Instrumente in der Regel als relative Grösse definiert sind und pro SSP-CH auf unterschiedliche Ausgangswerte der Modellparameter treffen. So hätte eine Politik zur Förderung des Veloverkehrs bei einer relativen Wirkung von 20% auf den Anteil des Veloverkehrs einen stärkeren absoluten Effekt in einem Szenario mit bereits hohem Veloverkehr.³⁵ Diesen Aspekt haben wir bei der Wahl der Höhe der Wirkung, soweit möglich, berücksichtigt, um ein plausibles Gesamtbild zu erhalten. Zusätzlich wird bei modellierten Verteilungen (Modalsplit, Flottenmix) nach Anwendung der SPA eine Skalierung durchgeführt, um sicherzustellen, dass die Summe der Anteile stets 100 % ergibt (siehe Anhang A3).

Tabelle 2 zeigt unsere Annahmen zum Wirkungsbereich der SPA im Verkehrssektor und vergleicht diese mit der Literatur. Da die Werte der Modellparameter sich in jedem SSP-CH über die Zeit weiterentwickeln, ist auch innerhalb eines SSP-CH die Wirkung desselben SPA im zeitlichen Verlauf nicht konstant. Daher zeigt die Tabelle jeweils den maximalen Effekt. Verstärken die Instrumente des SPA die generelle Ausrichtung des SSP-CH, nimmt die Wirkung in der Regel im Zeitverlauf ab, falls eine Sättigung bereits durch die SSP-CH erreicht wird.

Um die Wirkung von politischen Instrumenten abzuschätzen, verwenden wir verschiedene Quellen, welche eine Indikation für die mögliche Höhe der Wirkung geben: Studien zur Wirksamkeit konkreter Instrumente, Statistiken zum historischen Verlauf einzelner Modellparameter (BFS, Mikrozensus) sowie Prognosen aus bestehenden Szenarien wie den Energie- und Verkehrsperspektiven der Schweiz (Energieperspektiven 2050+ 2022; Verkehrsperspektiven 2050 2022). Diese Informationen dienen als Orientierung, jedoch nicht als starre Vorgabe, denn die hier untersuchten Kombinationen aus SPA und SSP-CH gehen bewusst über den bislang modellierten und empirisch belegten Rahmen hinaus. Ausserdem sind historische Entwicklungen nicht das Ergebnis einzelner Politiken, sondern das Resultat komplexer gesamtgesellschaftlicher Entwicklungen, die auch von anderen Faktoren beeinflusst wurden und deren Wirkung daher in der Regel nur mit Schwierigkeiten isoliert werden kann.

³⁵ Beispielsweise würde dies bei einem Ausgangswert von 10% einen absoluten Anstieg von 2% bedeuten, aber bei einem Ausgangswert von 1% nur einen Anstieg von 0.2%.

Tabelle 2: Annahmen Wirkungsbereich der SPA im Verkehrssektor und Vergleich Literatur Schweiz.

Modellparameter	Wirkungsbereich SPA ³⁶	Vergleich Literatur Schweiz
Personenkilometer	-20% bis +20%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zunahme von 18% zwischen 1994 und 2015 ▪ Mikrozensus Mobilität und Verkehr, 2021 (BFS)
Modalsplit (Personenkilometer) Personenverkehr	-20 PP bis +20 PP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stärkste Schwankung zwischen 65% (2010) und 69% (2021) ▪ Daten aus Mikrozensus Mobilität und Verkehr, 2021 (BFS) für vergangene Jahrzehnte
Flottenmix (Personenverkehr und Güterverkehr)	-20 PP bis +20 PP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anteil BEV in der Flotte der Personenwagen <ul style="list-style-type: none"> ▪ Szenario Weiter-wie-Bisher: 1%-54% (2020-2060) ▪ Szenario ZERO Basis: 1%-83% (2020-2060) ▪ Energieperspektiven 2050+
Besetzungsgrad Personenwagen	Zunahme um +25%*	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Übernommen von den Szenarien der Verkehrsperspektiven 2050 (ARE, 2022)
Verkehrsleistung	-20% bis +20%	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zunahme von 40% zwischen 1990 und 2022 ▪ BFS Gütertransportstatistik³⁷
Modalsplit Güterverkehr	-10 PP bis +10 PP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Anteil Schiene: Schwankung zwischen 42% (1990) und 38% (2022) ▪ BFS Gütertransportstatistik³⁸

*Da der Besetzungsgrad nur durch ein Instrument beeinflusst wird, ist kein Wirkungsbereich angegeben.

Tabelle INFRAS.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht der Wirkung der SPA auf den Energieverbrauch als Änderungen gegenüber den SSP-CH. Gezeigt sind die Spannweite der prozentualen Wirkung und die maximale absolute Wirkung. Die Wirkung der SPA hängen aus zwei Gründen von der Zeit ab. Erstens wirken gewisse Instrumente nicht sofort. Zweitens ändert sich das zugrundeliegende SSP-CH mit der Zeit und somit auch die Wirkung des SPA (z.B. erzielt ein Verbot fossiler Treibstoffe keine Wirkung, wenn die Gesellschaft in dem SSP-CH keine fossilen Treibstoffe mehr verwendet). Die Tabelle verdeutlicht, dass starke Veränderungen bei den SPA insbesondere dann auftreten, wenn ein starkes politisches Eingreifen erfolgt (z.B., wenn einschneidende Regulierungen statt mässiger Anreize zum Einsatz kommen). Daher zeigen sich deutlich grössere Effekte bei SPA1 und SPA4 im Vergleich zu SPA2 und SPA3. SPA3 und SPA4 führen zu einem Anstieg des Energieverbrauchs, während SPA1 und SPA2 eine Abnahme bewirken. Die maximale Eingriffstiefe liegt bei etwa $\pm 30\%$ des gesamten Energieverbrauchs, wobei die stärksten relativen und absoluten Auswirkungen im Bereich des Personenverkehrs zu beobachten sind.

³⁶ Die Bandbreiten entsprechen einer starken Abnahme bis starken Zunahme. Die Änderungen beziehen sich immer auf die Werte der Szenarien ohne SPA im jeweiligen Jahr.

³⁷ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/publikationen/uebersichtsdarstellungen/statistisches-jahrbuch/2024/mobilitaet-verkehr/gueterverkehr.assetdetail.27685465.html>

³⁸ <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/kataloge-datenbanken/publikationen/uebersichtsdarstellungen/statistisches-jahrbuch/2024/mobilitaet-verkehr/gueterverkehr.assetdetail.27685466.html>

Tabelle 3: Wirkung SPA Energieverbrauch Verkehr

SPA SSP	SPA1 Grüner Staat	SPA2 Ökologische Republik	SPA3 Ordoliberaler Staat	SPA4 Kompensie- render Staat
SSP0		-12% bis -21% max. -45 PJ in 2035		
SSP1	-17% bis -24% max. -39 PJ in 2035		+7% bis +12% max. +17 PJ in 2035	
SSP3			+10% bis +44% max. +26 PJ in 2050	
SSP4	-13% bis -35% max. -60 PJ in 2060		+5% bis +16% max. +25 PJ in 2060	
SSP5				+22% bis +28% max. +103 PJ in 2060

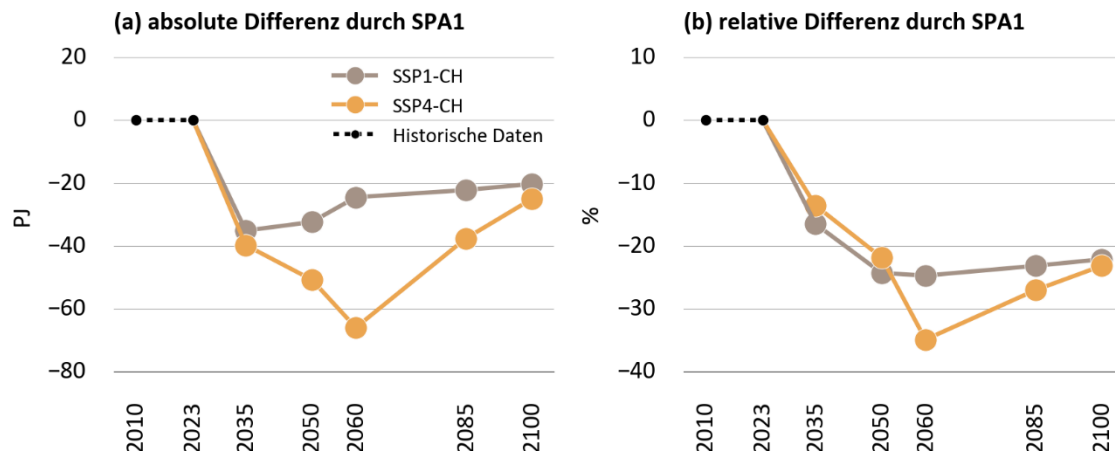
Tabelle INRAS

Die relative Wirkung der SPA bleibt in der Regel konstant. Die absolute Wirkung hingegen ist häufig zeitlich begrenzt und nimmt gegen Ende des Jahrhunderts ab. Dies liegt daran, dass sich die langfristige Entwicklung der SSP-CH zunehmend in dieselbe Richtung bewegt wie die SPA. So führt beispielsweise ein SPA, das den Energieverbrauch um 10 % senkt, zu einer Reduktion um 10 Petajoule (PJ), wenn der Ausgangswert bei 100 PJ liegt. Sinkt der Ausgangswert jedoch auf 50 PJ, reduziert sich der absolute Effekt auf lediglich 5 PJ.³⁹ So sind die Effekte der SPA geringer, wenn entsprechende Entwicklungen bereits in den SSP-CH grundlegend verankert sind. In solchen Fällen beschleunigt das SPA lediglich den bestehenden Trend. Daher hat beispielsweise SPA1 im Szenario SSP1-CH ab dem Jahr 2060 sowohl relativ als auch absolut eine geringere Wirkung als im Szenario SSP4-CH.

Abbildung 5 zeigt diese Effekte beispielhaft an der Wirkung von SPA1 auf SSP1-CH bzw. SSP4-CH. Es ist zu erkennen, dass die absolute Wirkung in der zweiten Jahrhunderthälfte abnimmt, während die relative Wirkung in etwa konstant bleibt. Zudem wirkt SPA4 stärker auf SSP4-CH, weil dort die Referenzemissionen höher sind.

³⁹ Prinzipiell wäre auch vorstellbar, dass der Ausgangswert steigt und somit die Wirkung des SPA im Laufe der Zeit zunimmt. Dies ist aber im Modell kaum der Fall, weil die SPA in der Regel gehen wie die SSP-CH.

Abbildung 5: Beispiel Wirkung SPA1 auf Energieverbrauch Sektor Verkehr



Gezeigt ist die Differenz zwischen dem Energieverbrauch der SSP-CH exklusive und inklusive von SPA1. Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

4.5. Ergebnisse und Diskussion

4.5.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Die folgenden Kapitel zeigen die Ergebnisse der Modellierung des Verkehrssektors. Die ersten Unterkapitel diskutieren die Entwicklung zentraler Einflussfaktoren im Personenverkehr sowie im Güter- und Non-Road-Bereich. Es folgen die Resultate des Endenergieverbrauchs und schlussendlich der Treibhausgasemissionen. Am Schluss sind die Ergebnisse für den Sektor Luftverkehr und die grauen Emissionen separat dargestellt.

4.5.1.1. Einflussfaktoren Personenverkehr

Entscheidend für die Reduktion des Endenergieverbrauchs des Verkehrssektors ist die Entwicklung des individuellen Personenverkehrs auf der Strasse (MIV), der im Jahr 2023 mit einem Anteil von 69% (exklusive internationalem Flugverkehr) den Endenergieverbrauch des Verkehrs dominiert. Die zentralen Einflussfaktoren auf den MIV und wie diese sich pro SSP-CH verändern, fasst Tabelle 4 zusammen.

Tabelle 4: Wichtigste Effekte für Ergebnisse der SSP-CH Modellierung (Veränderung 2060 ggü. 2023)

Sektor Verkehr - Personenverkehr			
Auslöser SSP	Personenkilometer	Anteil MIV im Modalsplit	Umstieg auf E-Mobilität
pSSP0	Abnahme (-8%)	Starke Abnahme (-19PP) zugunsten ÖV und Fuss- und Veloverkehr	Hoch
SSP1	Abnahme (-8%)	Abnahme (-16PP) zugunsten ÖV	Hoch
SSP3	Starke Abnahme (-31%)	Starke Abnahme (-25PP) zugunsten Fuss- und Veloverkehr	Tief
SSP4	Zunahme (+8%)	Konstant	Hoch
SSP5	Starke Zunahme (+45%)	Leichte Zunahme (+10PP)	Tief

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Tabelle INFRAS.

Der Energieverbrauch wird besonders dann reduziert, wenn der Anteil des MIV am Modalsplit sinkt oder die Fahrzeugflotte elektrifiziert wird, selbst bei anhaltend hoher Nachfrage. Beide Faktoren erhöhen die Energieeffizienz der Mobilität erheblich: Im ÖV werden mit derselben Menge Energie mehr Personen transportiert und BEV sind aufgrund des besseren Wirkungsgrades ihres Motors energieeffizienter als Fahrzeuge mit Verbrennermotoren (Faktor 2 bis 3).

Sowohl die Reduktion des MIV-Anteils als auch der Umstieg auf E-Mobilität erfolgen in SSP0-CH und SSP1-CH, die durch Innovationskraft (SSP1-CH), Verkehrsabnahme (SSP0-CH) und durch verringerte Nachfrage nach fossilem Verkehr durch höheres Umweltbewusstsein (SSP0-CH und SSP1-CH) geprägt sind. In beiden Szenarien reduziert sich der Anteil des MIVs zugunsten des Fussverkehrs und des Veloverkehrs und/oder ÖV während gleichzeitig die MIV-Flotte (sowie die ÖV-Strassenflotte) vollständig auf Elektromobilität umgestellt wird. Durch diese Umstellungen dominieren in SSP0-CH und SSP1-CH am Ende des Jahrhunderts der ÖV den Energieverbrauch des Personenverkehrs und Strom wird der wichtigste Energieträger (19 PJ in SSP0-CH und 48 PJ in SSP1). Im SSP4-CH wird nur der technische Teil dieser Entwicklungen umgesetzt: Hier bestimmen die kontinuierliche Elektrifizierung und die Energieeffizienzverbesserungen aller Motorentypen die Reduktion des Energieverbrauchs.

Im Gegensatz zu diesen Szenarien ist die Reduktion des Energieverbrauchs in SSP3-CH Folge von wachsender Armut, durch die vor allem der MIV weniger erschwinglich wird. Gleichzeitig stellt der schwache Staat weniger ÖV zur Verfügung, sodass der Fussverkehr und der Veloverkehr gegen Ende des Jahrhunderts eine stärkere Rolle spielen und daher die

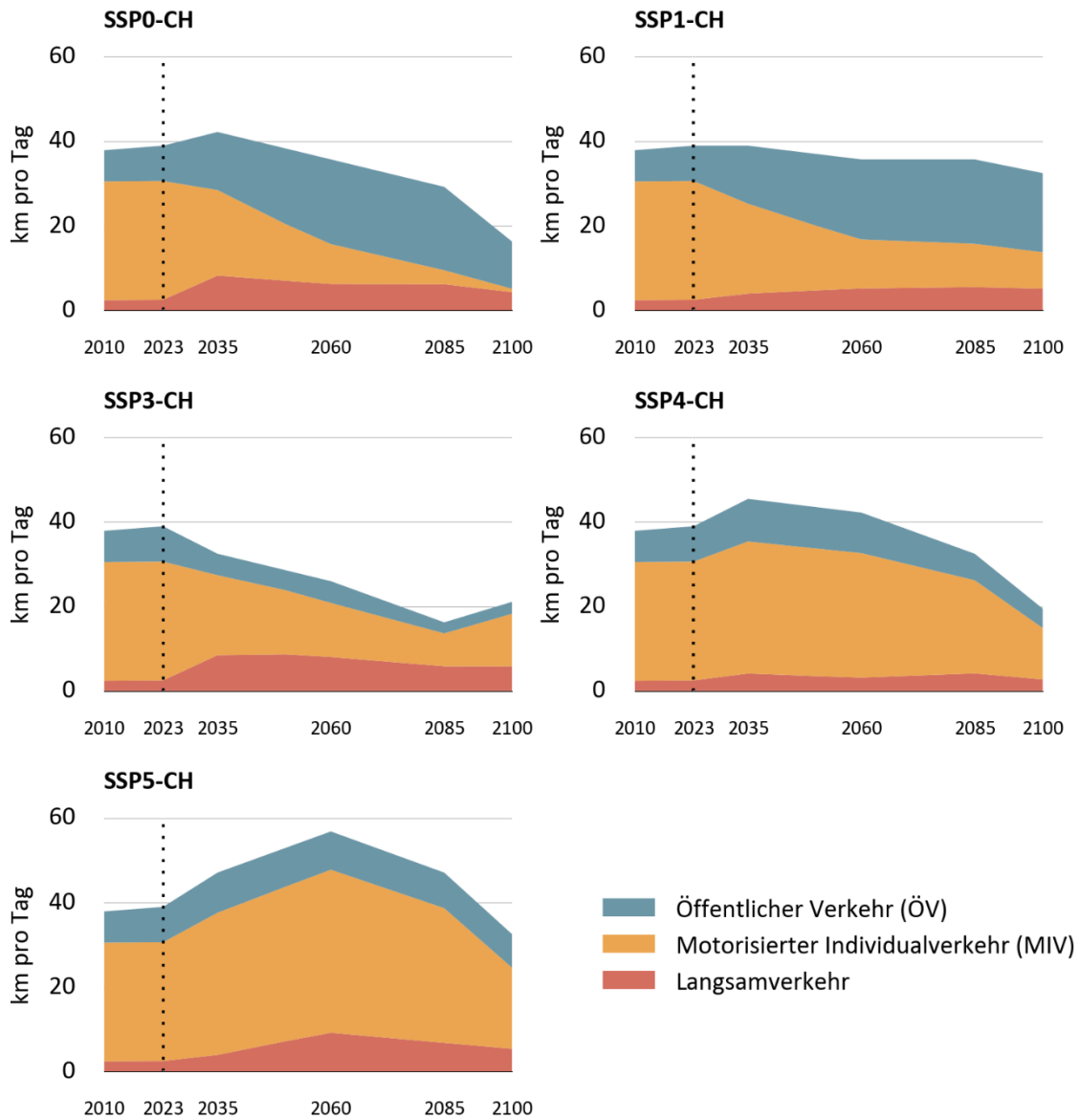
Gesamtmobilität deutlich zurückgeht.⁴⁰ Eine konsequente Elektrifizierung der MIV-Flotte bleibt aus, wodurch fossile Energieträger weiterhin den überwiegenden Teil des Energiebedarfs decken. Zu Ende des Jahrhunderts ist eine Zunahme des MIVs zu verzeichnen, verursacht durch einen Anstieg der Mobilität der Eliten.

Zu erwähnen ist, dass die Ergebnisse des Langsamverkehrs mit Vorsicht zu interpretieren sind, da dessen präzise Modellierung kein Fokus unserer Arbeit war, weil der Langsamverkehrs keine Emissionen verursacht.

Aus dem Energieverbrauch pro Energieträger (Abbildung 2) wird deutlich, dass sich die Verteilung in SSP0-CH, SSP1-CH und SSP4-CH hin zu Strom als wichtigstem Energieträger verschiebt. In SSP4-CH entsteht zusätzlich Nachfrage nach biogenen Treibstoffen, um den Energiebedarf zu decken. In SSP3-CH und SSP5-CH wird der Mix weiterhin von fossilen Energieträgern dominiert. Auch in SSP5-CH bleibt der Anteil von Verbrennermotoren und der Verbrauch fossiler Energieträger hoch. Da der MIV weiterhin dominiert und die Gesamtmobilität sogar zunimmt, steigt der Energieverbrauch des Personenverkehrs bis 2060 stark (um +32%). Die Reduktion erfolgt erst später, wenn sich der Grossteil der Bevölkerung diese Art von Mobilität nicht mehr leisten kann und die Bevölkerung insgesamt abnimmt.

⁴⁰ Der erneute Anstieg zwischen 2085 und 2100 folgt aus einer beginnenden Zersiedelung, die längere Distanzen pro Tag erforderlich macht.

Abbildung 6: Distanz pro Tag und Person nach Verkehrsmittel pro SSP-CH.

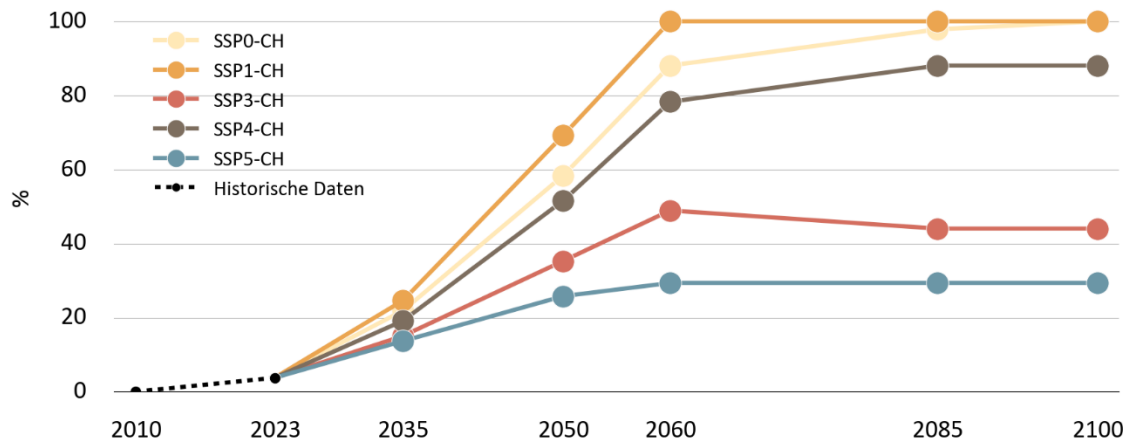


Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Abbildung 7: Anteil BEV (Personenkilometer) am Flottenbestand für motorisierten Individualverkehr (MIV)



Hinweis: Bei einer zeitlich besser aufgelösten Modellierung würde die Entwicklung v.a. zwischen 2035 und 2060 vermutlich nicht linear verlaufen. Vermutlich wären die Anteile in der Periode 2040-2055 in den drei Szenarien mit starkem BEV-Anstieg wesentlich höher. Daher ist diese Zeitspanne mit Vorsicht zu interpretieren.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

4.5.1.2. Einflussfaktoren Güterverkehr und Non-Road-Sektor

Entwicklungen der Verkehrsleistung auf Schiene oder Strasse (siehe Abbildung 86 im Anhang), der Arbeitsleistung der Non-Road-Maschinen sowie beim Flottenmix der Nutzfahrzeuge (siehe Abbildung 87 im Anhang) verlaufen in unserem Modell grundsätzlich ähnlich zum Personenverkehr in den jeweiligen SSP-CH, auch wenn die zugrundeliegenden Treiber teils andere sind. So ist der Güterverkehr stärker von der wirtschaftlichen Entwicklung abhängig als der Personenverkehr. Diese wird mit dem Szenarioparameter «Güterverkehr» abgebildet. In SSP0-CH und SSP1-CH ist insbesondere eine deutliche Verlagerung des Güterverkehrs auf die Schiene zu sehen, deren Anteil bis 2060 um 25% bzw. 33% steigt. Im SSP1-CH trägt diese Verschiebung auch dazu bei, die gestiegene Verkehrsnachfrage zu bewältigen. Die Elektrifizierung der Fahrzeugflotten für den Güterstrassenverkehr erfolgt im Vergleich zu Personenwagen deutlich langsamer und bleibt in allen Szenarien unvollständig. Wo Nachfrage nach emissionsfreien Antrieben besteht (SSP0-CH, SSP1-CH, SSP4-CH) werden daher verstärkt auch weitere Technologien eingesetzt, d.h. biogene Treibstoffe und – wenn auch in begrenztem Umfang (max. 32% der SNF-Flotte in SSP4) – wasserstoffbetriebene Lastkraftwagen.⁴¹

Eine ähnliche Entwicklung zeigt der Non-Road-Sektor (ohne Abbildung), dessen Umstellung im Flottenmix gegenüber dem Güterverkehr um einen Zeitschritt (d.h. etwa 15 Jahre) verzögert

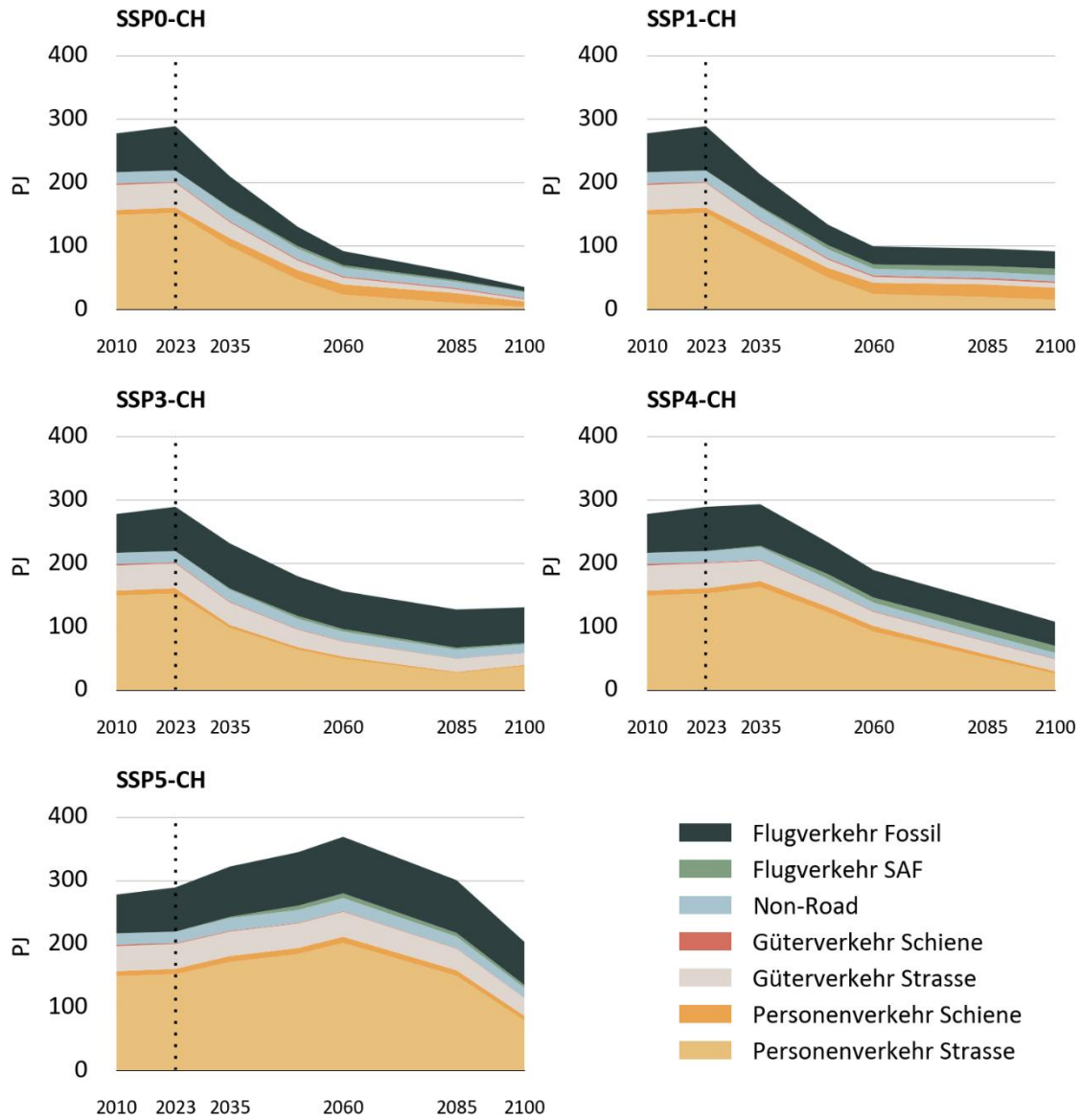
⁴¹ Grundsätzlich sind auch Fahrzeuge, die Wasserstoff mittels Brennstoffzellen (FCEV) in elektrische Energie umwandeln, Elektrofahrzeuge. In unserem Güterverkehrsmodell sind nur batterieelektrische Fahrzeuge als elektrische Fahrzeuge klassifiziert. Wasserstoffbetriebene Fahrzeuge sind eine eigene Kategorie

modelliert ist. Durch die Verzögerung in den technischen Entwicklungen nimmt der Energieverbrauch gesamthaft weniger stark ab als im Personenverkehr. Dadurch erhöht sich gegen Ende des Jahrhunderts der relative Anteil des Güterverkehrs- und Non-Road-Sektors am Energieverbrauch des Verkehrssektors.

4.5.1.3. Endenergieverbrauch

Abbildung 8 zeigt die Entwicklung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor nach Verkehrsmittel pro SSP-CH. In allen fünf Szenarien reduziert sich der Energieverbrauch gesamthaft deutlich um 40% bis 87% zwischen 2023 und 2100. Der Grund ist je nach SSP-CH unterschiedlich: Hauptgrund in vielen SSP-CH ist vor allem, dass Elektromotoren wesentlich energieeffizienter sind als Verbrennermotoren (SSP0-CH, SSP1-CH, SSP4-CH). Weitere Gründe sind Bevölkerungsrückgang und BIP-Rückgang (SSP0-CH, SSP3-CH, SSP5-CH). In SSP0-CH, SSP1-CH und SSP3-CH erfolgt der grösste Teil der Reduktion bis zum Jahr 2060 (-65% bis -71%), während in SSP4-CH die Reduktion in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts noch fortgeführt wird. In SSP5-CH steigt der Energieverbrauch bis 2060 an und sinkt erst dann. Das liegt bei SSP5-CH aber nicht an einem gestiegenen Einsatz von BEV, sondern daran, dass die Verkehrsleistung zurückgeht, wegen abnehmender Wirtschaftsleistung und Bevölkerung am Ende des Jahrhunderts.

Abbildung 8: Energieverbrauch nach Verkehrsmittel pro SSP-CH in Petajoule (PJ).



Hinweis: Der Energieverbrauch des Verkehrsmittels Güterverkehr Schiene ist sehr klein und daher nicht sichtbar. Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch.

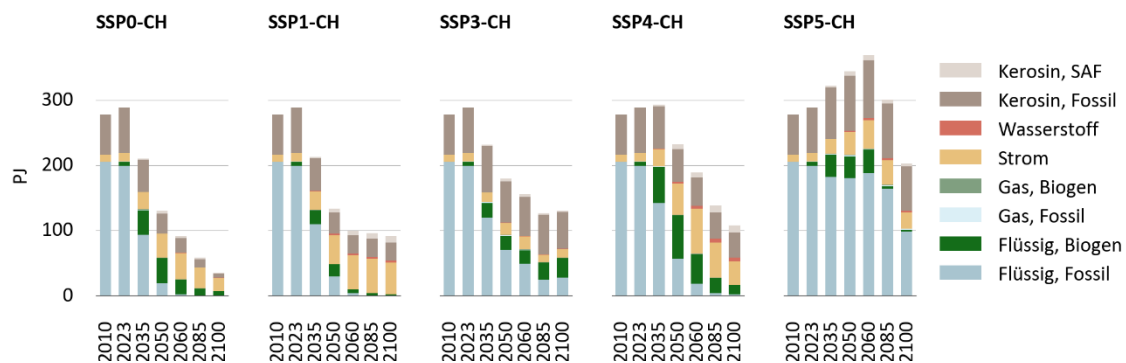
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Aus dem Energieverbrauch pro Energieträger (siehe Abbildung 9) wird deutlich, dass sich die Verteilung in SSP0-CH, SSP1-CH und SSP4-CH hin zu Strom als wichtigstem Energieträger verschiebt. In SSP4-CH entsteht zusätzlich Nachfrage nach biogenen Treibstoffen, um den

Energiebedarf zu decken. In SSP3-CH und SSP5-CH wird der Mix weiterhin von fossilen Energieträgern dominiert. Kerosin für den Flugverkehr bleibt in den meisten SSP-CH auch 2100 relevant.

Abbildung 9: Energieverbrauch nach Energieträger pro SSP-CH in Petajoule (PJ).



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

4.5.1.4. Klimawirkung Flugverkehr

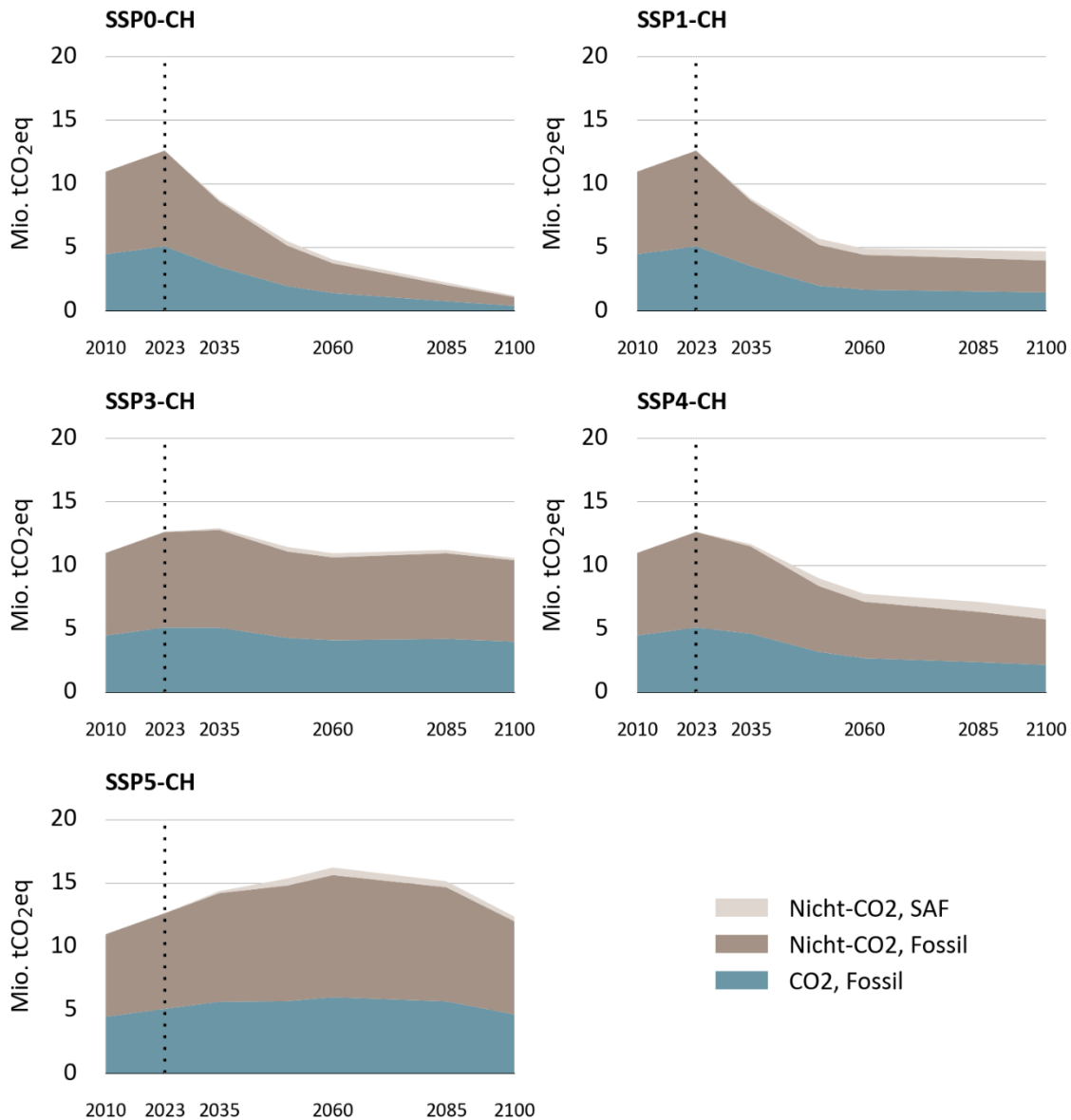
In Abbildung 10 ist die Klimawirkung des Flugverkehrs abgebildet. Per Setzung des Nicht-CO₂-Faktors (siehe Kapitel 4.1.4) ist die Nicht-CO₂ Wirkung immer höher als die Emissionen, die durch die Verbrennung des Kerosins resultieren. Nicht abgebildet sind die Emissionen, die aus SAF oder biogenen Treibstoffen resultieren, da diese als klimaneutral gelten.⁴² Allerdings führt deren Verbrennung trotzdem zu einer Nicht-CO₂ Wirkung. Weil diese bei SAF etwas geringer ist, ist sie in Abbildung 10 separat aufgeführt. Diese Darstellung erlaubt es zusätzlich, die Größenordnung der Nutzung von SAF im Vergleich zu fossilem Kerosin zu erkennen (biogene Treibstoffe werden in einem ähnlichen Umfang genutzt wie SAF).

In SSP0-CH, SSP1-CH und SSP4-CH nehmen die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Kerosin ab, in SSP3-CH und SSP5-CH nehmen sie erst leicht zu und bleiben dann in etwa konstant. Der historische Aufwärtstrend wird somit in keinem SSP-CH langfristig fortgesetzt.⁴³ Die Nicht-CO₂-Wirkung entwickelt sich parallel, wobei sich der Nicht-CO₂-Faktor mit der Zeit etwas reduziert.

⁴² Dies ist nur korrekt, wenn diese Energieträger nachhaltig erzeugt bzw. gewonnen werden. In der Realität ist dies jedoch nicht immer der Fall. Eine Modellierung dieser komplexen Materie ist nicht Teil dieser Studie.

⁴³ Dies war ein Ergebnis aus den Workshops.

Abbildung 10: Klimawirkung Flugverkehr



Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

4.5.1.5. Treibhausgasemissionen bzw. Klimawirkung Verkehr

Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Gesamtergebnisse des Verkehrssektors. Es zeigt sich, dass in allen SSP-CH (ausser SSP5-CH) die Emissionen aus Personenverkehr, Güterverkehr und Non-road wesentlich zurückgehen. Die vier Szenarien unterscheiden sich v.a. in der Geschwindigkeit des Rückgangs. Der zentrale Grund für diese Entwicklung ist die Elektrifizierung des

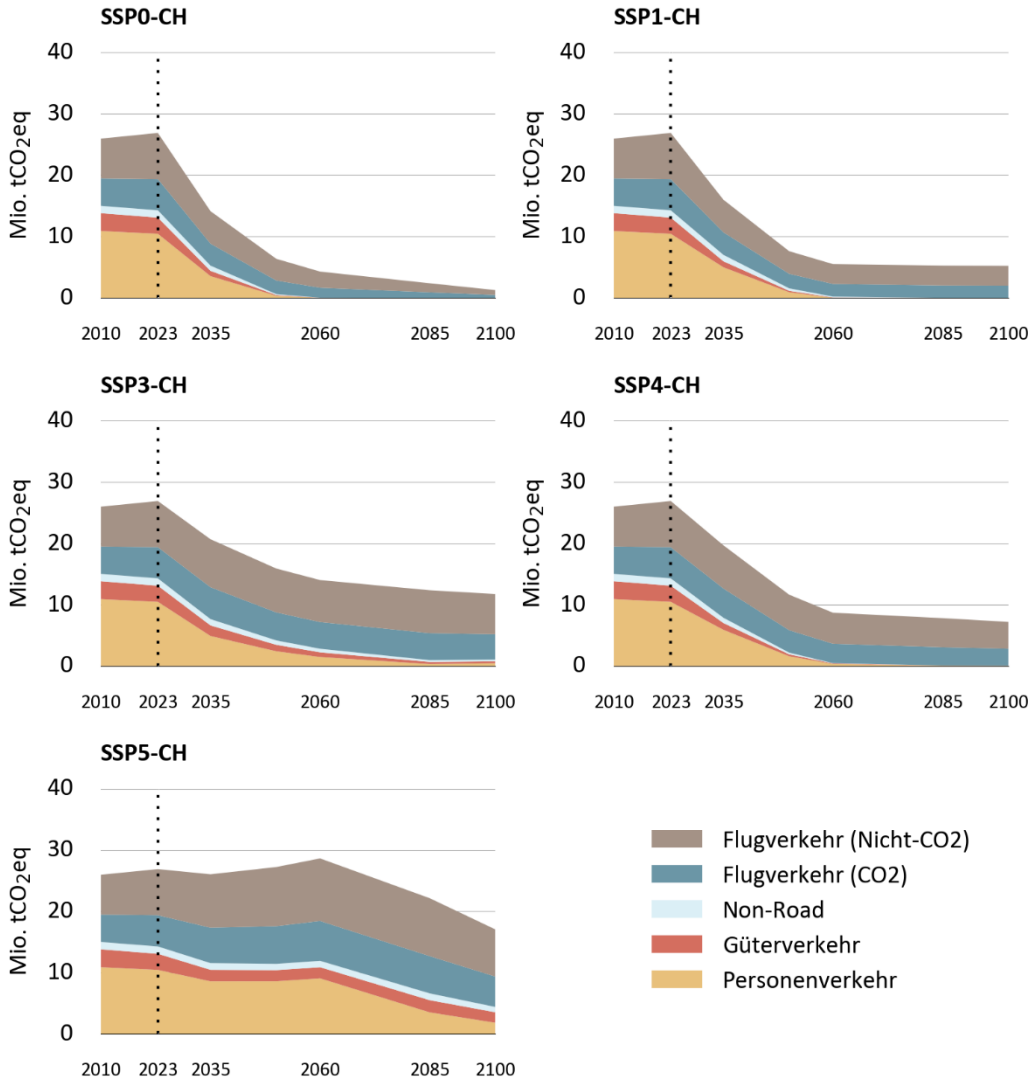
Verkehrs (SSP0-CH, SSP1-CH und SSP4-CH). Hinzu kommen in SSP0-CH, SSP1-CH und SSP3-CH die Reduktion der zurückgelegten Distanz mit motorisiertem Individualverkehr. Für SSP3-CH ist dies der hauptsächliche Grund, da dort der Anteil BEV bei knapp unter 50% stagniert.

In SSP5-CH stagniert der BEV-Anteil bei nur rund 30% und gleichzeitig steigen die mit MIV zurückgelegten Distanzen bis 2060 und sinken dann wieder in etwa auf das Niveau von heute. Daher bleiben die Emissionen bis 2100 auf einem signifikanten Niveau. Der Rückgang ab 2060 begründet sich in dem Rückgang der mit MIV zurückgelegten Distanzen und der höheren Effizienz der Fahrzeuge zu diesem Zeitpunkt.⁴⁴

Die CO₂-Emissionen im Flugverkehr aus der Verbrennung von Kerosin sinken in SSP0-CH, SSP1-CH und SSP4-CH und ändern sich kaum in SSP3-CH und SSP5-CH. Die Nicht-CO₂-Wirkung entwickelt sich per Annahme in etwa parallel (das Verhältnis Nicht-CO₂ zu CO₂ sinkt im Laufe der Zeit in begrenztem Umfang wegen der Verwendung von SAF und der Optimierung des Flugverkehrs bezüglich Nicht-CO₂-Wirkung). Zu erkennen ist, dass in allen Szenarien der Flugverkehr in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts die dominierende Wirkung hat. Weil die Verwendung des Nicht-CO₂-Faktors methodisch umstritten ist, weisen wir die Nicht-CO₂-Wirkung immer separat aus.

⁴⁴ Wir modellieren beispielsweise eine Verbesserung des spezifischen Energieverbrauchs von Benzinfahrzeugen von ca. 30% im Jahr 2100 ggü 2023.

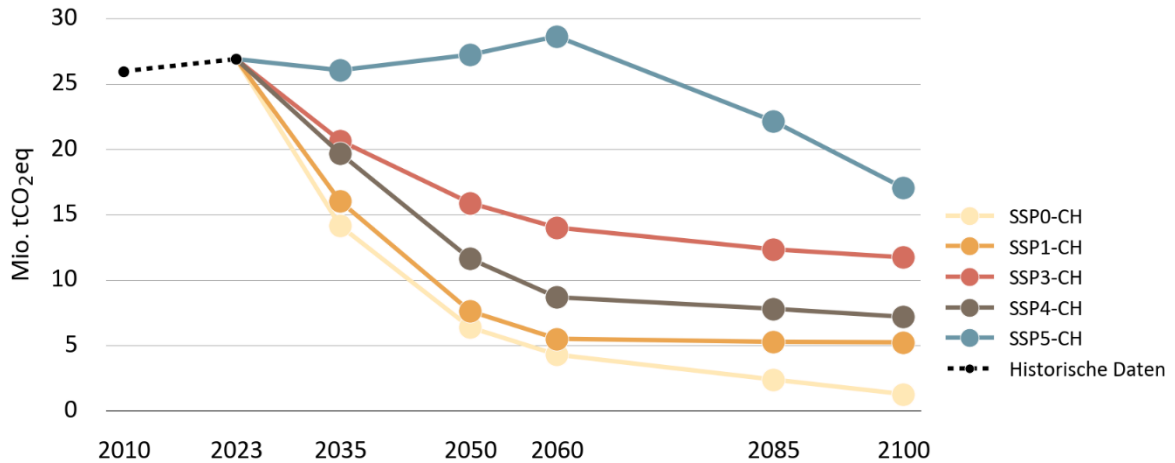
Abbildung 11: Emissionen nach Verkehrsträger pro SSP-CH im Verkehrssektor



Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Abbildung 12: Gesamte Klimawirkung im Verkehrssektor (inklusive Nicht-CO₂)

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

4.5.1.6. Graue Emissionen

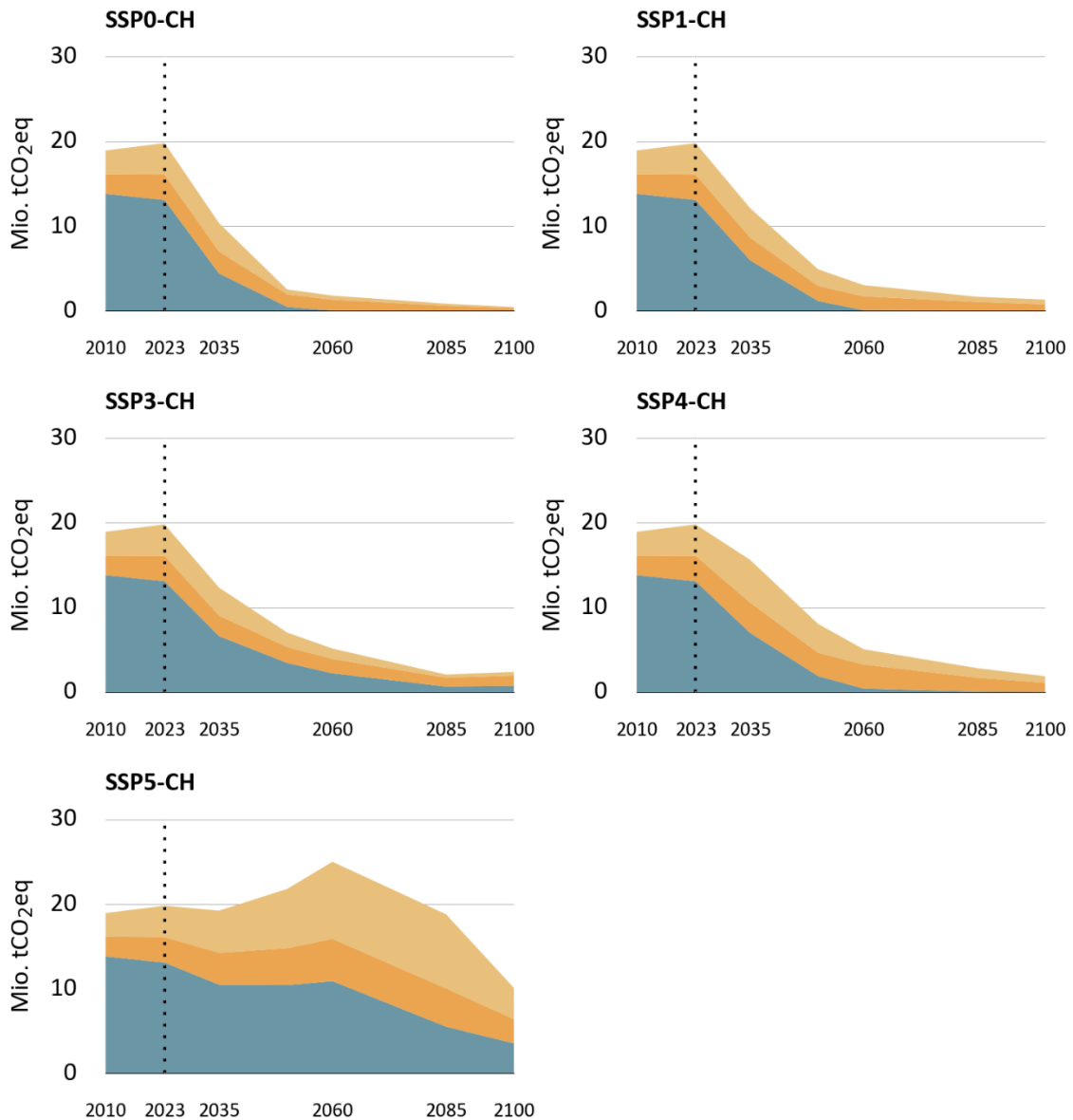
Abbildung 13 vergleicht für den Personen- und Güterverkehr die oben berechneten Betriebsemissionen mit den grauen Emissionen. Die grauen Emissionen setzen sich zusammen aus inländischen Emissionen für Wartung, Fahrzeugentsorgung und Infrastruktur sowie importierten Emissionen aufgrund der Fahrzeugherstellung im Ausland. Der Flugverkehr wird nicht berücksichtigt.

Im Jahr 2023 sind die grauen Emissionen für ein Drittel der gesamten Emissionen verantwortlich. Die grauen Emissionen nehmen in SSP0-CH, SSP1-CH und SSP3-CH ab, aber langsamer als die Betriebsemissionen. Sie gehen nur langsam zurück und sind in vielen Szenarien ab ca. dem Jahr 2060 dominant. Dabei ist eine erhöhte graue Treibhausgaseffizienz je Fahrzeugkilometer⁴⁵ berücksichtigt, die sich je nach SSP-CH unterscheidet. In SSP4-CH nehmen die grauen Emissionen leicht zu und in SSP5-CH nehmen sie sogar zwischenzeitlich erheblich zu. Letzteres ist v.a. auf die hohen Fahrleistungen zurückzuführen, die nicht — wie in den anderen SSP-CH — durch eine sinkende Treibhausgaseffizienz kompensiert werden (in SSP5 bleibt die Treibhausgaseffizienz in etwa gleich). Schlussendlich führt auch in SSP5-CH der Rückgang der Fahrleistung zu einem Rückgang der grauen Emissionen.

Diese Ergebnisse sind hier zur Information gezeigt, fließen aber des Weiteren nicht in die Synthese ein, da sonst eine Doppelzählung mit den Sektoren Importe und Industrie resultieren würde.

⁴⁵ Für Fahrzeugproduktion, Wartung, Fahrzeugentsorgung und Infrastruktur.

Abbildung 13: Betriebsemissionen und graue Emissionen für Personen- und Güterverkehr (ohne Flugverkehr)



Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

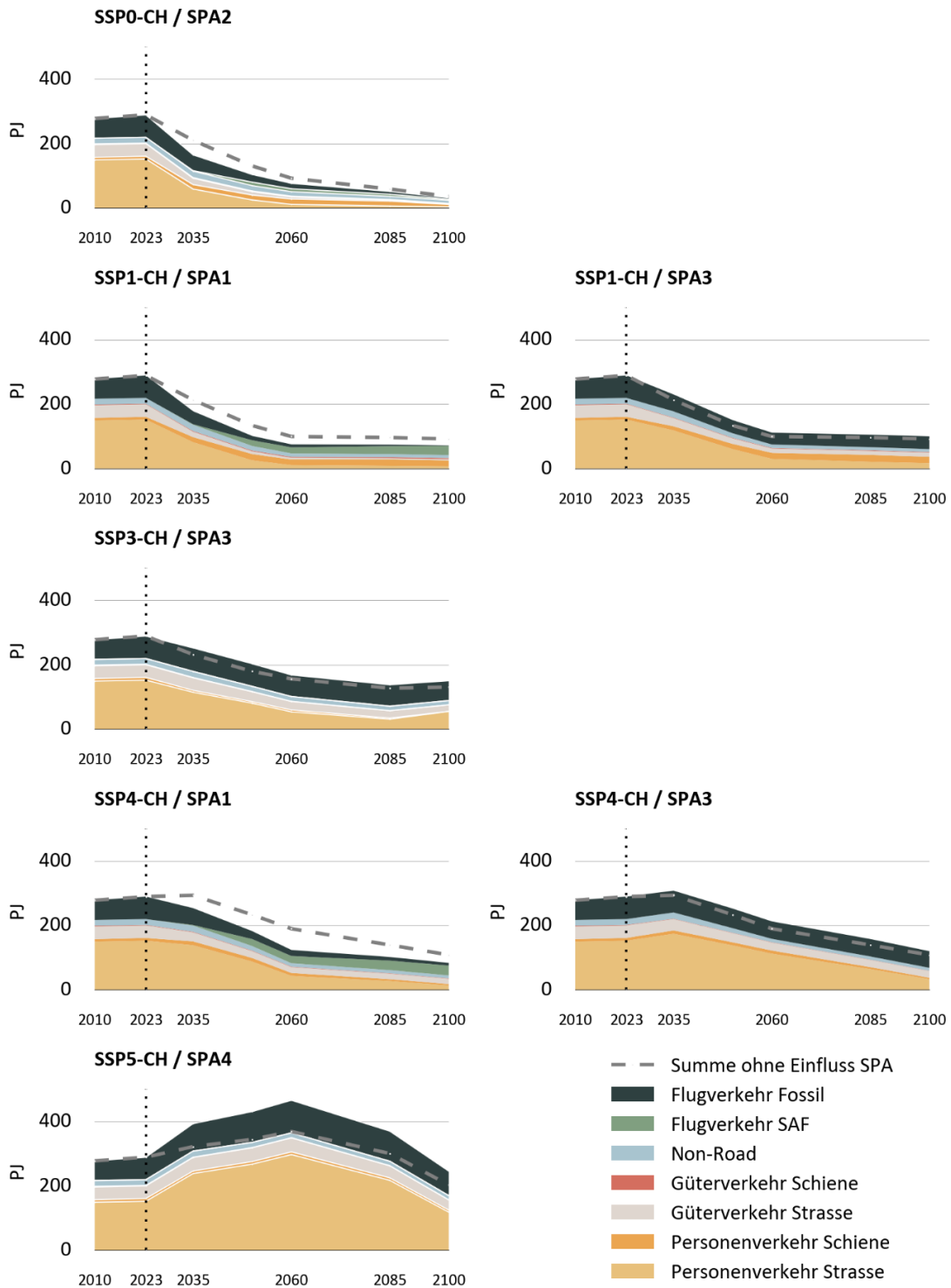
Grafik INFRAS.

4.5.2. Klimapolitische Instrumente (SPA) in Kombination mit SSP-CH

Dieses Kapitel zeigt die Ergebnisse der Modellierung der Treibhausgasemissionen der SSP-CH inklusive der SPA. Abbildung 14 zeigt Energieverbrauch nach Verkehrsmittel. Es ist erkennbar, dass der Energieverbrauch in allen Szenarien (ausser SSP5 / SPA4) zurückgeht. Der Grund ist

die fortschreitende Elektrifizierung, vor allem im Personenverkehr Strasse. Diese ist auch für SSP5 / SPA4 bis Ende des Jahrhunderts der Fall, wobei dort auch die zunehmende Verarmung der Bevölkerung und der Bevölkerungsrückgang eine Rolle spielen. Diese beiden Parameter beeinflussen auch den Flugverkehr, dessen Energieverbrauch in vielen Szenarien – mangels technischer Alternativen – nicht relevant sinkt und somit die relative Bedeutung zunimmt. Der Vergleich mit dem Emissionsverlauf ohne den Einfluss der SPA (gestrichelte Linie) zeigt, dass die politischen Instrumente bestehende Trends verstärken bzw. bei SPA 1 und SPA2 beschleunigen. Die Trends sind jedoch ähnlich.

Abbildung 14: Energieverbrauch nach Verkehrsträger pro SSP-CH inklusive SPA

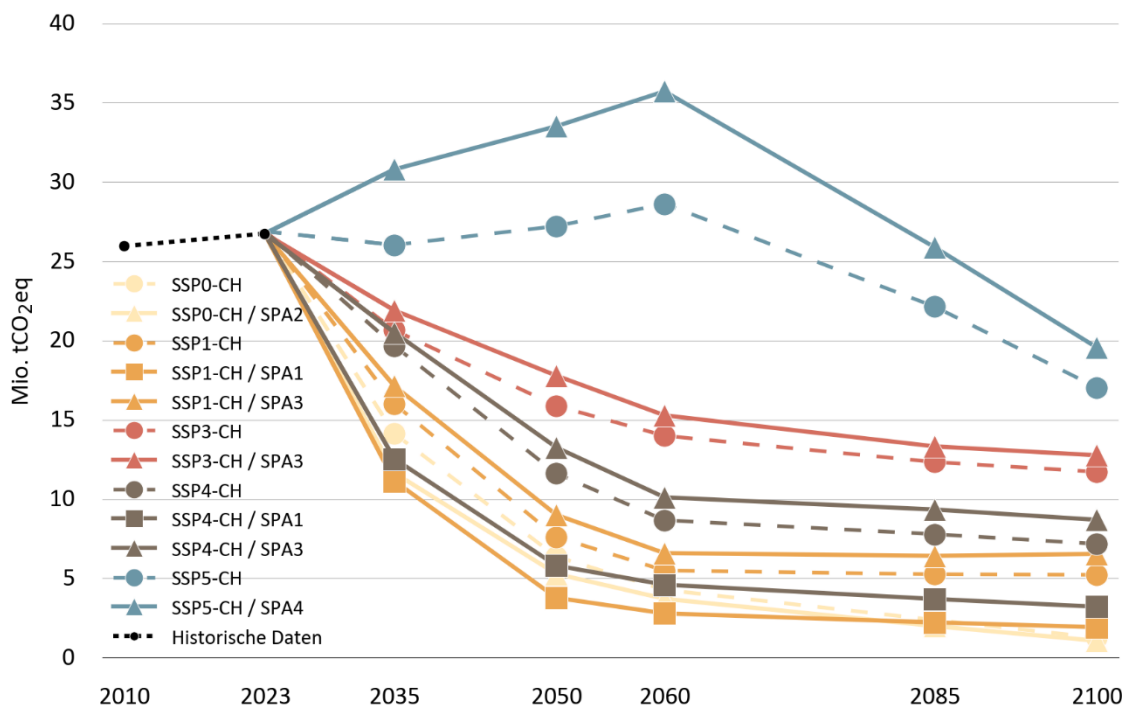


Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch. Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Abbildung 15: Gesamte Emissionen (inkl. Nicht-CO₂-Effekt des Luftverkehrs) der SPPs und der SSP/SPA-Kombinationen im Verkehrssektor in Mio. tCO₂eq. Abbildung 15 zeigt eine Übersicht der Emissionspfade der verschiedenen Szenarien. Im Einklang mit dem Verlauf des Energieverbrauchs und den Emissionsfaktoren der Verkehrsträger nehmen die Emissionen in fast allen Szenarien ab. Sie verbleiben aber aufgrund der Emissionen aus dem Güterverkehr und dem Flugverkehr auf einem erhöhten Level. Klar ersichtlich ist das unterschiedliche Verhalten von SSP5-CH / SPA4, in dem die Emissionen anfangs noch stark zunehmen.

Abbildung 15: Gesamte Emissionen (inkl. Nicht-CO₂-Effekt des Luftverkehrs) der SPPs und der SSP/SPA-Kombinationen im Verkehrssektor in Mio. tCO₂eq.



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

4.6. Kapitelanhang: Wirkungsmatrizen Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

4.6.1. Personenverkehr

Tabelle 5: SSP-Wirkungsmatrix Personenverkehr

Modellparameter Szenarioparameter	Gesamtdistanz (Bevölkerung x Personenkilometer)	Modalsplit (Fuss/Velo/MIV/ÖV)	Flottenmix (Verbrenner/batterie- elektrisch)	Durchschnitts- grösse Fahr- zeug	Anteil biogener Treibstoffe	Verbesserung spez. Energie- verbrauch	Graue Emissio- nen (War- tung/Entsor- gung/Infra- struktur)	Graue Emissio- nen (Emissio- nen Fahrzeug- herstellung)
Wohnbevölkerung	+							
Personenkilometer	+							
Verdichtungslevel	-	- MIV						
BIP pro Kopf		+ MIV		+				
Anteil BEV am Flottenmix		+ E-Velo	+ batterie- elektrisch					
Umweltbewusst- sein		- MIV		-				
Innovationstätig- keit						+	-	-
Produktnutzungs- dauer						-		-
Anteil erneuerba- rer am Gesamtmix					+		-	-

Ein «+»/«-» bedeutet eine positive/negative Elastizität zwischen Szenario- und Modellparameter. Graue Emissionen sind im Modell nicht berücksichtigt, werden aber zur Veranschaulichung modelliert.

Tabelle INFRAS.

4.6.2. Güterverkehr

Tabelle 6: SSP-Wirkungsmatrix Güterverkehr

Modellparameter	Verkehrsleistung	Modalsplit (LNF/SNF/Güterzug)	Flottenmix (Verbrenner/batterieelektrisch/Wasserstoff)	Verbesserung spez. Energieverbrauch	Anteil biogener Treibstoffe	Spez. Graue Emissionen (Wartung/Entsorgung/Infrastruktur)	Spez. Emissionen Fahrzeugherstellung
Szenarioparameter							
Güterverkehr	+						
Anteil BEV am Flottenmix			+ batterieelektrisch				
Verbreitung Wasserstoff als Energieträger			+ Wasserstoffantriebe	+ für Wasserstoffantriebe			
Umweltbewusstsein		+ Güterzug					
Innovationstätigkeit				+		-	-
Produktnutzungsdauer				-			-
Anteil erneuerbarer am Gesamtmix					+	-	-

Ein «+»/«-» bedeutet eine positive/negative Elastizität zwischen Szenario- und Modellparameter.

Tabelle INFRAS.

4.6.3. Non-Road

Tabelle 7: SSP-Wirkungsmatrix für Non-Road.

Modellparameter	Bestand pro Maschinenkategorie	Flottenmix	Verbesserung Energieverbrauch pro Maschine	Anteil biogener Treibstoffe
Szenarioparameter				
Wohnbevölkerung	+ ⁴⁶			
BIP pro Kopf	+			
Fläche Ackerbau	+ für landw. Maschinen			
Anteil BEV am Flottenmix		+ batterie-elektrisch		
Verbreitung Wasserstoff als Energieträger		+ Wasserstoffantriebe		
Innovationstätigkeit			+	
Produktnutzungsdauer			-	
Anteil Erneuerbarer am Gesamtmix				+

Ein «+»/«-» bedeutet eine positive/negative Elastizität zwischen Szenario- und Modellparameter.

Tabelle INFRAS.

⁴⁶ Ausgenommen sind die landw. Maschinen, deren Bestand sich abhängig von der Fläche für Ackerbau entwickelt.

4.6.4. Flugverkehr

Tabelle 8: SSP-Wirkungsmatrix Flugverkehr

Modellparameter	Anzahl Passagiere	Verbesserung spezifischer Energieverbrauch	Anteil biogener Treibstoffe	Anteil PtKerosin	Nicht-CO ₂ -Effekte
Szenarioparameter					
Wohnbevölkerung	+				
BIP pro Kopf	+			+	
Umweltbewusstsein	-		+	+	
Innovationstätigkeit		+	+	+	-
Anteil Erneuerbarer am Gesamt-mix			+	+	

Ein «+»/«-» bedeutet eine positive/negative Elastizität zwischen Szenario- und Modellparameter

Tabelle INFRAS.

4.7. Kapitelanhang: Klimapolitische Instrumente (SPA) und deren Wirkung

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Instrumente der SPA und deren Wirkung im Sektor Verkehr. Gezeigt sind die wichtigsten politischen Instrumente (erste Spalte) und deren Einführung (zweite Spalte). In den meisten Fällen modellieren wir die Wirkung so, dass das Instrument erst im nächsten modellierten Zeitschritt nach der Einführung seine volle Wirkung entfaltet. Durch die Interpolation zwischen den Modellschritten findet ein «phase-in» statt. Ausnahmen sind z.B. Betriebsverbote, die sofort wirken. Spalte drei zeigt die Kategorie des Instruments (Autorität, Finanzen, Strategie) und Spalte vier den Modellparameter, der von dem Instrument beeinflusst wird. Da es zu komplex wäre, die Wirkung aller Instrumente einzeln zu modellieren, zeigt die letzte Spalte die von uns abgeschätzte Gesamtwirkung des Instrumentenbündels auf die Modellparameter. Diese werden schlussendlich im Modell implementiert, um die Wirkung des SPA zu modellieren.

Tabelle 9: SPA Sektor Verkehr: Instrumente und Wirkung

Instrumente	Einführung	Instrumenten- typ	Wirkung	Gesamtwirkung SPA (maximal; in % oder PP*)
SPA0 – Status Quo				
Personenverkehr				
1. Fahrzeugsteuern (z.B. Kfz-Steuer, Mineralölsteuer)		1. Finanzen	1. Personenkilometer, Modalsplit, Flottenmix	-
2. Fahrkostenabzug		2. Finanzen	2. Personenkilometer, Modalsplit	
3. Umsetzung des nationalen Veloweggesetz		3. Strategie	3. Modalsplit	
4. Emissionsstandards für Fahrzeuge		4. Autorität	4. Flottenmix	
Güterverkehr / Non-Road				
4. Förderung Modalshift zur Schiene (z.B. Betriebsbeiträge für alpenquerenden Schienengüterverkehr)		4. Finanzen	4. Modalsplit	-
Flugverkehr				
5. Einführung und Steigerung von SAF-Quoten (tief im Status Quo, nicht modelliert)		-	-	-

Instrumente	Einführung	Instrumenten- typ	Wirkung	Gesamtwirkung SPA (maximal; in % oder PP*)
SPA1 – Grüner Staat				
Personenverkehr				
1. CO ₂ -Abgabe auf fossile Treibstoffe	1. ab sofort	1. Finanzen	1. Flottenmix, Personenkilometer, Modalsplit	Personenkilometer: starke Abnahme (max. um -20%) Modalsplit**: starke Abnahme Anteil MIV (max. um -20PP) Flottenmix**: starke Abnahme Verbrenner (bis auf 0% durch Verbot)
2. Verbot für den Betrieb von Verbrennermotoren in PW	2. 2050	2. Autorität	2. Flottenmix, Personenkilometer, Modalsplit	
3. Höhere Subventionen Ausbau Ladeinfrastruktur	3. ab sofort	3. Finanzen	3. Flottenmix	
4. Abschaffung des Fahrkostenabzugs	4. ab sofort	4. Autorität	4. Personenkilometer, Modalsplit	
5. Stadtplanung: Umsetzung der 15-Minuten-Stadt	5. 2060	5. Strategie	5. Personenkilometer, Modalsplit	
6. Bepreisung von Arbeitswegen durch Individualverkehr	6. 2060	6. Autorität	6. Personenkilometer	
7. Reduktion der Ticketpreise im ÖV	7. ab sofort	7. Finanzen	7. Modalsplit	
8. Ausbau Angebot ÖV (Erhöhung Takt, Angebot im ländlichen Raum)	8. ab sofort	8. Strategie	8. Modalsplit	
9. Moratorium Strassenausbau (nur Unterhalt)	9. ab sofort	9. Autorität	9. Modalsplit, Graue Emissionen	
Güterverkehr / Non-Road				
1. und 9. Wie Personenverkehr	1. 2035			Modalsplit: Zunahme Anteil Schiene (max. um +10%) Flottenmix: starke Abnahme Verbrenner (bis auf 0% durch Verbot) Emissionsfaktor: Zunahme Anteil biogener Treibstoffe (max. 25PP)
2. Verbot für den Betrieb von Verbrennermotor LKW	2. 2060			
10. Starke Förderung für biogene Treibstoffe	9.-11. ab sofort	10. Finanzen	10. Emissionsfaktor (Anteil erneuerbar)	
11. Höhere Förderung Modalshift zur Schiene (z.B. Ausbau Betriebsbeiträge für alpenquerenden Schienengüterverkehr)		11. Finanzen	11. Modalsplit	

Instrumente	Einführung	Instrumenten- typ	Wirkung	Gesamtwirkung SPA (maximal; in % oder PP*)
Flugverkehr				
1. wie Personenverkehr	1. ab sofort			Anzahl Passagiere: starke Abnahme Emissionsfaktor fossil: Zunahme Anteil SAF auf 70% in 2050 ⁴⁷ Nicht-CO₂-Faktor: SAF reduziert Faktor um 25%; Weitere Massnahmen um zusätzlich 25%
12. Erhöhung der verpflichtenden Beimischquote für SAF	12. 2035	12. Autorität	12. Emissionsfaktor (Anteil SAF)	
13. Verbot für nationale Flüge	13., 14. 2050	13. Autorität	13. Anzahl Passagiere	
14. Festes Kontingent an Flug-km pro Passagier		14. Autorität	14. Anzahl Passagiere	
15. Vorgaben für verstärkte Flugroutenanpassungen und Triebwerksspezifikationen, um die Nicht-CO ₂ -Effekte zu reduzieren	15. 2035	15. Autorität	15. Nicht-CO ₂ -Faktor	
SPA2 – Ökologische Republik				
Personenverkehr				
	ab sofort			Personenkilometer: starke Abnahme (-20%) Modalsplit: starke Abnahme Anteil MIV (-10PP) Besetzungsgrad: Zunahme bei MIV (+25PP) Flottenmix: Zunahme BEV (+10PP)
1. Subvention Ausbau Ladeinfrastruktur		1. Finanzen	1. Flottenmix	
2. Raumplanung: Anreize für die 15-Minuten-Stadt		2. Strategie	2. Personenkilometer, Modalsplit	
3. Abschaffung der Pendlerpauschale		3. Autorität	3. Personenkilometer, Modalsplit	
4. Förderung Fuss- und Veloverkehr (z.B. verstärkter Ausbau Velowege)		4. Strategie	4. Modalsplit	
5. Ausbau Angebot ÖV (Erhöhung Takt, Angebot im ländlichen Raum)		5. Strategie	5. Modalsplit	
6. Förderung von Fahrgemeinschaften (Sharing, Pooling)		6. Strategie	6. Besetzungsgrad MIV	
7. Moratorium Strassenausbau (nur noch Unterhalt)		7. Strategie	7. Modalsplit, Graue Emissionen	
Güterverkehr / Non-Road				
	ab sofort			Modalsplit: starke Zunahme Anteil Schiene (+10PP) Flottenmix: Zunahme BEV (+10PP) Emissionsfaktor: Zunahme Anteil biogener Treibstoffe (+10PP)
1. wie Personenverkehr				
8. Förderung für biogene Treibstoffe		8. Finanzen	8. Emissionsfaktor (Anteil erneuerbar)	
9. Förderung Modalshift zur Schiene (z.B. Ausbau Betriebsbeiträge für alpenquerenden Schienengüterverkehr)		9. Autorität	9. Modalsplit	

⁴⁷ Analog zu Vorgaben EU per 1.1.2025.

Instrumente	Einführung	Instrumenten- typ	Wirkung	Gesamtwirkung SPA (maximal; in % oder PP*)
Flugverkehr 10. Erhöhung der verpflichtenden Beimisch- quote für SAF	ab sofort	10. Autorität	10. Emissionsfaktor (Anteil SAF) und Nicht-CO ₂ -Faktor	Emissionsfaktor: Zunahme An- teil SAF auf 35% in 2050 Nicht-CO₂-Faktor: SAF reduziert Faktor um 25%
SPA3 – Ordoliberaler Staat				
Personenverkehr 1. Reduktion der Fahrzeugsteuern (z.B. Maut, Kfz-Steuer, Mineralölsteuer) 2. Abschaffung der Pendlerpauschale	ab sofort	1. Autorität 2. Autorität	1. Personenkilometer, Modalsplit, Flottenmix 2. Personenkilometer, Modalsplit	Personenkilometer: leichte Zu- nahme (+5%) Modalsplit: Zunahme Anteil MIV (max. um +10PP) Flottenmix: Zunahme Anteil Verbrenner (max. um +5%)
Güterverkehr / Non-Road 1. wie Personenverkehr 3. Reduktion der Förderung Modalshift zur Schiene (z.B. Abbau Betriebsbeiträge für alpen- querenden Schienengüterverkehr)	ab sofort	3. Finanzen	3. Modalsplit	Modalsplit: starke Abnahme Anteil Schiene (max. um -10%) Flottenmix: Zunahme Anteil Verbrenner (max. um +5%)
Flugverkehr 4. Abschaffung der verpflichtenden Beimisch- quote für SAF 5. Förderung Ausbau der Flughäfen	ab sofort	4. Authority 5. Strategie	4. Emissionsfaktor (Anteil erneuer- bar) 5. Anzahl Passagiere	Emissionsfaktor: Abnahme An- teil SAF (-100%) Anzahl Passagiere: Zunahme (+5%)
SPA4 – Kompensierender Staat				
Personenverkehr 1. Starke Reduktion der Fahrzeugsteuern (z.B. Maut, Kfz-Steuer, Mineralölsteuer) 2. Einführung Ersatzabgabe für E-Fahrzeuge 3. Finanzielle Unterstützung MIV (z.B. für Auto- kauf) 4. Abbau von Radwegen 5. Verstärkter Strassenausbau	ab sofort	1. Autorität 2. Finanzen 3. Finanzen 4. Strategie 5. Strategie	1. Personenkilometer, Modalsplit 2. Flottenmix 3. Modalsplit 4. Modalsplit 5. Personenkilometer, Modalsplit	Personenkilometer: starke Zu- nahme (+20%) Modalsplit: starke Zunahme Anteil MIV (+10PP) Flottenmix: Abnahme Anteil BEV (-10PP)

Instrumente	Einführung	Instrumenten- typ	Wirkung	Gesamtwirkung SPA (maximal; in % oder PP*)
Güterverkehr / Non-Road 1.,2.,4. Wie Personenverkehr	ab sofort	Wie Personen- verkehr	Wie Personenverkehr	Modalsplit: Zunahme Anteil Strasse (+5PP) Flottenmix: Abnahme Anteil BEV (max. um -10PP)
Flugverkehr 5. Abschaffung der verpflichtenden Beimisch- quote für SAF 6. Förderung Ausbau der Flughäfen	ab sofort	5. Autorität 6. Strategie	5. Emissionsfaktor (Anteil erneuer- bar) 6. Anzahl Passagiere	Emissionsfaktor: Abnahme An- teil SAF (-100%) Anzahl Passagiere: Zunahme (+5%)

* PP = Prozentpunkt

Tabelle INFRAS.

5. Gebäude

Die Berechnung der Emissionen im Sektor Gebäude erfolgt bottom-up, basierend auf Aktivitätsdaten (beheizte Fläche), spezifischen Energieverbräuchen und Emissionsfaktoren. Das Modell ermittelt die Werte für die Jahre 2023, 2035, 2050, 2060, 2085 und 2100. Zwischenjahre werden interpoliert. Für jedes Jahr wird eine Basisentwicklung vorgegeben, welche dann durch die sozioökonomischen Szenarien (SSP-CH) und die politischen Instrumentenbündel (SPA) beeinflusst wird. Die Auswirkungen der SSP-CH und SPA auf die Emissionen werden mittels einer Wirkungsmatrix berücksichtigt (für Details siehe Kapitel 3.2). Angesichts der Vielzahl an Informationen aus den SSP-CH und SPA, sind diverse Annahmen und Vereinfachungen erforderlich. Im Folgenden werden die Struktur des Modells sowie die einzelnen Schritte zur Berechnung der Emissionen erläutert.

Die einzelnen Berechnungsschritte des Modells bzw. die Modellparameter sind in Kapitel 5.1 beschrieben. In Kapitel 5.2 sind Quellen aufgeführt, die wir — wo nötig und vorhanden— für die Basisentwicklungen bzw. die Ausgangswerte als Grundlage der SSP-CH sowie für Wirkungsabschätzungen verwendet haben. Kapitel 5.3 beschreibt die SPA und Kapitel 5.4 zeigt, wie die Szenarioparameter der SSP-CH die Entwicklungen der Treibhausgasemissionen der SSP-CH mittels einer Wirkungsmatrix beeinflussen. Die Resultate sind schliesslich in Kapitel 5.5 dargestellt.

5.1. Modellbeschreibung

Dieses Kapitel beschreibt die Modellierung der Emissionen des Sektors Gebäude auf Grundlage der Modellparameter. Änderung der Modellparameter, hervorgerufen durch den Einfluss der Szenarioparameter aus den SSP-CH bzw. durch den Einfluss der SPA, sind in diesem Kapitel noch nicht relevant. Dieser Schritt ist in Kap. 2.4 beschrieben.

Der Fokus der Modellierung sind die Betriebsemissionen des Gebäudeparks. Die Betriebsemissionen umfassen alle Emissionen, die während der Nutzphase des Gebäudes entstehen, und können in zwei Verbrauchskategorien aufgeteilt werden:

- Erzeugung von Raumwärme
- Erzeugung von Warmwasser

Das Modell berechnet zudem:

- Stromverbrauch im Gebäudesektor: Die Emissionen für die Stromerzeugung werden dem Sektor Energie zugeteilt. Der Energieverbrauch wird aber im Sektor Gebäude berechnet, differenziert nach
 - Stromverbrauch für Raumwärme und Warmwasser

- Stromverbrauch für Kühlung, Beleuchtung und Geräte
- Fernwärmebedarf: Die Emissionen der Fernwärme werden – wie jene der Stromerzeugung – dem Energiesektor zugeteilt. Der Energieverbrauch wird jedoch im Gebäudesektor berechnet.
- Grauen Emissionen: Diese werden nur zur Information modelliert. Das heisst, die Ergebnisse fließen nicht in die weitere Betrachtung ein.

5.1.1. Emissionen Raumwärme

Entwicklung Gebäudefläche

Die Entwicklung der Emissionen im Gebäudesektor ist massgeblich von der Entwicklung der Gebäudefläche abhängig. Die Gebäudefläche wird durch die Bevölkerungszahl sowie den Wohnflächenbedarf und Dienstleistungsflächenbedarf⁴⁸ pro Kopf bestimmt. Somit ergibt sich die totale Fläche für jedes Jahr t wie folgt:

$$A_{tot,t} = B_t * (a_{Wohn,t} + a_{D,t})$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für das Jahr 2023)
$A_{tot,t}$	Totale Gebäudefläche im Jahr t	m ²	592'766'000
B_t	Wohnbevölkerung	Personen	8'624'000
$a_{Wohn,t}$	Wohnfläche pro Person	m ² /Person	46.5
$a_{D,t}$	Dienstleistungsfläche pro Person	m ² /Person	22.2

Die Gebäudefläche ist in die Kategorien «Alt», «Saniert» und «Neubau» aufgeteilt, da diese unterschiedliche spezifische Wärmeverbräuche pro Jahr [kWh/m²a] aufweisen.

- «Gebäudefläche alt» (A_{alt}) sind Gebäude, die vor 2010 gebaut wurden. Im Startjahr des Modells gehören die bereits sanierten Gebäude ebenfalls dieser Kategorie an. Dies ist im spezifischen Wärmeverbrauch von A_{alt} berücksichtigt. Der Parameter A_{alt} nimmt ab, wenn Sanierungen, Ersatzbauten und Leerstände Altbauflächen ersetzen. Falls es durch einen Bevölkerungsrückgang zu einer Abnahme an genutzter Fläche kommt, so gehen wir im Modell davon aus, dass zuerst Gebäude der Kategorie Alt verlassen werden.
- «Neubauflächen» (A_{neubau}) sind Gebäude, die nach 2010 gebaut wurden. Die Fläche nimmt durch Neubauten oder Ersatzneubauten zu.

⁴⁸ Da die Datenquelle (siehe Kapitel 5.2) die Flächen für Industrie und Dienstleistungen nur aggregiert angibt, mussten wir eine Annahme zum Anteil der Dienstleistungsfläche am Total treffen. Infolge haben wir den Anteilsfaktor 0.65 verwendet, um die Dienstleistungsfläche zu erhalten.

- «Gebäudefläche saniert» ($A_{saniert}$) sind Gebäude, die nach Beginn des Modellierungszeitraums saniert werden. Die sanierte Fläche nimmt zu, wenn Altbauten saniert werden.

Im Normalfall⁴⁹ sind die Gebäudekategorien wie folgt berechnet:

$$A_{alt,t} = A_{alt,t-1} - a_{saniert,t} - a_{ersatz,t} - a_{leer,t}$$

$$A_{modern,t} = A_{neubau,t-1} + a_{ersatz,t} + a_{neu,t}$$

$$A_{saniert,t} = A_{saniert,t-1} + a_{saniert,t}$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für das Jahr 2035)
$A_{alt,t}$	Totale Fläche der Gebäudekategorie alt zum Zeitpunkt t	m ²	398.1.6 Mio.
$A_{modern,t}$	Totale Fläche der Gebäudekategorie Neubau zum Zeitpunkt t	m ²	108.3 Mio.
$A_{saniert,t}$	Totale Fläche der Gebäudekategorie saniert zum Zeitpunkt t	m ²	132.9 Mio.
$a_{saniert,t}$	Flächenänderung durch Sanierungen im Zeitraum $t - 1$ bis t	m ²	132.9 Mio.
$a_{ersatz,t}$	Flächenänderung durch Ersatzneubauten im Zeitraum $t - 1$ bis t	m ²	8.4 Mio.
$a_{leer,t}$	Flächenänderung durch Leerstand Zeitraum $t - 1$ bis t	m ²	0
$a_{neu,t}$	Flächenänderung durch Neubau im Zeitraum $t - 1$ bis t	m ²	46.5 Mio.

Zentral für die Ergebnisse ist die Annahme zur Sanierungsrate, die den jährlichen Anteil der erneuerten Fläche im Altbaubestand beschreibt.⁵⁰ Für das Startjahr wird eine Rate von 1.5 % pro Jahr angenommen, gestützt auf eine BFE-Publikation (2024)⁵¹. Je nach SSP-CH-Szenario nimmt die Sanierungsrate in den Folgejahren zu oder ab.

Die Energieverbräuche der Kühl- und Lüftungstechnik, der Beleuchtung und der Geräte berechnen sich ebenfalls über die Gebäudefläche, allerdings unterscheiden wir hier nicht zwischen den Gebäudekategorien. Der Warmwasserverbrauch ist nicht von der Gebäudefläche abhängig, sondern nur von der Bevölkerungsanzahl.

Raumwärmebedarf

Die drei Gebäudekategorien unterscheiden sich durch ihre spezifischen Wärmeverbräuche (Nutzenergie). Deren Ausgangswerte sind: Alt = 103 kWh/m²a, Saniert = 62 kWh/m²a, Neubau = 40 kWh/m²a. Diese Werte reduzieren sich in der Basisentwicklung, weil die Heizgradtage zurückgehen (gemäss dem Klimawandelszenario RCP 4.5). Durch eine Sanierung ändert sich die

⁴⁹ Die jährlich sanierte Fläche wird berechnet, indem die Sanierungsrate auf die Gesamtfläche der Kategorien Alt und Saniert angewendet wird. Dadurch bleibt das jährliche Sanierungsvolumen konstant, auch bei wachsendem Anteil bereits sanierter Gebäude.

⁵⁰ Um die jährlich sanierte Fläche zu berechnen, wenden wir die Sanierungsrate (in %) auf das Flächentotal der Gebäudekategorien «Alt» und «Saniert» an. So bleibt die Sanierungsaktivität konstant, auch wenn bereits ein Grossteil der Fläche saniert wurde.

⁵¹ [Das Gebäudeprogramm zeigt Wirkung: Sanierungsraten steigen - Energiehub Gebäude](#)

Kategorie und somit der spezifische Wärmebedarf dieser Gebäudefläche von dem Wert Alt auf den Wert Saniert (des entsprechenden Zeitschritts). Diese Änderung entspricht der Sanierungstiefe. Wir gehen davon aus, dass der Gebäudebestand instandgehalten wird. Das heisst, dass es im Basisszenario zu keiner Erhöhung des spezifischen Raumwärmebedarfs über die Zeit aufgrund von Verfall kommt.

Wärmeerzeugungstechnologien

Wärmeerzeugungstechnologien liefern die Energie, um den Raumwärmeverbrauch zu decken. Wir unterscheiden zwischen den folgenden Technologien (bzw. den zugrundeliegenden Energieträgern): Heizölkessel (Heizöl), Gaskessel (Gas), Wärmepumpen (Strom), Widerstandsheizungen (Strom), Fernwärme (Fernwärmemix) und Erneuerbare (Holz, Biogas und Solarthermie). Für Warmwasser (siehe Kapitel 5.1.2) gilt eine analoge Aufteilung.

Aus der Datengrundlage lässt sich nur eine Verteilung der Technologien für die totale Gebäudefläche auslesen. Für unser Modell ist aber eine Unterscheidung in verschiedene Gebäudekategorien (Alt, Saniert, Neubau) nötig, um die benötigte Wärmeenergie korrekt auf die Wärmeerzeugungstechnologien aufzuteilen. Daher haben wir die Wärmeerzeugungstechnologien auf die Gebäudekategorien aufgeteilt.⁵²

Der Wirkungsgrad der jeweiligen Heiztechnologie berücksichtigt Erzeugungsverluste und Verteilungsverluste, um von der Nutzenergie (Raumwärmeverbrauch) auf die Endenergie umzurechnen.⁵³ Die Endenergie pro Energieträger (der jeweils zugrundeliegenden Wärmeerzeugungstechnologie) und Gebäudekategorie berechnet sich somit gemäss folgender Formel:

$$E_{ET,WET} = \frac{P_{GK,ET} * SW_{GK} * A_{GK}}{WG_{ET}}$$

⁵² Beispielsweise finden sich Ölheizungen eher in Altbauten als in sanierten Gebäuden oder Neubauten. Infolgedessen wird Heizöl als Energieträger zur Deckung des Wärmeenergieverbrauchs von Altbauten bevorzugt. Bei der Zuteilung der Energieträger auf die Energieverbräuche der Gebäudekategorien werden zunächst solche Prioritäten berücksichtigt, und anschliessend eine Normierung auf 100% durchgeführt.

⁵³ Die Nutzenergie ist jene Energiemenge, die zum vorgesehenen Verwendungszweck zur Verfügung steht. Im Falle der Raumwärme ist die Nutzenergie z.B. die von einem Radiator abgegebene Wärmeenergie. Die Endenergie ist die Energiemenge, die eingesetzt wird, um die Nutzenergie zur Verfügung zu stellen. Im Falle der Raumwärme ist die Endenergie z.B. der Brennwert des verbrannten Erdgases.

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für das Jahr 2023)
$E_{GK,WET}$	Wärmeverbrauch (Endenergie) je Gebäudekategorie GK und Energieträger ET	TWh	14.6 für Gaskessel in alten Gebäuden
$P_{GK,WET}$	Anteil des Energieträgers ET am Wärmebedarf der Gebäudekategorie GK	%	25.85% für Gaskessel in alten Gebäuden
SW_{GK}	Spezifischer Wärmebedarf der Gebäudekategorie GK	kWh/m ²	103 für alte Gebäude
A_{GK}	Fläche der Gebäudekategorie GK	m ²	539 Mio. für alte Gebäude
WG_{ET}	Wirkungsgrad des Energieträgers ET (einer Wärmeerzeugungstechnologie)	-	0.93 für Erdgas Raumwärme

Emissionen

Die Emissionen für die Bereitstellung der Raumwärme ergeben sich schlussendlich aus der Endenergiemenge und dem Emissionsfaktor des jeweiligen Energieträgers. Für den Gebäudesektor sind nur die fossilen Emissionen der lokalen Gebäudeheizungen relevant. Die Emissionen aufgrund der Nutzung von Strom und Fernwärme sind im Energiesektor aufgeführt.

$$E_{WET} = \sum_{ET} \sum_{GK} EV_{GK,ET} * EF_{ET}$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für das Jahr 2023)
E_{WET}	Betriebsemissionen der Wärmeerzeugungstechnologie WET	Mt CO ₂	2.8 für Erdgas Raumwärme
$EV_{VK,ET}$	Nutzenergieverbrauch des Energieträgers ET in der Gebäudekategorie GK	TWh	13.1 für Erdgas Raumwärme
$WG_{VK,ET}$	Wirkungsgrad des Energieträgers ET in der Gebäudekategorie GK	-	0.93 für Erdgas Raumwärme
EF_{ET}	Emissionsfaktor des Energieträgers ET	kg _{CO2} /kWh	0.201 für Erdgas

Box: Fernwärme und Strom für Raumwärme

Fernwärme ist eine Wärmeerzeugungstechnologie, bei der Wärme einer Erzeugungstechnologie (z.B. Abwärme Industrie, Abwärme KVA, Holzheizkraftwerk, Grosswärmepumpe) mittels Warmwasserleitungen zu dem Gebäude geliefert wird. Der Anteil an Fernwärme und somit der Fernwärmebedarf werden im Sektor Gebäudemodell modelliert. Der Mix der Fernwärmeerzeugungstechnologie wird hingegen im Sektor Energiebereitstellung modelliert.

Strom für Raumwärme: Wärme kann mit elektrischer Energie entweder durch Widerstandsheizungen oder durch Wärmepumpen bereitgestellt werden. Während Widerstandsheizungen elektrische Energie direkt in Wärme umwandeln, nutzen Wärmepumpen zusätzlich Umweltwärme als Energiequelle. Dadurch erreichen sie einen deutlich höheren Wirkungsgrad

(Nutzenergie pro eingesetzter elektrischer Energie). Als Ausgangspunkt für die Modellierung haben wir für Wärmepumpen einen Wirkungsgrad (COP, Coefficient of Performance) von 2.7 bis 2.9 angenommen. Dieser verbessert sich im Laufe der Zeit. Im Modell reduziert sich der Anteil der Widerstandsheizungen, während die Wärmepumpen zunehmen. Aus diesen Entwicklungen und der verbrauchten Nutzenergie berechnet sich der Stromverbrauch für Raumwärme.

5.1.2. Emissionen Warmwasser

Die Berechnung der durch Warmwasser verursachten Emissionen ist weniger komplex als die oben beschriebene Berechnung zu Raumwärme. Die konsumierte Menge an Warmwasser wird direkt über die Wohnbevölkerung berechnet. Die Datengrundlage (siehe Kapitel 5.2) enthält eine Verteilung der Wärmeerzeugungstechnologien, die zur Herstellung von Warmwasser verwendet werden. Die verbrauchte Nutzenergie wird ebenfalls mit dem Wirkungsgrad zum Endenergieverbrauch umgerechnet, bevor mit dem energieträgerspezifischen Emissionsfaktor die Emissionen berechnet werden.

$$E_{WW} = \sum_{ET} \frac{WWK_{spez} * BEV * E_{WW,spez} * P_{WET}}{WG_{WET}} * EFA_{ET}$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für das Jahr 2023)
E_{WW}	Emissionen durch Warmwasser	Mio. t _{CO2}	2.0
WWK_{spez}	Spezifischer Warmwasserkonsum	l/pers.	18.3 Tsd.
BEV	Wohnbevölkerung der Schweiz	Personen	8.6 Mio.
$E_{WW,spez}$	Nutzenergie pro Liter Warmwasser ⁵⁴	kWh/l	0.052
P_{WET}	Prozentanteil der Wärmeerzeugungstechnologie WET an der Warmwasserbereitstellung	%	23 für Gas
WG_{WET}	Wirkungsgrad der Wärmeerzeugungstechnologie WET bei der Umwandlung zu Warmwasser	-	0.72 für Gas
EFA_{ET}	Emissionsfaktor des Energieträgers ET	kt _{CO2} /TWh	0.201 für Gas

5.1.3. Strom für Kühlung und Geräte

Kühlung

Der Basis-Energieverbrauch für Kühlung und Lüftung stammt aus den Energieperspektiven. Die totalen Verbräuche haben wir in Verbrauch pro Fläche und Kühlgradtag umgerechnet, so dass

⁵⁴ Um SPP-CH-spezifische Entwicklungen der Warmwasseraufbereitung zu ermöglichen, wird die spezifische Wärmemenge pro Liter Warmwasser berechnet. Dazu werden der gesamte Energieaufwand für Warmwasser aus den Energieperspektiven durch den Wasserverbrauch der Basisentwicklung geteilt.

sie für die SSP-CH (z.B. unterschiedliche Bevölkerungsentwicklung oder Effizienzentwicklung) angepasst werden können. Die Berechnungen des durch Lüftung und Kühlung verursachten Stromverbrauchs, sind in der Formel unten beschrieben.

$$SV_K = \sum_{ET} \frac{E_{K,spez} * A * KGT}{COP_K}$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für das Jahr 2023)
SV_K	Stromverbrauch durch Kühlung	TWh	0.13
$E_{K,spez}$	Spezifischer Kühlenergieverbrauch	$\frac{TWh}{m^2 * Kelvin * Tag}$	$0.21 * 10^{-9}$
A	Gebäudefläche	m^2	592.8 Mio.
KGT	Kühlgradtage	Kelvin*Tag	170
COP_K	Leistungskoeffizient von Kühlgeräten	-	3.28

Beleuchtung und Geräte

Der Stromverbrauch aus Beleuchtung und von elektrischen Geräten (v.a. Herdplatten, Bürogeräte, Kühlschränke) werden über den spezifischen Stromverbrauch pro Gebäudefläche berechnet.

$$SV_B = EV_{B,spez} * A$$

Variable	Erklärung	Einheit	Beispiel (für das Jahr 2023)
SV_B	Stromverbrauch durch Beleuchtung	TWh	5.53
$E_{B,spez}$	Spezifischer Energieverbrauch für Beleuchtung	TWh/ m^2	$9.325 * 10^{-9}$
A	Gebäudefläche	m^2	592.8 Mio.

5.1.4. Strom für neue Verbraucher

Zusätzlich zu dem Stromverbrauch der bisherigen Verbraucher, berücksichtigen wir den Verbrauch von «neuen Verbrauchern». Damit meinen wir vor allem Rechenzentren, aber prinzipiell könnte der Verbrauch aufgrund bisher unbekannter Verbraucher ansteigen.

Bezüglich Rechenzentren hat in den letzten Jahren der Stromverbrauch in der Schweiz deutlich zugenommen. Während er 2019 noch bei rund 2,1 TWh lag (Jakob, Müller, and Altenburger 2021), beläuft sich der Wert im Jahr 2023 bereits auf etwa 3 TWh, was rund 4–6 % des gesamten schweizerischen Stromverbrauchs entspricht (Albisser 2025). Studien zeigen, dass

insbesondere der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) den Bedarf stark erhöhen kann: Für 2030 werden in einzelnen Szenarien bereits 10–15 TWh prognostiziert (Altenbuger 2025). Internationale Analysen weisen ebenfalls darauf hin, dass KI-Trainings und KI-Inference zu einem sehr dynamischen Nachfragewachstum führen können (International Energy Agency 2020). Gleichzeitig wird betont, dass Effizienzsteigerungen in der Hardware (GPU/TPU-Spezialisierungen), verbesserte Kühlungskonzepte und regulatorische Eingriffe das Wachstum deutlich abmildern dürften (de Vries 2023). Auch eine Studie von INFRAS im Auftrag des Umweltbundesamts zeigt, dass zwar ein erhebliches Wachstum durch KI zu erwarten ist, dieses aber durch Standortfaktoren, Energiepreise und politische Rahmenbedingungen gebremst und regional unterschiedlich ausfallen dürfte (Schmid et al. 2025).

Wir integrieren die steigende Nachfrage durch KI, nehmen jedoch an, dass das Wachstum langfristig durch Effizienzgewinne, regulatorische Rahmenbedingungen und sonstige Grenzen abgeflacht wird. Ausgangspunkt für die Modellierung ist ein Verbrauch von 3 TWh im Jahr 2023. Auf dieser Basis formulieren wir drei plausible Szenarien, die jeweils eine Sättigung nach 2040/2050 annehmen:

- Im **langsamen Szenario** steigt der Verbrauch nur geringfügig an und erreicht bis 2100 etwa 6 TWh. Dieses Szenario ist plausibel, wenn die Effizienzgewinne den Mehrverbrauch weitgehend kompensieren und die Nachfrage nach KI-Anwendungen nicht stark zunimmt. Dieses wenden wir für SSP0-CH und SSP3-CH an.
- Das **mittlere Szenario** erreicht bis 2100 rund 11 TWh. Dies entspricht den mittleren Projektionen aktueller Studien für 2030, die bereits Werte um 10 TWh erwarten (HSLU/BFE 2024). Dieses wenden wir für SSP4-CH an.
- Das **hohe Szenario** nimmt an, dass die Schweiz als Standort für KI-Rechenzentren besonders attraktiv bleibt und der Bedarf langfristig auf rund 15 TWh ansteigt. Damit würde der heutige Stromverbrauch der Rechenzentren etwa verfünffacht, was rund einem Viertel des gegenwärtigen nationalen Stromverbrauchs entspricht. Dieses Szenario bildet die obere Bandbreite heutiger Prognosen ab, berücksichtigt jedoch ebenfalls eine Sättigungstendenz bis 2100. Dieses wenden wir für SSP1-CH und SSP5-CH an.

Die drei Szenarien schliessen bewusst Werte von 20 TWh und mehr aus, die sich aus exponentiellen Fortschreibungen aktueller Prognosen ohne Begrenzung ergeben würden.

5.1.5. Graue Emissionen

Unter dem Begriff «graue Emissionen» werden alle sonstigen Emissionen zusammengefasst, die im Gebäudesektor entstehen (v.a. Emissionen bei der Herstellung der Baumaterialien). Die Berechnungsmethodik für die grauen Emissionen ist weniger komplex als für die

Betriebsemissionen. Aus der Entwicklung der Gebäudefläche wird die Neubaufäche abgeleitet. Diese wird mit einem Emissionsfaktor pro Neubaufäche multipliziert, um die grauen Emissionen zu erhalten.

Die Grenzwerte der zulässigen grauen Emissionen aus den MuKEn 2025 bilden die Grundlage zur Berechnung der totalen grauen Emissionen. Der Wert von $13 \text{ kg/m}^2/\text{a}$ wird dabei mit der von MuKEn angenommenen Gebäudelebensdauer von 60 Jahren multipliziert ($780 \text{ kg CO}_2/\text{m}^2$). Für die grauen Emissionen bei der Sanierung wird ein spezifischer Emissionsfaktor pro m^2 angenommen, der dreimal niedriger ist als der Wert für Neubauten.

5.2. Bestehende Arbeiten, Quellen und Daten

Als Stützpunkte des Modells verwenden wir Ausgangswerte und eine Basisentwicklung. Die Ausgangswerte sind die verwendeten Werte im Jahr 2023⁵⁵, welche für alle SSP-CH gleich sind. Die Basisentwicklung beschreibt die zugrundeliegende Veränderung der Parameter für die Jahre 2035, 2050, 2060 (Die Basisentwicklung der Jahre 2085 und 2100 haben wir gleich dem Jahr 2060 gesetzt). Sie dient als Basis für die unterschiedlichen Entwicklungen der SPP-CH-Modellparameter. Wo möglich und sinnvoll orientieren sich diese Basisentwicklungen an der Entwicklung des WBB-Szenarios der Energieperspektiven 2050+. Teilweise mussten wir dabei auf Analogieschlüsse zurückgreifen, wenn die entsprechenden Daten nicht in der passenden Differenzierung verfügbar sind. Konkret haben wir die folgenden Informationen aus den Energieperspektiven 2050+ verwendet:

- Heizgradtage und Kühlgradtage (Abb. 12 RCP 4.5)
- Fläche Industrie (weitere Berechnungen, um Dienstleistung von Industrie zu trennen)
- Spezifischer Wärmeverbrauch (Rückrechnung aus Wärmeverbrauch und EBF. Zusätzlich Daten aus [Wärmebedarf und GEAK – Energie-Umwelt.ch](#) zu spezifischem Wärmeenergieverbrauch und [TEP - Erhebung Energieverbrauch von Bürogebäuden](#) (2010) zu Wärmeverbrauch in Bürogebäuden.)
- Raumwärme Energieträgerverteilung ([Gesamtwohnfläche nach Heizsystem und Energiequelle der Heizung \(Kantone und Städte\) - 2021-2023 | Tabelle](#) als Grundlage und Trend über Jahre an Abb.63 & 79 & 80 & 82 angepasst, weiter angepasst an die Gesamtenergiestatistik und das Treibhausgasinventar der Schweiz)
- Raumwärme Wirkungsgrad (Tabelle 49)
- Warmwasser Energieträgerverteilung (Abb. 75)
- Warmwasser Wirkungsgrad (Tabelle 51)

⁵⁵ Für die Berechnungen im Gebäudesektor haben wir die Ausgangswerte des Jahres 2019 verwendet, da zum Zeitpunkt der Modellerstellung die Daten für das Jahr 2023 noch nicht vollständig verfügbar waren und die Jahre 2020 bis 2022 durch die Corona-Pandemie verfälscht waren. Um eine konsistente und einfache Lesbarkeit des gesamten Dokuments zu gewährleisten, sind die Ausgangswerte im Gebäudesektor jedoch mit 2023 bezeichnet.

- Kühlung (Abb. 88)
- Wirkungsgrad Kühlung (Tabelle 52)
- Stromverbrauch Beleuchtung (Tabelle 57)

Da die EP2050+ nicht alle nötigen Daten enthalten, haben wir zudem folgende Datenquellen verwendet:

- Daten des Bundesamtes für Statistik (Bau- und Wohnungswesen)⁵⁶
 - Wohnfläche pro Bewohner ([Flächenverbrauch](#))
 - Gebäudealter ([Bauperiode](#))
- Bericht von TEP Energy GmbH im Auftrag des BFE⁵⁷
 - Sanierungsrate für die Periode 2011 bis 2020
- Schweizerische Gesamtenergiestatistik⁵⁸
 - Strom Geräte (Rückrechnung)
- Faktenblatt, April 2014. BAFU. CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz
 - Emissionsfaktor Gas
 - Emissionsfaktor Heizöl
- MuKE_n 2025⁵⁹
 - Graue Emissionen im Schweizer Gebäudebau

Um sicherzustellen, dass die im Modell berechneten Emissionen des Gebäudesektors für das Ausgangsjahr 2023 mit den Emissionen aus dem Emissionsinventar übereinstimmen, mussten wir kleinere Anpassungen der Daten vornehmen. Dies liegt daran, dass die Daten aus unterschiedlichen Quellen stammen und daher nicht vollständig konsistent sind.

5.3. Beschreibung Szenarien für Sektor Gebäude

5.3.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

SSP0-CH: Die genügsame Schweiz

Eingeschränkte finanzielle Ressourcen in Verbindung mit einem gestiegenen Gemeinschaftsbedarf resultieren in einem geringeren Wohnraum pro Kopf und einem rückläufigen Wohneigentumsanteil, bei gleichzeitig zunehmender Bereitstellung gemeinschaftlich nutzbarer

⁵⁶ [Bau- und Wohnungswesen](#)

⁵⁷ [Das Gebäudeprogramm zeigt Wirkung: Sanierungsraten steigen - Energiehub Gebäude](#)

⁵⁸ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.ex-turl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVibGljYX/Rpb24vZG93bmxxYVQvMTAxMzg=.html>

⁵⁹ https://www.endk.ch/de/ablage/grundhaltung-der-endk/MuKE2025_d-2024-08-30.pdf

Flächen. Der allgemeine Konsum hat sich stark reduziert: Dies gilt auch für den Wohnraum und den Energieverbrauch. Die Schweiz ist dezentral und kleinräumig strukturiert, es findet sich ein vielfältiges Angebot auf engem Raum. Auch ländliche Zentren verfügen über sämtliche öffentliche Dienstleistungen und sind entsprechend gewachsen.

SSP1-CH: Die effiziente Schweiz

Eine steigende Bevölkerung und ein hohes Umweltbewusstsein haben zu stark verdichteten Städten geführt. Die Bodenpreise sind sehr hoch, der Wohnraum pro Kopf entsprechend gering.

SSP3-CH: Die konfliktreiche Schweiz

Bis in die zweite Hälfte des Jahrhunderts findet eine Zentralisierung und Verdichtung der Städte statt: Da die Energiepreise hoch und lange Wege gemieden werden, ziehen Arbeitende in die Städte; ländliche Gebiete entleeren sich, der Wohnraum pro Kopf nimmt ab. Gegen Ende des Jahrhunderts kehrt sich der Trend um: Der Urbanisierungsgrad sinkt - ein Teil der Leute zieht aus Subsistenzgründen aufs Land zurück, der Wohnraum pro Kopf erhöht sich leicht, die Bevölkerung nimmt insgesamt ab.

SSP4-CH: Die ungleiche Schweiz

Die Gesellschaft ist gespalten, auch bezüglich der Wohnverhältnisse: Während die Elite viel Wohnraum pro Kopf in Anspruch nimmt, sinkt er bei der Unterschicht teils markant. Da die Unterschicht bis Ende des Jahrhunderts einen Grossteil der Gesellschaft ausmacht, nimmt das verdichtete Wohnen und die Urbanisierung insgesamt zu. Doch während sich stark verdichtete Vorkorte um die Zentren bilden, lebt die Elite in separierten Gebieten platzintensiv.

SSP5-CH: Die ressourcenintensive Schweiz

Finanzieller Wohlstand und wachsende Platzansprüche einer wachsenden Bevölkerung haben zu einer starken Zersiedelung geführt: Das Mittelland ist weitgehend verstädtert. Der Wohnraum pro Kopf ist hoch. Gegen Ende des Jahrhunderts nimmt sowohl die Bevölkerung als auch der finanzielle Wohlstand ab, es gibt viel Leerstand, was die vorhandene Wohnfläche pro Kopf stark ansteigen lässt, auch wenn diese ungenutzt ist.

5.3.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

SPA0: Status Quo

Die schweizerische Gebäudepolitik im Status Quo ist gekennzeichnet durch den Fokus auf die Dekarbonisierung von Neubauten durch Subventionen und Standards. Die wichtigsten Herausforderungen sind i) die Regulierung der Dekarbonisierung des bestehenden Gebäudebestands und ii) die Reduzierung der grauen Emissionen im Zusammenhang mit dem Materialeinsatz während der Bauphase. Die Baupolitik fällt hauptsächlich in die Zuständigkeit der Kantone.

SPA1: Grüner Staat

Die schweizerische Baupolitik im Rahmen des «Grünen Staates» zeichnet sich dadurch aus, dass sie sich sowohl auf die Dekarbonisierung von Neubauten und Altbauten als auch auf die verkörperten, grauen Emissionen während der Bauphase konzentriert. Um dies zu erreichen, greift der Staat durch regulative Instrumente, begleitet von finanziellen Anreizen, stark in den Bau und die Nutzung privater Immobilien ein. Die Baupolitik liegt hauptsächlich in der Verantwortung der Kantone, jedoch mit einer starken Koordination, Finanzierung und Mindestanforderungen auf Bundesebene.

SPA2: Ökologische Republik

Das Ziel der schweizerischen Baupolitik im Rahmen der Ökologischen Republik ist die Dekarbonisierung von Neu- und Altbauten sowie der verkörperten Emissionen. Im Vergleich zu SPA1 interveniert der Staat jedoch nur geringfügig zugunsten von Privatinitiativen (Gebäudelabel), Veränderungen auf der Nachfrageseite (weniger Quadratmeter pro Kopf) und Innovationen im Bausektor (Verwendung von weniger kohlenstoffintensiven Materialien). Die staatliche Intervention besteht in erster Linie darin, diese gesellschaftlichen Aktivitäten zu fördern.

SPA3: Ordoliberaler Staat

Die Schweizer Baupolitik unter dem ordoliberalen Staat ist durch einen Laissez-faire-Ansatz gekennzeichnet, bei dem der Staat den Bausektor nur schwach in Richtung Dekarbonisierung lenkt. Der Staat gibt einige grundlegende Regeln (Baunormen) oder Informationen für Kunden/Unternehmen (Labels) vor, verzichtet aber auf politische Instrumente wie Subventionen oder Interventionen durch staatliche Unternehmen (z.B. im Beschaffungswesen). Die CO₂-Abgabe wird auf einem niedrigen Niveau gehalten.

SPA4: Kompensierender Staat

Die Schweizer Baupolitik im Kompensationsstaat ist geprägt durch den Schutz des fossilen Heizens und Bauens und die Abfederung der Schweizer Konsumenten von Klima(politik)kosten und hohen Energiekosten. Dazu setzt der Staat auf fiskalische Instrumente wie Subventionen für fossile Heizungen oder Anpassungsmassnahmen im Gebäudebereich (z.B. Hochwasserschutz). Förderinstrumente für kohlenstoffarme Lösungen sind weniger wichtig.

5.4. Modellierung SSP-CH und SPA

5.4.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Kapitel 5.1 und 5.2 haben beschrieben, mit welchen Schritten und aus welchen Datengrundlagen wir die Emissionen des Bausektors berechnen. Dieses Kapitel beschreibt nun, wie die Ausgangswerte bzw. die Basisentwicklung mittels der sektorspezifischen SSP-Wirkungsmatrix beeinflusst werden, um die Entwicklung der Emissionen pro SSP-CH zu modellieren (siehe auch Kapitel 3.2). Die Wirkungsmatrix ist im Kapitel 5.6 in Tabelle 13 dargestellt und gibt einen Überblick über alle für den Sektor Gebäude relevanten Szenarioparameter und welche Modellparameter diese beeinflussen. Folgendes sind die zentralen Elemente:

- Sanierungen und (Ersatz-)Neubauten verbessern graduell den energetischen Zustand des Gebäudebestandes und senken somit den spezifischen Wärmebedarf der Gebäude.
- Die Zunahme von Wärmepumpen für die Erzeugung von Raumwärme und Warmwasser führt zu erheblichen Emissionsreduktionen, weil Wärmepumpen mit Strom und Umweltwärme betrieben werden.
- Umweltbewusstsein erhöht suffizientes Verhalten⁶⁰ und die Bereitschaft, in fossilfreie Technologien zu investieren.
- Mit der Innovationstätigkeit steigt die Effizienz von Geräten, Prozessen und Gebäudehüllen.
- Eine steigende Wohnbevölkerung erhöht den absoluten Energieverbrauch.
- Aufgrund des Klimawandels sinken die Heizgradtage in allen Szenarien um etwa 10% und die Kühlgradtage verdoppeln sich.⁶¹ Dies lässt den Energieaufwand für Raumkühlung steigen, reduziert jedoch die benötigte Wärmeenergie. Letzter Effekt dominiert in der Summe. Dieser Effekt ist allerdings nicht in der Wirkungsmatrix aufgeführt, weil dies ein exogener Kontextfaktor ist.

⁶⁰ Suffizienz bezeichnet einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen und die bewusste Reduktion des eigenen Konsums. Im Falle des Gebäudesektors würde die Bevölkerung weniger heizen und kühlen und würde bei Investitionen Emissionen und Energieverbräuche vermehrt gewichtet. In unserem Modell hat das Umweltbewusstsein aufgrund der Ceteris Paribus Annahme allerdings keinen Einfluss auf Aspekte, die bereits von anderen SSP-Parametern abgedeckt sind (z.B.: Wohnraum pro Kopf oder Individuelles Konsumniveau).

⁶¹ Wir gehen in allen SSP-CH von einer Zunahme der Temperatur gemäss RCP 4.5 aus.

5.4.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Der Einfluss der SPA im Gebäudesektor erfolgt analog zu dem Vorgehen im Verkehrssektor. Für eine ausführliche Beschreibung der Methodik siehe daher Kapitel 3. Tabelle 10 zeigt unsere Annahmen zum Wirkungsbereich der SPA im Gebäudesektor. Tabelle 14 im Anhang gibt zudem einen Überblick über die Instrumente der SPA und deren Wirkung.

Tabelle 10: Annahmen Wirkungsbereich der SPA im Gebäudesektor.

Modellparameter	Wirkungsbereich SPA ⁶²	Kommentar
Wohnfläche	-15% bis +0%	<ul style="list-style-type: none"> SPA1 senkt die spezifische Gebäudefläche um 15%. Weitere SPA haben keine Auswirkung auf die totale Wohnfläche
Anteil der Altbauten an gesamten Gebäudebestand	-8 PP ⁶³ bis +15 PP	<ul style="list-style-type: none"> Der Anteil Altbauten wird v.a. durch Änderungen der Sanierungsrate und der Ersatzneubaurate beeinflusst.
Anteil Fossiler Energieträger an der Raumwärmeerzeugung	-34 PP bis +17 PP	<ul style="list-style-type: none"> Starke Abnahme aufgrund eines Verbotes fossiler Energieträger im Jahr 2035
Spezifischer Wärmeverbrauch von sanierten Gebäuden und Neubauten	-0% bis +58%	<ul style="list-style-type: none"> Starke Zunahme aufgrund Lockerung von Gebäudevorschriften.
Stromverbrauch von Geräten	-15% bis +10%	<ul style="list-style-type: none"> Der Einfluss auf den Stromverbrauch der Geräte ist ähnlich wie jener auf den Stromverbrauch von Kühlprozessen.

Tabelle INFRAS.

5.5. Ergebnisse und Diskussion

5.5.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Dieses Kapitel zeigt und diskutiert die Ergebnisse der Modellierung des Gebäudesektors. Das erste Unterkapitel beschreibt die Entwicklung der zentralen Einflussfaktoren. Es folgen die Resultate des Endenergieverbrauchs und schlussendlich der Treibhausgasemissionen.

5.5.1.1. Übersicht Einflussfaktoren

Tabelle 11 zeigt die Auswirkung der drei wichtigsten Szenarioparameter im Sektor Gebäude. Die Kombination dieser Parameter gibt einen guten Einblick in die Hintergründe der unterschiedlichen Entwicklungen. Weitere Parameter, wie das BIP pro Kopf, der Wohnraum pro

⁶² Die Bandbreiten entsprechen einer starken Abnahme bis hin zu einer starken Zunahme. Die Änderungen beziehen sich immer auf die Werte der Szenarien ohne SPA im jeweiligen Jahr.

⁶³ Prozentpunkte (PP) beschreiben die absolute Veränderung eines Prozentwertes (Bsp. 20 % steigt auf 30 %. Der Wert erhöht sich um 10 PP).

Kopf, das Verdichtungslevel und das individuelle Konsumniveau, haben ebenfalls Einfluss auf die Entwicklungen. Allerdings ist der Einfluss entweder geringer als von den in Tabelle 3 genannten Auswirkungen (z.B. Verdichtungslevel) oder der Trend zeigt bei allen Szenarien in eine ähnliche Richtung (z.B. Wohnraum pro Kopf) und erzeugt so keine nennenswerte Divergenz zwischen den Szenarien. Nennenswert ist noch der Faktor «Anteil Wärmepumpen am Heizungs-mix», welcher einzig im Gebäudesektor zur Anwendung kommt. Er beeinflusst die Geschwindigkeit der Elektrifizierung und erhöht den Einsatz von Wärmepumpen in SSP1-CH und SSP4-CH, obwohl das Umweltbewusstsein relativ gering ist.

Tabelle 11: Wichtigste Effekte für Ergebnisse der SSP-CH Modellierung (Veränderung 2023 vs. 2060⁶⁴)

Sektor Gebäude			
SSP	Entwicklung Umweltbewusstsein	Entwicklung Innovationstätigkeit	Entwicklung Wohnbevölkerung
SSP0	Starke Zunahme (+50%)	Zunahme (+15%)	Leichte Zunahme (+4%)
SSP1	Zunahme (+15%)	Starke Zunahme (+66%)	Zunahme (+19%)
SSP3	Abnahme (-15%)	Abnahme (-8%)	Leichte Zunahme (+1%)
SSP4	Abnahme (-8%)	Zunahme (16%)	Zunahme (+19%)
SSP5	Starke Abnahme (-33%)	Unverändert (0%)	Starke Zunahme (+37%)

Tabelle INFRAS.

5.5.1.2. Gebäudekategorien

Wir unterteilen den Gebäudepark in drei Gebäudekategorien (Altbau, Saniert und Neubau). Die Entwicklung der Flächen dieser drei Gebäudekategorien hängt von folgenden Faktoren ab:

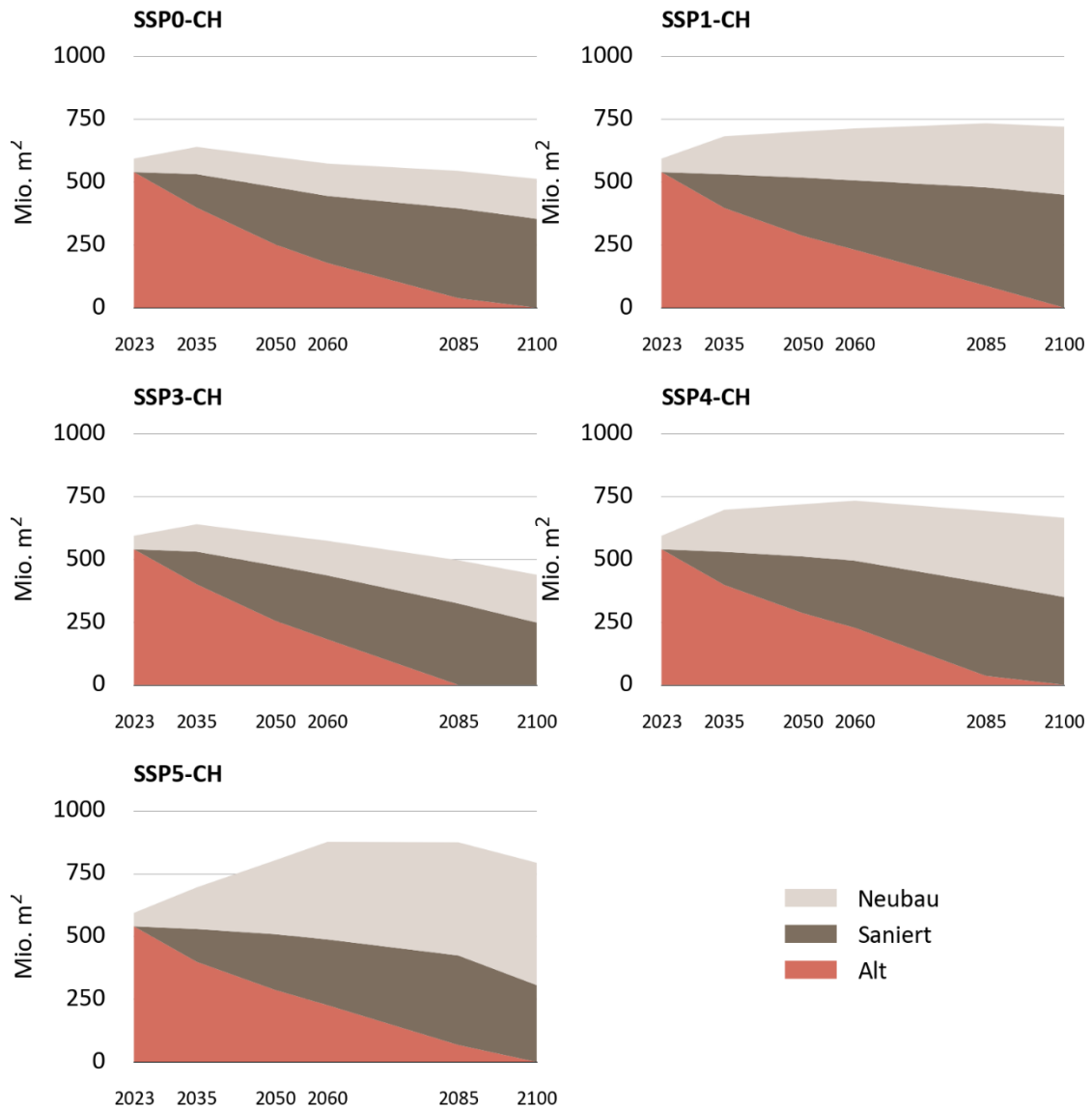
- Die Sanierungsrate bestimmt die Zunahme der sanierten Gebäudefläche auf Kosten der Fläche alter Gebäude. Die Sanierungsrate wird sich in der Basisentwicklung bezogen auf den Ausgangsbestand zur Hälfte des Jahrhunderts im Vergleich zu den heutigen Werten halbieren. Grund dafür ist ein sinkender Sanierungsdruck ausgelöst durch die verbreiteten emissionsarmen Heiztechnologien. Zudem handelt es sich bei den verbleibenden alten Gebäuden zunehmend um schwer-zu-sanierende Fälle.
- Die Ersatzneubaurate bestimmt den Anteil der bestehenden Gebäudefläche, die durch Neubauten ersetzt wird. Dadurch erhöht sich nicht die Gebäudefläche, aber es reduziert sich der spezifische Energiebedarf. Ersatzneubauten betreffen primär die Gebäudekategorie Alt. Falls keine alten Gebäude mehr existieren, werden sanierte Bauten ersetzt.

⁶⁴ Die Tabelle bezieht sich auf das Jahr 2060, weil dort die grössten Änderungen sind.

- Die Entwicklung der Wohnbevölkerung und die Wohn- und Dienstleistungsfläche pro Kopf bestimmen den Flächenbedarf an Gebäuden. Falls der Flächenbedarf abnimmt, kommt es zu leerstehenden Gebäudeflächen. Falls der Flächenbedarf zunimmt, müssen Neubauten erstellt werden, um die Gebäudefläche zu erhöhen.

Abbildung 16 zeigt, dass in allen SSP-CH die Fläche alter Gebäude durch Sanierungen und Ersatzneubauten kontinuierlich sinkt. In den meisten Szenarien hat sich die Fläche alter Gebäude im Jahr 2085 auf einen verschwindend geringen Anteil reduziert. Die leichten Unterschiede erklären sich durch die divergierenden Entwicklungen in Umweltbewusstsein und BIP pro Kopf. Auch die Fläche sanierter Gebäude entwickelt sich in allen SSP-CH ähnlich. Der Hauptunterschied der SSP-CH ist die Fläche an Neubauten, welche vor allem von der Bevölkerungsentwicklung abhängt.

Abbildung 16: Entwicklung Gebäudekategorien



«Alt» bildet einen Mix aus Gebäuden, die vor 2010 gebaut wurden und nicht saniert sind, und Gebäuden, die vor 2010 gebaut und vor 2023 saniert wurden.⁶⁵

«Saniert» sind Gebäude, die nach dem Startpunkt des Modells saniert werden.

«Neubau» sind Gebäude, die nach 2010 erstellt wurden.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

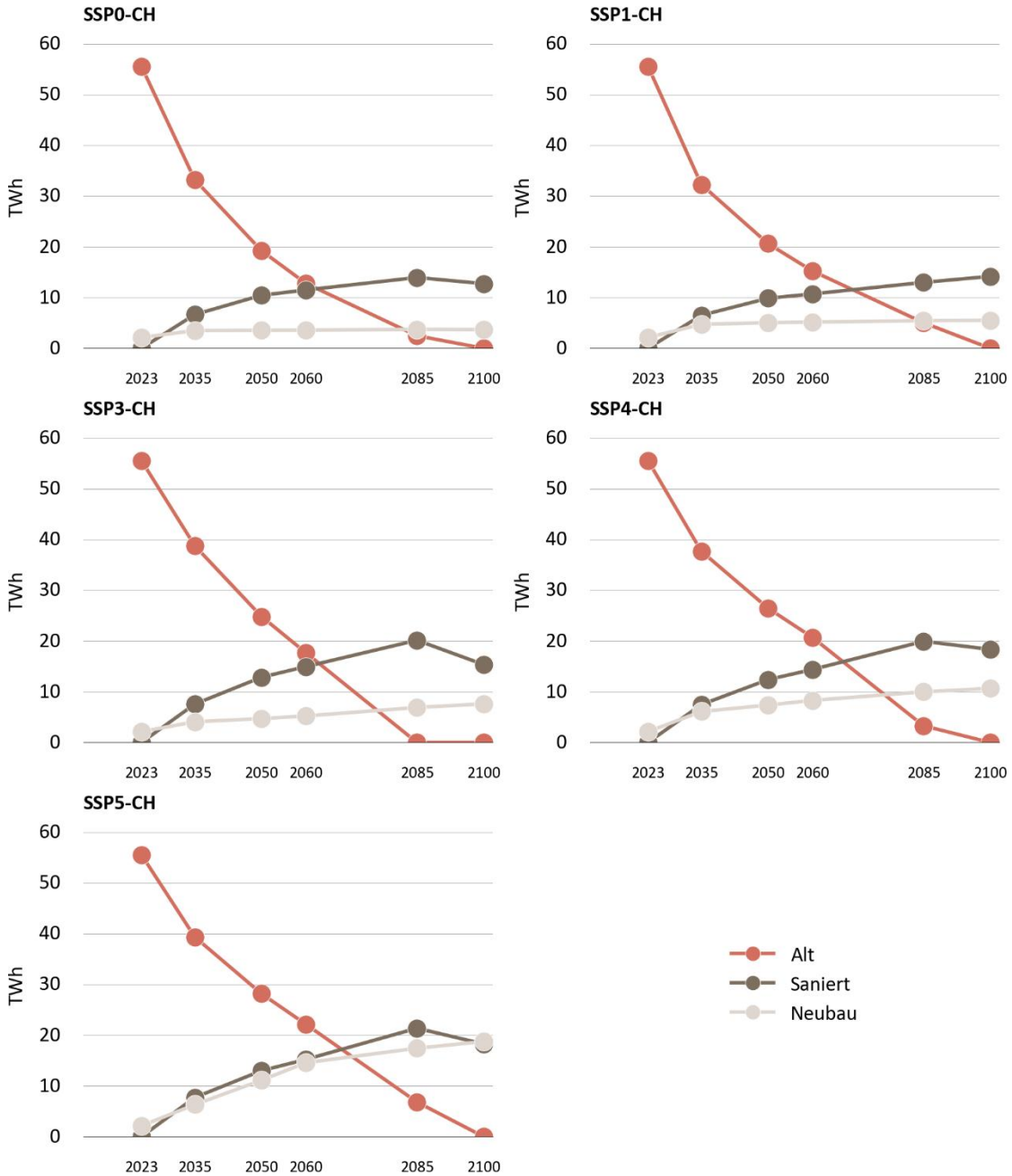
⁶⁵ Aufgrund der Datengrundlage haben wir die bereits sanierten Gebäuden zum Startpunkt des Modells in die Kategorie «Alt» aufgenommen. Dies ist für den spezifischen Wärmeverbrauch dieser Kategorie berücksichtigt.

5.5.1.3. Energie pro Gebäudefläche

Die drei Gebäudekategorien unterscheiden sich in ihrem durchschnittlichen spezifischen Wärmeverbrauch. Die Ausgangswerte sinken im Laufe der Zeit aufgrund von technischen Verbesserungen (für Saniert und Neubau), dem Klimawandel sowie z.B. dem gestiegenen Umweltbewusstsein in manchen SSP-CH. So reduziert sich der Energieaufwand für Raumwärmeerzeugung pro Quadratmeter bis zum Ende des Jahrhunderts erheblich.

Abbildung 17 zeigt den absoluten Wärmeverbrauch der Gebäudekategorie (d.h. spezifischer Wärmeverbrauch multipliziert mit der Gebäudefläche). Es ist deutlich erkennbar, dass in allen SSP-CH zu Beginn der Wärmeverbrauch von den alten Gebäuden dominiert wird, deren Wärmeverbrauch aber mit der Zeit abnimmt. Der Wärmeverbrauch von sanierten und neuen Gebäuden nimmt parallel zu, allerdings auf geringerem Niveau (aufgrund des geringen spezifischen Wärmeverbrauchs). Die Abbildung zeigt, dass der Umbau des Gebäudeparks eine lange Zeitspanne benötigt, aber in allen SSP-CH ähnlich verläuft.

Abbildung 17: Wärmeverbrauch Gebäudekategorien



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

5.5.1.4. Stromverbrauch

Abbildung 18 zeigt als zusätzliche Information den Stromverbrauch im Gebäudesektor. Dieser entsteht durch Raumwärmeerzeugung (Wärmepumpen und Widerstandsheizung), Warmwassererzeugung (Wärmepumpen und Elektroboiler), Beleuchtung, elektrische Geräte, Raumkühlung und neue Verbraucher wie Rechenzentren (siehe Kapitel 5.1.4).

Elektrische Geräte (z.B. Kühlschränke, Computer oder Fernseher), Raumkühlung und neue Verbraucher dominieren den Stromverbrauch. Deren Modellierung ist nicht Fokus dieser Studie und daher sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren. Raumwärme und Warmwasser machen heute nur einen Fünftel des Strombedarfs aus. In unserer Modellierung ändert sich die Gesamtmenge nicht signifikant, da zu Beginn der Modellierung noch Widerstandsheizungen eingesetzt werden, um sowohl Warmwasser als auch Raumwärme zu generieren. Der gesamte Stromverbrauch von in Neubauten installierten Wärmepumpen im Jahr 2060 übersteigt jenen der heute betriebenen Widerstandsheizungen nicht merklich⁶⁶.

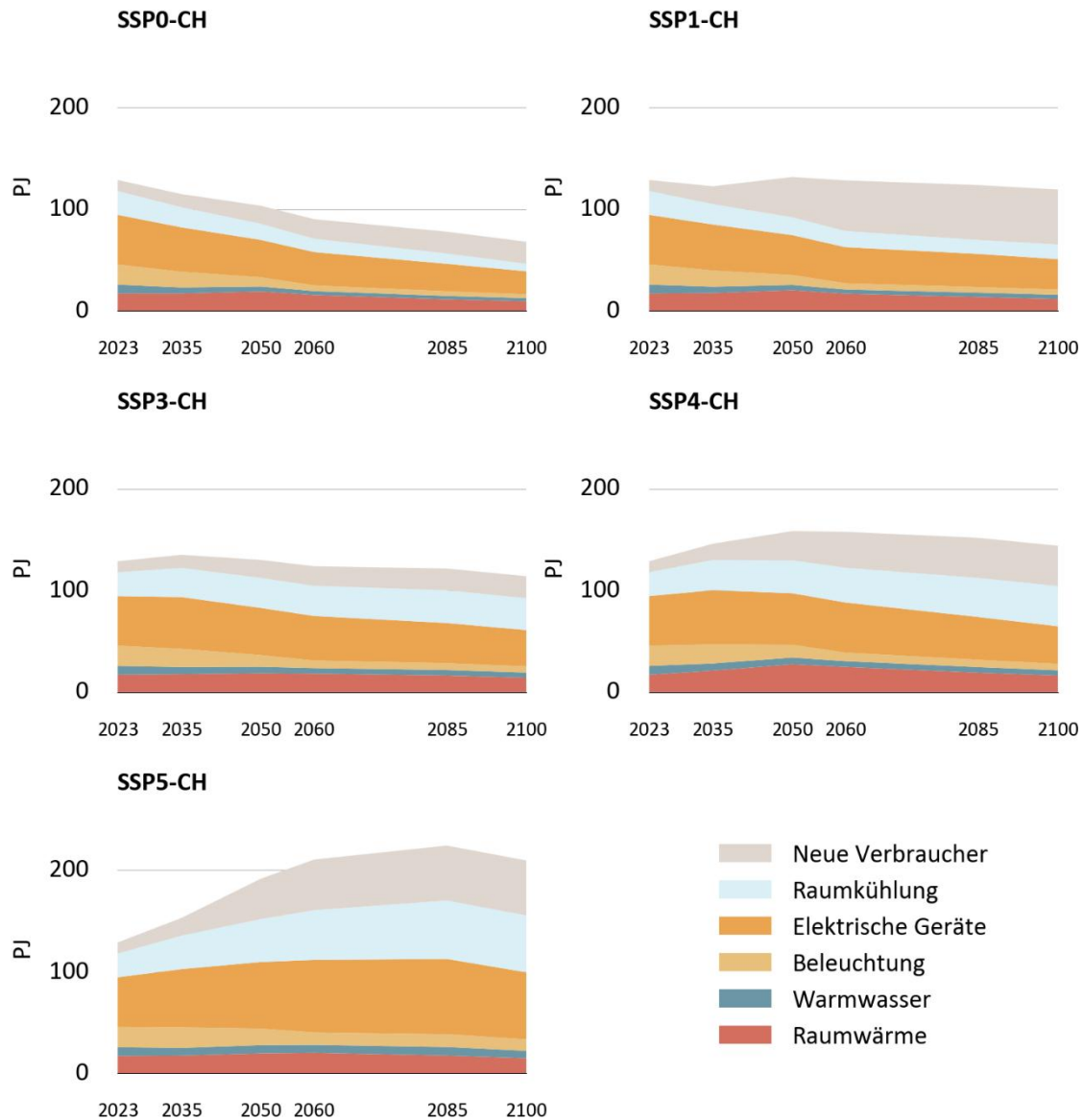
In SSP0-CH nimmt der Stromverbrauch bis zum Ende des Jahrhunderts um etwa die Hälfte ab. Grund dafür ist, dass effizientere Gebäudetechnik und eine hohe Suffizienz die zusätzlichen Verbräuche durch Elektrifizierung übertreffen.

In den Szenarien SSP1-CH, SSP3-CH und SSP4-CH bleibt der Stromverbrauch hingegen ungefähr konstant, allerdings aus unterschiedlichen Gründen. In SSP1-CH führen eine nahezu vollständige Elektrifizierung, ein Bevölkerungsanstieg und ein starker Zuwachs an neuen Verbrauchern zwar zu höherem Bedarf, dieser kann jedoch dank effizienterer Gebäudehüllen und Geräte sowie durch eine steigende Suffizienz in der Bevölkerung ausgeglichen werden. In SSP3-CH nimmt die Geräteeffizienz nur geringfügig zu und kann die steigende Elektrifizierung nicht kompensieren. Gleichzeitig sorgen ein niedriges Konsumniveau und ein leichter Bevölkerungsrückgang gegen Ende des Jahrhunderts dafür, dass der Stromverbrauch insgesamt leicht abnimmt. Auch in SSP4-CH sinkt der herkömmliche Stromverbrauch bis zum Jahrhundertende leicht. Zwar treibt die starke Elektrifizierung den Bedarf nach oben, doch wird dieser durch effiziente Geräte und einen Konsumrückgang der ärmeren Bevölkerung ausgeglichen. Das zusätzliche Aufkommen neuer Verbraucher führt jedoch zu einer leichten Zunahme des gesamten Stromverbrauchs.

In SSP5-CH kommt es zu keiner Verbesserung der Gebäude- oder Geräteeffizienz. Bevölkerungswachstum, Elektrifizierung und ein hohes Konsumniveau treiben den Stromverbrauch daher in die Höhe.

⁶⁶ Ein Beispiel: Die Widerstandheizung eines Altbautes mit einem spezifischen Wärmeverbrauch von 120 kWh/m² verbraucht ungefähr gleich viel Strom wie die Wärmepumpen (COP von 3.8) von elf Neubauten mit einem spezifischen Wärmeverbrauch von 40 kWh/m² (vorausgesetzt die Flächen der Gebäude sind identisch).

Abbildung 18: Stromverbrauch Gebäudesektor



Der Stromverbrauch von Raumwärme und Warmwasser resultiert aus Widerstandsheizungen und v.a. Wärmepumpen. Die Kategorie „Neue Verbraucher“ umfasst aufkommende Technologien wie Rechenzentren, von denen in Zukunft ein signifikanter Stromverbrauch erwartet wird.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

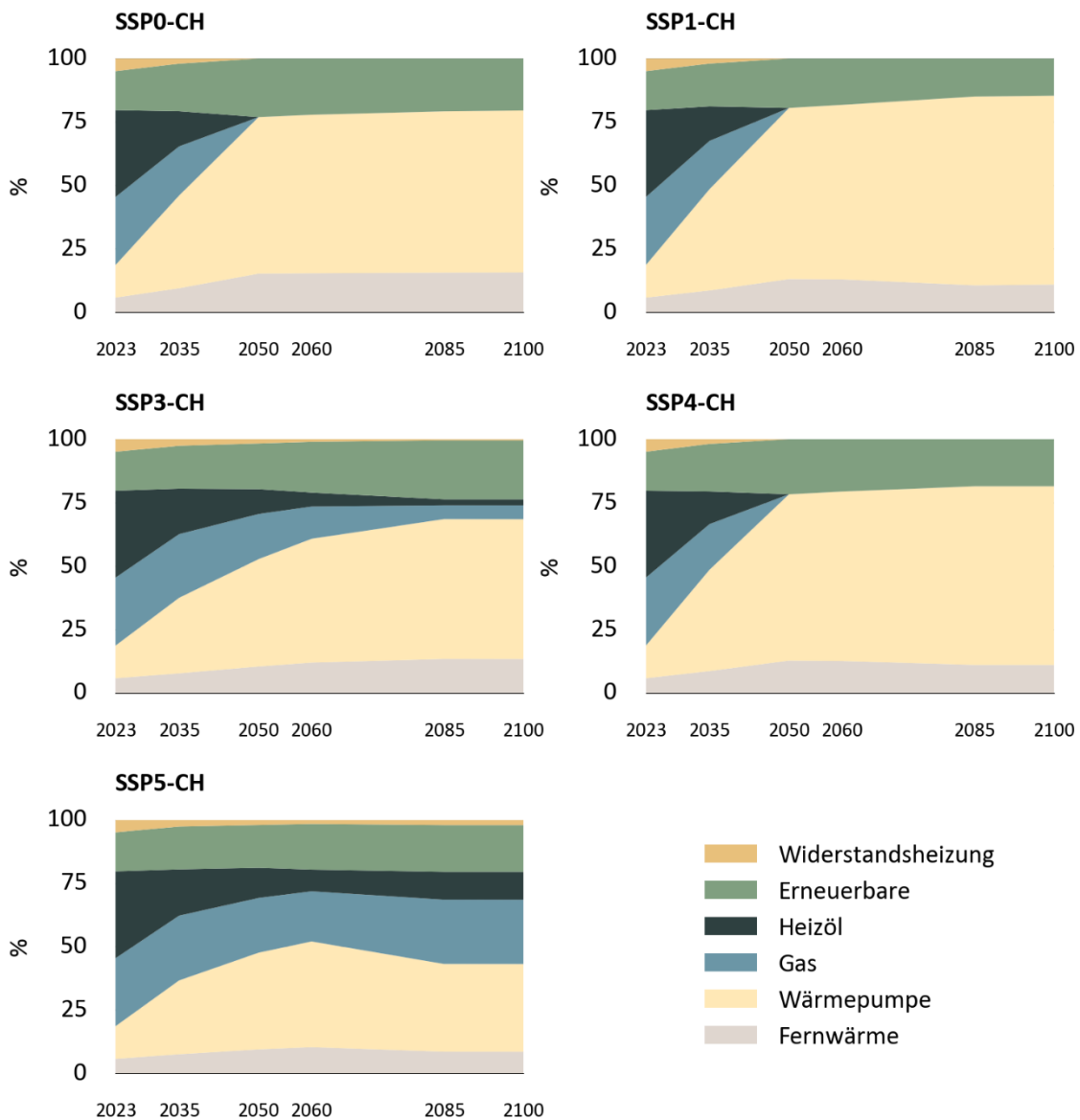
Grafik INFRAS.

5.5.1.5. Heiztechnologien und Energieträger

Abbildung 19 zeigt den Anteil der Energieträger und Heiztechnologien für die Raumwärmebereitstellung. Diese ist die zweite wichtige Komponente für die Entwicklung der Emissionen im Gebäudesektor. In den SSP0-CH, SSP1-CH und SSP4-CH werden fossile Energieträger durch die

Nutzung von Wärmepumpen bis 2050 quasi vollständig ersetzt. In SSP3-CH und v.a. SSP5-CH bleiben Gas und Heizöl bis Ende des Jahrhunderts Bestandteile des Energiemixes, aber auch hier steigt der Anteil an Wärmepumpen.

Abbildung 19: Anteil Energieträger und Heiztechnologien in Raumwärmebereitstellung

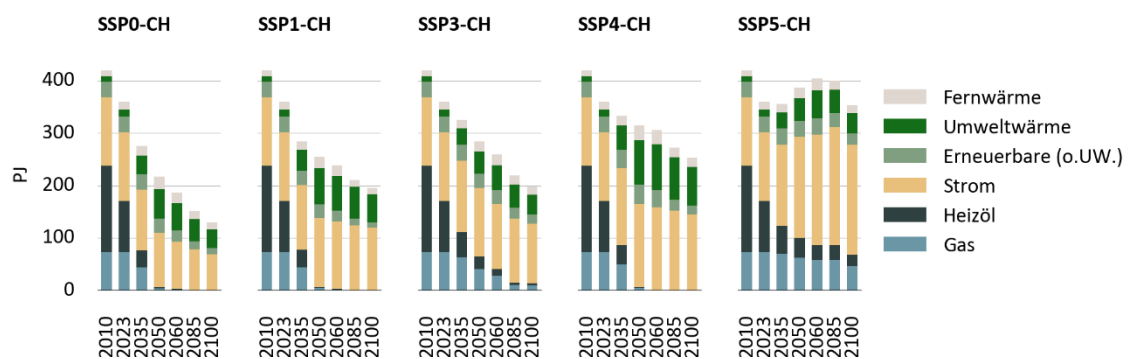


Erneuerbare umfassen verschiedene emissionsfreie Energieträger wie Biomasse, Biogas oder Solarthermie.
 Fernwärme wird durch unterschiedliche Energieträger erzeugt (siehe Energiesektor)
 Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Abbildung 20 zeigt den Endenergieverbrauch und die Energieträgerverteilung, die sich aus diesen Entwicklungen ergibt. Gut erkennbar sind die fortschreitende Elektrifizierung und die parallele Reduktion der fossilen Energieträger. In allen SSP-CH ist ein Rückgang des Endenergieverbrauchs bis Ende des Jahrhunderts zu verzeichnen. In den SSP0-CH und SSP1-CH ist der Rückgang besonders ausgeprägt, in SSP5-CH bleibt der Verbrauch hingegen bis 2085 fast konstant und nimmt nur gegen Ende des Jahrhunderts wegen des Bevölkerungsrückgangs ab.

Abbildung 20: Endenergieverbrauch Sektor Gebäude nach Energieträger



«o.U.W.» bedeutet ohne Umweltwärme.

Die Kategorie Fernwärme setzt aus unterschiedlichen Energieträgern zusammen (siehe Sektor Energie).

Die Kategorie Erneuerbare (o.U.W.) ist ein Sammelbegriff für verschiedene emissionsfreie Energieträger, wie Biomasse, Biogas oder Solarthermie.

Umweltwärme ist als eigene Kategorie aufgelistet (in anderen Studien ist diese teils auch in der Kategorie «Erneuerbare»).

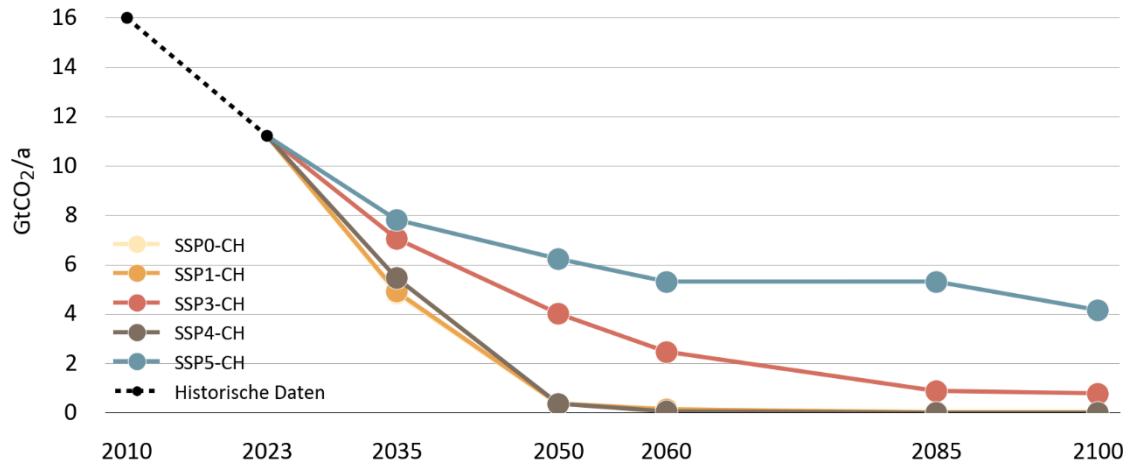
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

5.5.1.6. Treibhausgasemissionen

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen spiegelt die Trends des Endenergieverbrauchs sowie dessen Zusammensetzung (Elektrifizierung) wider. In allen SSP-CH sinken die Emissionen im Zeitverlauf. In den SSP0-CH, SSP1-CH und SSP4-CH gehen sie bis 2050 nahezu auf null zurück. Die Absenkpfade der drei Szenarien sehen fast identisch aus, da der Rückgang von fossilen Energieträgern in allen drei Szenarien ähnlich schnell geschieht. In SSP3 gehen die Emissionen ebenfalls Richtung Null, allerdings können die fossilen Energieträger nie vollständig ersetzt werden. In SSP5-CH ist ab 2035 kaum ein Abwärtstrend erkennbar, sodass auch im Jahr 2100 noch erhebliche Emissionen anfallen. Auf eine weitere grafische Aufteilung dieser Ergebnisse nach Kategorien haben wir verzichtet, da diese keinen Mehrwert gegenüber den schon gezeigten Abbildungen liefert.

Abbildung 21: Gesamte Emissionen pro SSP-CH im Gebäudesektor



Die Entwicklungen von SSP0-CH und SSP1-CH sind quasi identisch und daher in der Abbildung überlappend. Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

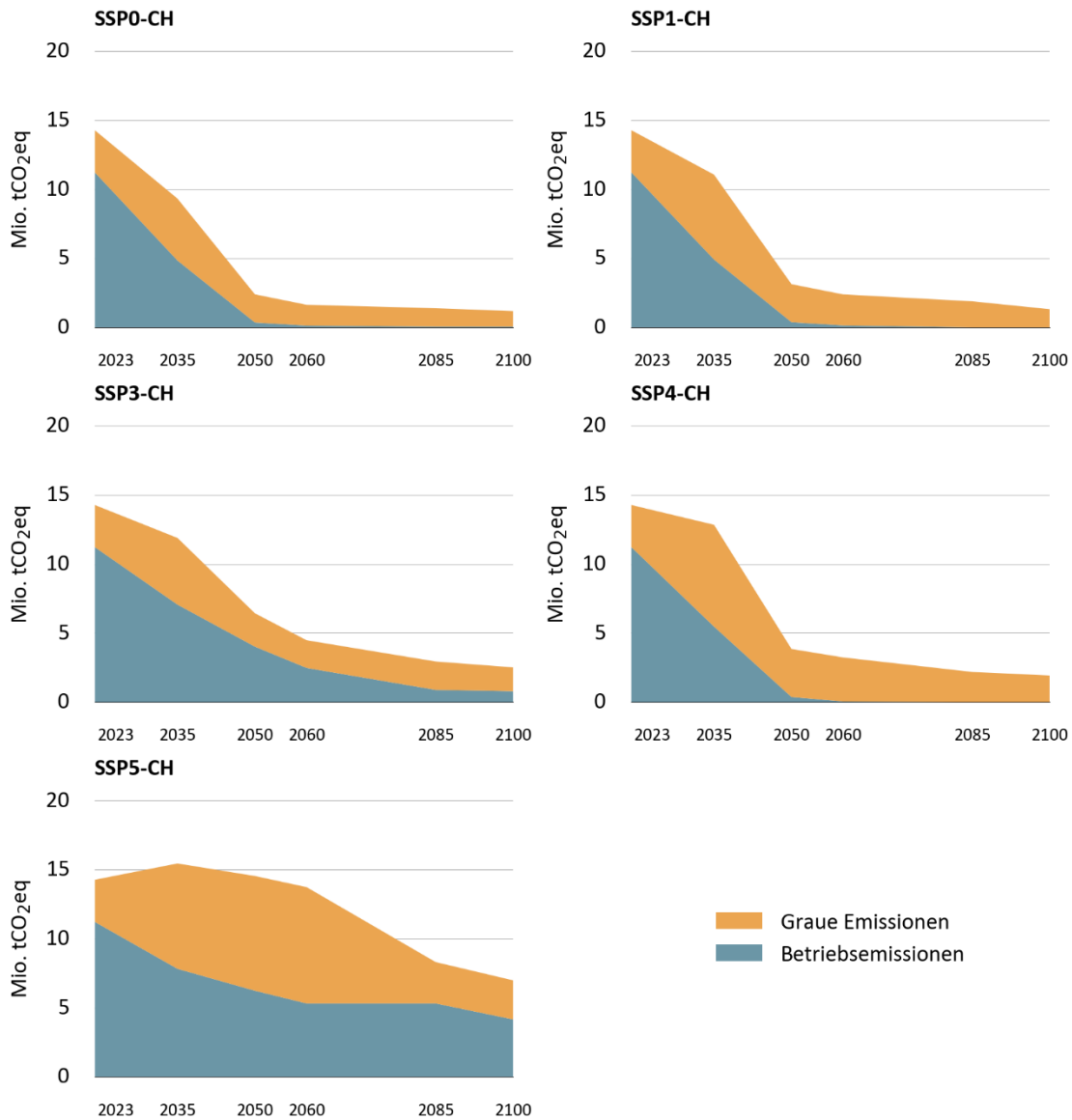
Grafik INFRAS.

5.5.1.7. Graue Emissionen

Die grauen Emissionen haben wir zur Veranschaulichung der SSP-CH aufgeführt. Die Werte fließen aber des Weiteren nicht in das Modell ein, da sonst eine Doppelzählung mit den Sektoren Importe, Energie und Industrie resultieren würde. Daher haben wir graue Emissionen nur für die SSP-CH modelliert, nicht für die SPA.

Abbildung 22 vergleicht die im vorherigen Kapitel bereits dargestellten Betriebsemissionen mit den grauen Emissionen im Gebäudesektor. Graue Emissionen entstehen vor allem bei der Herstellung von Baumaterialien bei Neubauten und – in kleinerem Umfang – auch bei Sanierungen. Man sieht, dass die grauen Emissionen im Vergleich zu den Betriebsemissionen nur langsam zurückgehen und somit im Laufe der Zeit einen immer grösseren Anteil ausmachen. Die grauen Emissionen hängen stark von den Bauaktivitäten und der Bereitschaft und Technologie zur Verwendung von emissionsarmen Baumaterialien ab. Dies wird durch die Szenarioparameter BIP pro Kopf, Umweltbewusstsein und Innovationstätigkeit beeinflusst. Die grundlegende Entwicklung der grauen Emissionen widerspiegelt jedoch die Bevölkerungsentwicklung, wobei die Bevölkerungszunahmen zu emissionsintensiven Neubauten führen (v.a. in SSP5-CH). Bei der Berechnung gehen wir davon aus, dass keine CO₂ Abscheidung im Zementsektor stattfindet (dies ist Teil der SPA).

Abbildung 22: Totale Emissionen der Gebäude, inklusive grauer Emissionen



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

5.5.2. Klimapolitische Instrumente (SPA) in Kombination mit SSP-CH

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse der Modellierung der SSP-CH inklusive der zugehörigen SPA. Tabelle 12 zeigt eine Übersicht zur Wirkung der SPA auf den Gesamtenergieverbrauch als Änderungen gegenüber den SSP-CH. Gezeigt sind die Spannweite der prozentualen Wirkung und die maximale absolute Wirkung. Die Wirkung der SPA hängt aus zwei Gründen von der Zeit ab. Erstens wirken gewisse Instrumente nicht sofort. Zweitens ändert sich das

zugrundeliegende SSP-CH mit der Zeit und somit auch die Wirkung des SPA (z.B. erzielt ein Verbot fossiler Brennstoffe keine Wirkung, wenn die Gesellschaft in dem SSP-CH keine solchen Brennstoffe mehr verwendet).

Tabelle 12: Wirkung SPA Gesamtenergieverbrauch

SPA SSP-CH	SPA1 Grüner Staat	SPA2 Ökologische Republik	SPA3 Ordoliberaler Staat	SPA4 Kompensierender Staat
SSP0-CH		-9% bis -10% max. -28 PJ in 2035		
SSP1-CH	-7% bis -14% max. -33 PJ in 2035		+6% bis +8% max. +17 PJ in 2085	
SSP3-CH			+5% bis +12% max. +27 PJ in 2085	
SSP4-CH	-8% bis -14% max. -45 PJ in 2035		+6% bis +9% max. +25 PJ in 2085	
SSP5-CH				+25% bis +27% max. +102 PJ in 2060

Tabelle INFRAS.

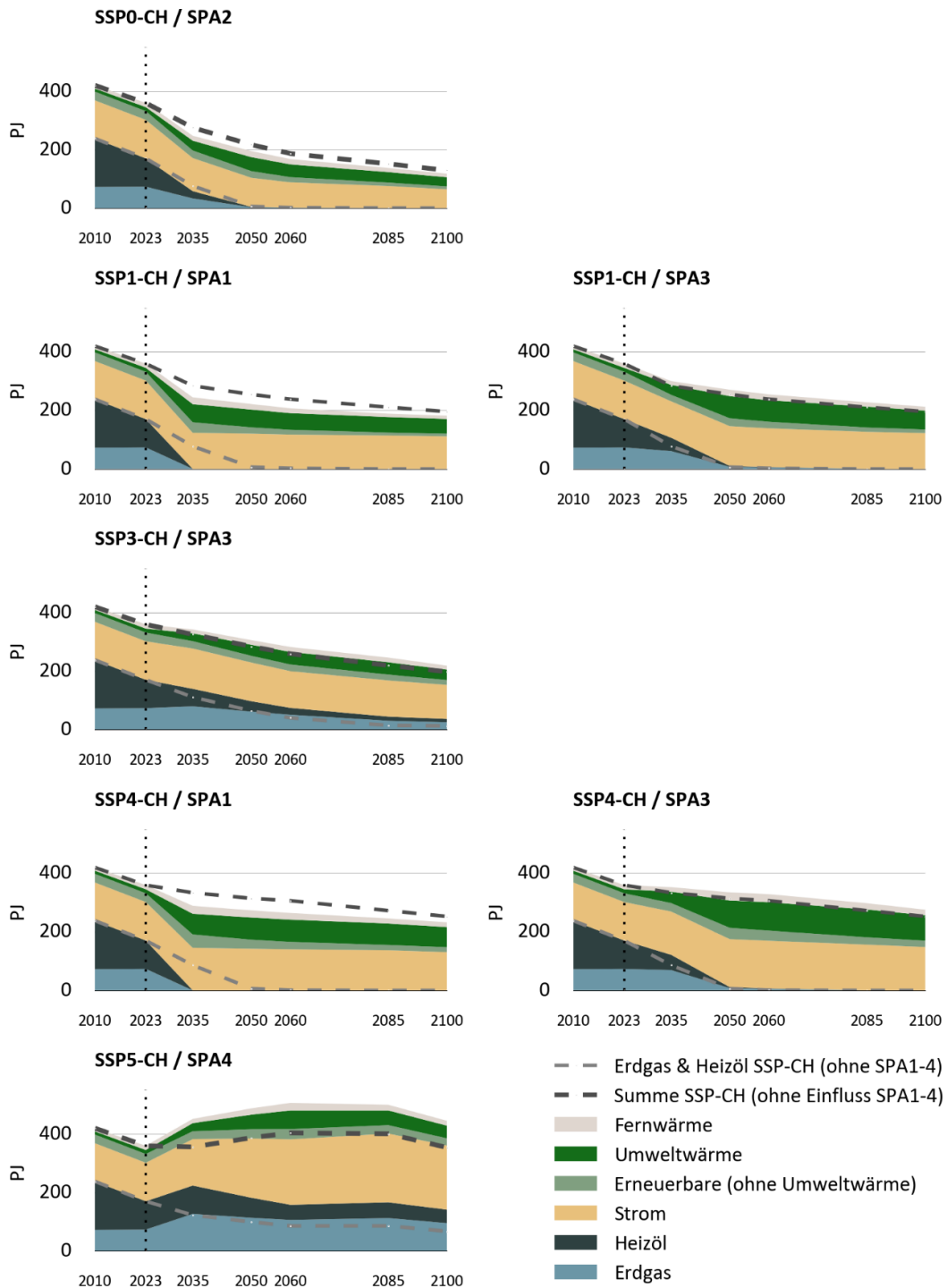
Die SPA führen in Kombination mit den jeweils zugehörigen SSP-CH zu einer Änderung des Energieverbrauches von -14% bis +27%. Dabei fallen folgende Punkte auf:

- SPA1 erzielt die höchsten relativen und absoluten Verbrauchsreduktionen. Unter anderem führt ein Verbot fossiler Heizungen im Jahr 2035 dazu, dass mehr Wärmepumpen eingesetzt werden.
- SPA2 erzielt ebenfalls eine Abnahme des Energieverbrauches. Da SSP0-CH, dank des hohen Umweltbewusstseins der Bevölkerung, bereits einen starken Rückgang des Energieverbrauches erreicht hat, können die Instrumente von SPA2 nur noch eine bedingte Wirkung entfalten.
- SPA3 führt zu einer Erhöhung des Energieverbrauches, welche in der Kombination mit den drei SSP-CH ähnlich ausfällt.
- SPA4 führt zur höchsten prozentualen und absoluten Erhöhung des Energieverbrauchs. SSP5-CH hat bereits die energieintensivste Entwicklung. SPA4 erhöht den Verbrauch ab 2035 nochmals zusätzlich um etwa ein Drittel.

Abbildung 23 und Abbildung 24 visualisieren die SSP-CH/SPA-Kombinationen und zeigen den Unterschied zu der Entwicklung der SSP-CH auf. Während SPA 1 und SPA2 den Energieverbrauch reduzieren und einen fossilfreien Energiemix fördern, führen SPA3 und SPA4 zu einer langsameren Abnahme respektive einer Zunahme des Energieverbrauchs und einem höheren

Anteil an fossilen Energieträgern. SPA1 und SPA2 zeigen vor allem zu Beginn Wirkung, da fossile Energieträger in den SSP-CH noch prominent vorhanden sind. Gegen Ende des Jahrhunderts wird die Wirkung der SPA zunehmend kleiner, da die Entwicklung der SSP-CH in die gleiche Richtung geht. Die SPA bewirken in diesen Fällen v.a. eine Änderung auf der Zeitachse.

Abbildung 23: Energieverbrauch nach Energieträger pro SSP-CH inklusive SPA (in PJ)



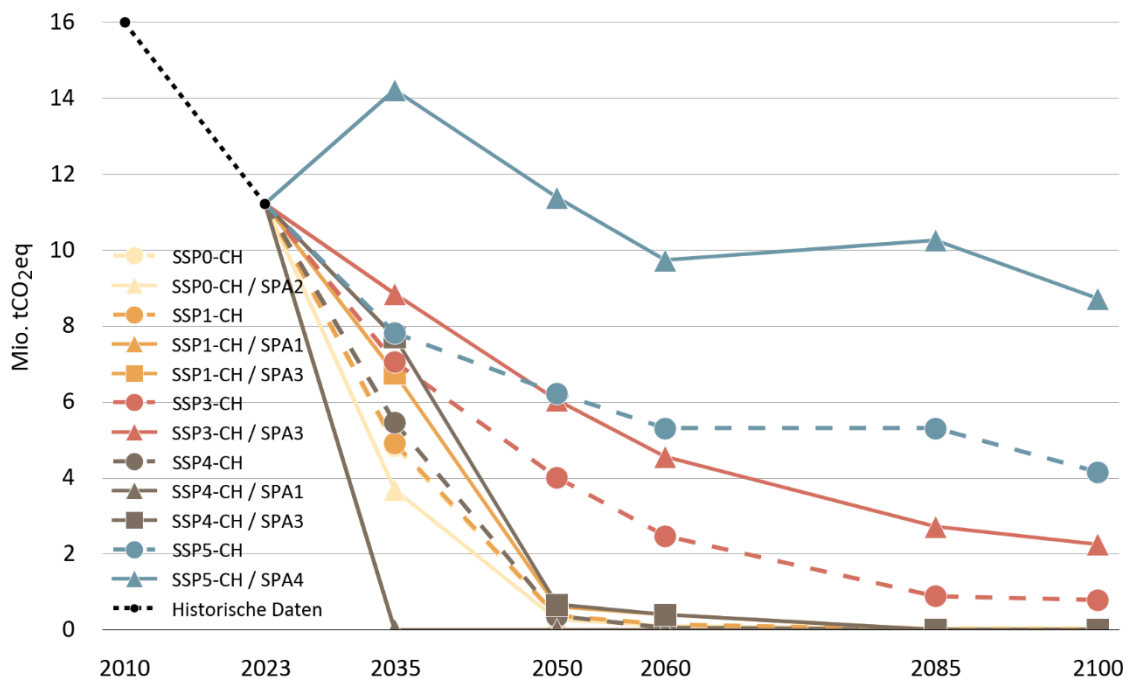
Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Abbildung 24 zeigt den Fächer der Emissionsentwicklungen, der sich aus den gesellschaftlichen, technischen und politischen Trends ergibt. Die Elektrifizierung und Sanierung bzw. Neubau sorgen dafür, dass die Emissionen fast immer nach unten gehen. Unterschiede gibt es vor allem in der Geschwindigkeit dieses Trends. Allein SSP-CH 5 in Kombination mit SPA4 führt zu einem in etwa gleichbleibenden Niveau an Emissionen. Anfangs steigen die Emissionen gegenüber heute sogar wieder an (da bestehende Instrumente abgeschafft werden) und nehmen dann nur langsam ab. Am schnellsten nehmen die Emissionen in SSP1-CH und SSP4-CH in Kombination mit SPA1 ab (die Kurven sind überlappend). Dies liegt am Verbot von fossilen Heizungssystemen, das bereits 2035 greift und somit die gesamten Emissionen im Gebäudesektor eliminiert.

Abbildung 24: Gesamte Emissionen (ohne Strom und Fernwärmeemissionen) der SSPs und der SSP/SPA-Kombinationen im Gebäudesektor in Mio. tCO₂eq.



Die Kombinationen SSP1-CH / SPA 1 und SSP4-CH SPA 1 überlappen sich, da beide im Jahr 2035 durch ein Verbot fossiler Heizenergieträger auf null fallen.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

5.6. Kapitelanhang: Wirkungsmatrizen Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Tabelle 13: SSP-Wirkungsmatrix Gebäude

Modellparameter	Gebäudefläche	Wärmeerzeugungstechnologie	Sanierungsrate und Ersatzneubau	Spezifischer Wärmebedarf von Gebäuden	Energieverbrauch von Beleuchtung und Geräten	Energiebedarf für Kühlung	Graue Emissionen im Gebäudebau
Wohnbevölkerung	+						
BIP pro Kopf	+ Dienstleistung		+ Ersatzneubau	- Saniert, Ersatz			-
Anteil Erneuerbar am Gesamtmix		- Fossil					
Wohnraum pro Kopf	+ Wohnraum						
Umweltbewusstsein		+ FW, WP	+ Sanierung - Ersatzneubauten	-	-	-	-
Innovationstätigkeit				-	-	-	-
Verdichtungslevel				-			
Urbanisierungsgrad		+ FW					
Anteil WP an Heizungsmix		+ WP					
Individuelles Konsumniveau						+	

Ein «+»/«-» bedeutet eine positive/negative Elastizität zwischen Szenario- und Modellparameter.

Tabelle INFRAS.

5.7. Kapitelanhang: Klimapolitische Instrumente (SPA) und deren Wirkung

Tabelle 14 gibt einen Überblick über die Instrumente der SPA und deren Wirkung im Sektor Gebäude. Gezeigt sind die wichtigsten politischen Instrumente (erste Spalte) und deren Einführung (zweite Spalte). In den meisten Fällen modellieren wir die Wirkung so, dass das Instrument erst im nächsten modellierten Zeitschritt nach der Einführung seine volle Wirkung entfaltet. Durch die Interpolation zwischen den Modellschritten findet ein «phase-in» statt. Ausnahmen sind z.B. Betriebsverbote, die sofort wirken. Spalte drei zeigt die Kategorie des Instruments (Autorität, Finanzen, Strategie) und Spalte vier den Modellparameter, der von dem Instrument beeinflusst wird. Da es zu komplex wäre, die Wirkung aller Instrumente einzeln zu modellieren, zeigt die letzte Spalte die von uns abgeschätzte Gesamtwirkung des Instrumentenbündels auf die Modellparameter. Diese werden schlussendlich im Modell implementiert, um die Wirkung des SPA zu modellieren.

Tabelle 14: SPA Sektor Gebäude: Instrumente und Wirkung

Politik	Einführung	Instrumententyp	Wirkung	Gesamtwirkung SPA (maximal; in % oder PP*)
SPA0 – Status Quo				
1. CO ₂ -Abgaben auf fossile Energieträger	Auswahl der heute gültigen Politiken, insbesondere solcher, die durch die SPA verändert werden	Autorität	1. Energieträgermix	-
2. Kantonale Gebäudestandards und Energiegesetze		Autorität	2. Spezifischer Wärmeverbrauch, Energieträgermix	
3. Steueranreize für energetische Sanierungen und Energieeffizienz		Finanzen	3. Spezifischer Wärmeverbrauch, spezifischer Energieverbrauch von Geräten	
4. Gebäudeprogramm		Finanzen	4. Spezifischer Wärmeverbrauch, Energieträgermix, Sanierungsrate	
5. Fernwärmestrategie 2050		Strategie	5. Energieträgermix	
SPA1 – Grüner Staat				
1. Verschärfte Bau- und Gebäudestandards für Neubauten und Sanierungen	1. Ab sofort	Autorität	1. Bau- und Sanierungsemissionen	Energieträgermix: Starke Abnahme fossiler Energieträger (bis auf 0%) Graue Emissionen: Starke Abnahme grauer Emissionen (Bis zu -60%) Wohnfläche: Abnahme der spezifischen Wohnfläche (bis zu -20%) Sanierungen: Rückgang Altbauten (bis zu -15PP) Neubauten: Kleinerer Anteil an Neubauten (bis zu -15PP)
2. Verbot Betrieb fossile Heizungen	2. 2035	Autorität	2. Energieträgermix	
3. Sanierungspflicht	3. Ab sofort	Autorität	3. Sanierungsrate	
4. Bauzonenregulierung (bedingtes EFH-Verbot und Neubauregulierungen)	4. Ab sofort	Autorität	4. Ersatzbaurate, spezifische Gebäudefläche	
5. Klimafond für Sanierungen	5. Ab sofort	Finanzen	5. Sanierungsrate	
6. Immobilienprogramm (kauf von privaten Immobilien und mehr geförderte Wohnungen)	6. Ab sofort	Finanzen	6. Spezifische Wohnfläche, Energieträgermix	
7. Strategie zu Bauemissionen und end-of-life-Phase von Baustoffen	7.2035	Organisation und Strategie	7. Bau- und Sanierungsemissionen	

Politik	Einführung	Instrumententyp	Wirkung	Gesamtwirkung SPA (maximal; in % oder PP*)
SPA2 – Ökologische Republik				
1. Bauemissionsabgabe und freiwillige Bauemissionsziele	1. Ab sofort	Autorität	1. Bau und Sanierungsemissionen	Spezifischer Energieverbrauch: Abnahme um bis zu 25% von Wärme- und Stromverbrauch pro m ² Energieträgermix: Abnahme fossiler Energieträger (Bis zu -5 PP) Graue Emissionen: Reduktion um 25%
2. Erhöhung der CO ₂ -Abgabe	2. Ab sofort	Autorität	2. Spezifischer Wärmebedarf, Warmwasserbedarf, Energieträgermix	
3. Subventionen für klimaneutrales Bauen	3. Ab sofort	Finanzen	3. Bau und Sanierungsemissionen	
4. Koordinationsstrategie zu Dekarbonisierung von Gebäuden in Privatbesitz	4. Ab sofort	Organization and Strategy	4. Spezifischer Wärmeverbrauch, Energieträgermix, Warmwasserbedarf, Kühlenergie	
SPA3 – Ordoliberaler Staat				
1. Abschaffung des kantonalen Gebäudestandards	1. Ab sofort	Autorität	1. Spezifischer Wärmebedarf	Spezifischer Energieverbrauch: Zunahme um 20% des Raumwärmeverbrauchs pro m ² Sanierungen: bis zu 15PP höheren Anteil an Altbauten und 15PP tieferer Anteil sanierter Bauten Energieträgermix: Abnahme Anteil WP, FW und Erneuerbaren am Energieträgermix (bis zu -10PP)
2. Abschaffung des Gebäudeprogrammes	2. Ab sofort	Finanzen	2. Sanierungsrate, Energieträgermix	
3. Abschaffung der Steueranreize für energetische Sanierungen und Energieeffizienz	3. Ab sofort	Finanzen	3. Sanierungsrate, Warmwasserverbrauch	
4. Auflösung der Fernwärmestrategie	4. Ab sofort	Organisation and Strategie	4. Energieträgermix	
SPA4 – Kompensierender Staat				
1. Abschaffung der CO ₂ -Steuer	1. Ab sofort	Autorität	1. Sanierungsrate, Energieträgermix	Sanierungen: bis zu 10PP höherer Anteil an Altbauten und 10PP tieferer Anteil an sanierten Bauten Energieträgermix: Abnahme Anteil Erneuerbare, WP, FW (bis zu -7PP) Spezifischer Energieverbrauch: Zunahme Wärmeverbrauch pro m ² (bis zu 60%)
2. Lockerung des Gebäudestandards	2. Ab sofort	Autorität	2. Spezifischer Wärmebedarf	
3. Abschaffung des Energiegesetzes	3. Ab sofort	Autorität	3. Spezifischer Wärmebedarf, Energieträgermix	
4. Subvention von Heizenergie und Strom	4. Ab sofort	Finanzen	4. Spezifischer Wärmeverbrauch, Warmwasserverbrauch, Stromverbrauch	
5. Subvention von Klimaanpassungen	5. Ab sofort	Finanzen	5. Spezifische Kühlenergie	

* PP = Prozentpunkt

Tabelle INFRAS.

6. Industrie

6.1. Modellbeschreibung

Zur Berechnung der Emissionen, die im Industriesektor entstehen, nutzen wir das bottom-up-Industriemodell der Prognos (prIDe, Prognos Industry Developer for Energy⁶⁷), welches bereits in vielen energiesystematischen Studien, insbesondere für die öffentliche Hand, zum Einsatz kam (darunter die Energieperspektiven 2050+). Das Modell berechnet die Entwicklung des Energiebedarfs für die Produktion und die Eigenenergieerzeugung sowie der prozessbedingten Emissionen (inkl. der fluorierten Kohlenwasserstoffe, sog. F-Gase); jedoch sind die Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) nicht Teil des Industrie-, sondern des Energiewirtschaftsmodells (siehe Kapitel 7). Dies geschieht im Wesentlichen bottom-up anhand der Einflussfaktoren Menge, Effizienz (allgemein als spezifisches Verhältnis von Einsatz zu Ertrag) und Energieträgersubstitution bzw. Tausch der Produktionsanlagen. Diese Einflussfaktoren werden innerhalb eines SSP-CH autonom – anhand allgemeiner marktlicher und gesellschaftlicher Entwicklungen – oder induziert – anhand von Eingriffen, z.B. politischen Instrumenten – angepasst. Im Kontext der SSPs-CH wird auf eine vereinfachte Anwendung des Modells abgestellt, denn die betrachteten Szenarien adressieren nur die grundlegenden Modellparameter.

6.1.1. Formalisierung

Den gesamtschweizerischen industriellen Endenergieverbrauch erhält man durch Aufaddieren aller Einzelverbräuche, die ausgehend vom Basisjahr 1995 iterativ jeweils aus den Vorjahresverbräuchen und den Änderungen der einzelnen Einflussfaktoren (vereinfacht) berechnet werden:

$$E(t) = \sum_{p,et} E(t-1, p) \cdot [1 + \Delta M(t-1 \rightarrow t, p) + \Delta SE(t-1 \rightarrow t, p, et)] \cdot A(t, p, et)$$

⁶⁷ <https://www.prognos.com/de/pride> und <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/energieverbrauch-nach-verwendungszweck.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWwRtaW4uY2gvZGUvcH-VibGljYX/Rpb24vZG93bmVvYVQvMTE5ODc=.html>

Variable	Erklärung	Einheit
E(t)	gesamter Endenergieverbrauch im Zeitraum t	PJ
E(t-1, p)	Energieverbrauch eines Prozessschrittes p im Vorjahreszeitraum t-1	PJ
$\Delta M(t-1 \rightarrow t, p)$	Änderung des Mengenindikators vom Vorjahreszeitraum t-1 auf Zeitraum t für Prozessschritt p	t oder Fr.
$\Delta SE(t-1 \rightarrow t, p, et)$	Änderung des spezifischen Endenergieverbrauchs vom Vorjahreszeitraum t-1 auf Zeitraum t für Prozessschritt p und Energieträger et	PJ/t oder PJ/Fr.
A(t, p, et)	Energieträger-Anteil im Zeitraum t für Prozessschritt p und Energieträger et	%
t	Zeitraum (Kalenderjahr)	-
p	Prozessschritt (= Verbraucher, resp. Anlage oder Gerät)	-
et	Energieträger (Strom und Brennstoffe; Brennstoffe in A weiter differenziert)	-

Insgesamt berechnet das Industriemodell über 800 Einzelverbräuche für jeden Zeitraum t. Die berechneten Verbräuche werden periodisch auf die Statistik kalibriert (jedoch nicht geeicht). Aus diesem werden die verbrennungsbedingten Emissionen mittels der individuellen Emissionsfaktoren separat für die Gase Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) berechnet.

Weiter werden die prozessbedingten Emissionen modelliert. Für diese Emittenten wird folgende Berechnung angesetzt:

$$T(t) = \sum_{p,g} M(t,p) \cdot SE(t,p,g)$$

Variable	Erklärung	Einheit
T(t)	gesamte prozessbedingte Treibhausgasemissionen im Zeitraum t	Mio. tCO ₂ eq
M(t, p)	Mengenindikator im Zeitraum t für Prozess p	t (o. a.)
SE(t, p, g)	spezifische Emissionen im Zeitraum t für Prozess p und Treibhausgas g	Mio. tCO ₂ eq/t (o. a.)
t	Zeitraum (Kalenderjahr)	-
p	einzelner Prozess innerhalb von CRF 2	-
g	Treibhausgase (CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O und die F-Gase HFC, PFC, SF ₆ , NF ₃)	-

6.1.2. Dimensionalität

Das Industriemodell differenziert in seiner vollen Auflösung 12 Branchen bzw. über 50 Unterbranchen und Produkte, 25 Verwendungszwecke wie z.B. die Prozesswärmeniveaus und Haustechnik, 18 Energieträger und über 50 CRF-Gruppen bei den prozessbedingten Emissionen. Die

gewählten Branchenabgrenzungen orientieren sich in der obersten Aggregationsebene an den Veröffentlichungen der Bundesämter (insbesondere des BFE und des BAFU). Für die Modellberechnung im Rahmen des SSP-CH-Projekts nutzen wir eine deutlich schlankere Dimensionalität: So haben wir die Energieträger auf sechs (siehe Tabelle 15) und die Branchen auf vier (siehe Tabelle 16) aggregiert. Verwendungszwecke sind nicht weiter unterschieden (ausser die Raumwärme für die Berechnung des Winterstromanteils, siehe Kapitel 7). Die CRF-2-Gruppen (prozessbedingte Emissionen) sind, wo möglich, den entsprechenden Branchen zugerechnet (z.B. werden die prozessbedingten Emissionen aus der Zementproduktion CRF 2.A.1. der Zementbranche und damit den Grundstoffen/Baustoffen zugerechnet). Die nicht zuordenbaren CFR-2-Gruppen sind weitgehend homogen behandelt und unter Produktherstellung/-nutzung subsummiert. Ziel der gewählten Branchengruppierung ist, die wesentlichen Gütergruppen und insbesondere die energieintensiven Güter separieren zu können und gleichzeitig wenig spezifische Aussagen über die einzelnen Branchen in Detail treffen zu müssen.

Tabelle 15: Energieträger Industrie

Energieträger (kurz)	Energieträger (GEST)	Beschreibung
Fossile	Kohle, Rohöl, Erdölprodukte, Gas	alle fossilen Energieträger
Abfall	Müll und Industrieabfälle	sowohl industrielle als auch Siedlungsabfälle
Erneuerbare	Holzenergie, Übrige erneuerbare Energien	sämtliche Biomassen, Solarthermie, Umweltwärme ⁶⁸
PtX	-	Power-to-X: synthetische Energieträger bzw. Kohlenwasserstoffe aus Elektrizität, insbesondere Wasserstoff als Grundbaustein oder eigenständiger Energieträger
Strom	Elektrizität	netzgebundene (oder selbst erzeugte) Elektrizität
Fernwärme	Fernwärme	netzbezogene niedertemperaturige Wärme

GEST = Gesamtenergiestatistik des Bundesamtes für Energie

Tabelle Prognos.

⁶⁸ Hinweis: Im Gebäudesektor führen wir Umweltwärme aufgrund ihrer hohen Bedeutung als eigene Kategorie separat auf.

Tabelle 16: Branchenraster Industrie

Branchengruppen / Modell-Branchen	Treiber der Produktionsmenge	Basisentwicklung: Änderung 2023-2100
Grundstoffe/Baustoffe	Tonnage	+9%
Chemiefasern	Produktionsmenge	-99%
Glas	Produktionsmenge	+25%
Keramik	Produktionsmenge	-21%
Ziegel	Produktionsmenge	-54%
Zement	Produktionsmenge	+12%
Roheisen/Rohstahl	Produktionsmenge	-13%
Eisenbearbeitung	Produktionsmenge	+31%
Bearbeitung von Aluminium	Produktionsmenge	-36%
Sonstige NE-Metalle	Produktionsmenge	-99%
alle zu o.g. Branchen zuordenbare CRF 2-Gruppen	jeweilige Produktionsmenge	(verschieden)
Weiterverarbeitete Güter	Wertschöpfung	+4%
Chemie	Wertschöpfung	+154%
Pharma	Wertschöpfung	+236%
Gummi/Kunststoffe	Wertschöpfung	+362%
Metallerzeugnisse	Wertschöpfung	+53%
Elektrotechnik	Wertschöpfung	-74%
Maschinenbau	Wertschöpfung	-12%
alle zu o.g. Branchen zuordenbare CRF 2-Gruppen	jeweilige Produktionsmenge	(verschieden)
Konsumgüter	Wertschöpfung	+8%
Nahrung	Wertschöpfung	-21%
Textilien	Wertschöpfung	-90%
Bekleidung	Wertschöpfung	-83%
Papier	Wertschöpfung	-33%
Druck	Wertschöpfung	-34%
Sonstige Waren	Wertschöpfung	-67%
Wasser/Abwasser	Wertschöpfung	-2%
Bau	Wertschöpfung	+45%
alle zu o.g. Branchen zuordenbare CRF 2-Gruppen	jeweilige Produktionsmenge	(verschieden)
Produktherstellung/-nutzung	Produktionsmenge u.a.	-3%*
alle nicht zu Branchen zuordenbaren CRF 2- Gruppen	Bevölkerung u.a.	(verschieden)

*) bezogen auf die Branchen mit Produktionsmenge als Mengentreiber

Tabelle Prognos.

6.1.3. Modellparameter

Das Industriemodell benötigt einen minimalen Satz an Modellparametern, um den Energiebedarf sowie die Treibhausgasemissionen zur Herstellung von Gütern zu berechnen. Ein wesentlicher Parameter ist die Produktionsmenge jeweils von Grundstoffen/Baustoffen, weiterverarbeiteten Gütern und Konsumgütern. Erstere liegen in physischen Mengen (Tonnagen) vor, die beiden letzteren sind anhand von monetären Grössen auf Basis der Wirtschaftsleistung (Wertschöpfung) abgebildet (siehe Tabelle 16). Für die Basisentwicklung der Produktionsmengen nutzen wir noch die feine Branchenauflösung und die jeder Branche zugrundeliegenden Trends, die jeweils aus der historischen Entwicklung entweder der Produktionsmenge oder der Bruttowertschöpfung stammen (siehe Tabelle 16, letzte Spalte). Material- bzw. Ressourceneffizienz wird hier implizit mit abgebildet.

Weiter sind technologiespezifische Parameter wie Effizienz, Substitution und CCS relevant. Effizienz im hier verwendeten Kontext meint die Reduktion des spezifischen Energie- oder Treibhausgaseinsatzes, wobei als Referenzmass der jeweilige Mengentreiber dient. Die Energieträgersubstitution beschreibt den Ersatz von einem Energieträger durch einen anderen bei demselben Prozess. Da eine produzierende Anlage meist an den Einsatz eines bestimmten Energieträgers gebunden ist, geht eine Energieträgersubstitution oft einher mit dem Ersatz einer Anlage am Ende ihrer Lebensdauer durch eine neue Anlage, welche (möglicherweise) mit einem anderen Energieträger, einem anderen Brennstoffanteil bzw. einer anderen Technologie/einem anderen (u. U. treibhausgasarmen) Produktionsverfahren betrieben wird. Mögliche Effizienzgewinne durch eine Energieträger-Substitution (insbes. durch Elektrifizierung) werden berücksichtigt. Schliesslich dient CCS als End-of-Pipe-Lösung zur CO₂-Abscheidung von schwierig oder kaum zu dekarbonisierenden Prozessen.

Als letzte Parametergruppe sind die Rahmendaten Bevölkerung und Wirtschaftsleistung (BIP) zu nennen. Alle korrelieren positiv mit der Produktionsmenge sowie der Energiebezugsfläche (EBF), in unterschiedlicher Ausprägung. Die EBF wird vom Modell als Mengentreiber für Haustechnikprozesse (wie z.B. Raumwärme) herangezogen.

6.2. Bestehende Arbeit und Daten

6.2.1. Bestehende Arbeiten

Seit vielen Jahren und in mehreren Vorhaben lässt das Bundesamt für Energie (BFE) eine modellgestützte Analyse des Energieverbrauchs der Industrie durchführen. In der jährlich wiederkehrenden «Ex-Post-Analyse»⁶⁹ wird die statistisch beobachtete Entwicklung des Energieverbrauchs anhand der wichtigsten Bestimmungsfaktoren und Verwendungszwecke erklärt.

⁶⁹ <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/energieverbrauch-nach-verwendungszweck.html>

Sowohl diese als auch die Szenarienarbeit für die «Energieperspektiven 2050+» wurden mit dem vorliegenden Industriemodell bearbeitet. Dabei wurden Pfade für die zukünftige Entwicklung des Energieverbrauchs sowie der Treibhausgasemissionen der Schweizer Industrie anhand mehrerer szenarischer Schwerpunktsetzungen und Rahmenbedingungen entwickelt.

Das Industriemodell – in seiner hier genutzten vereinfachten und angepassten Version – eignet sich gut für die Beantwortung der Fragen und insbesondere die Berechnung der Treibhausgasemissionen innerhalb des SSP-CH-Projekts.

6.2.2. Ausgangsdaten

Ausgangsdaten (Inputs) sind alle exogenen Daten (bzw. Rahmendaten), die in die Modellierung eingehen. Wo verfügbar, werden empirische Daten direkt oder indirekt als Inputgrössen genutzt. Die Ausgangsdaten beeinflussen mehr oder weniger stark den Energieverbrauch; umgekehrt hat der Energieverbrauch selbst keinen oder nur einen sehr geringen (rückkoppelnden) Einfluss auf die Ausgangsdaten. Sie sind exogen auf Jahresbasis vorgegeben oder werden (linear) auf die Stichjahre interpoliert. Das Modell unterscheidet drei Typen: branchenübergreifende (z.B. sozioökonomische), branchenspezifische sowie anlagenspezifische Ausgangsdaten:

- Branchenübergreifende Inputdaten
 - Bevölkerung und Bevölkerungsstruktur (BFS: Bilanz der ständigen Wohnbevölkerung, Bevölkerungsdaten der SSPs-CH)
 - Wirtschaftswachstum (BFS: VGR, Bruttoinlandprodukt, BWS-Daten der SSPs-CH)
 - Energiepreise (Konsumentenpreise) für Energieträger (BFE: GEST, Entwicklung der Energiepreise für Konsumenten)
 - Wetter- und Klimadaten (Heiz-, Kühlgradtage und Sonneneinstrahlung) (MeteoSchweiz)
 - Förderprogramme (Übersichten vom BFE und Energiefranken)
- Branchenspezifische Inputdaten
 - Energieverbrauch (nach Branchen/Produkten und Energieträgern)
 - Gesamtenergiestatistik (BFE: GEST)
 - Teilstatistiken (BFE: Energieverbrauchsstatistik in der Industrie und im Dienstleistungssektor; schweizerische Statistik der erneuerbaren Energien; Thermische Stromproduktion inkl. Wärme-Kraft-Kopplung (WKK) in der Schweiz; Schweizerische Holzenergiestatistik)
 - Produktionsmenge (verschiedene Quellen je Branche/Produkt: Verbandsinformationen, Inventarberichte des BAFU)
 - Produktionsindex (BFS: INDPAU - Produktions-, Auftrags- und Umsatzstatistik im sekundären Sektor - vierteljährliche Zeitreihen)
 - Monetäre Grössen

- Wertschöpfung (BFS: Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung, Produktionskonto nach Branchen)
- Umsatz (BFS: INDPAU - Produktions-, Auftrags- und Umsatzstatistik im sekundären Sektor - vierteljährliche Zeitreihen)
- Personalkosten und Betriebsaufwand (BFS: Produktions- und Wertschöpfungsstatistik, Struktur der Erfolgsrechnung der Unternehmen nach Wirtschaftsabteilungen)
- Erwerbstätige (BFS: Beschäftigungsstatistik (BESTA) - Vollzeitäquivalente nach Wirtschaftsabteilungen)
- Energiebezugsflächen (Wüest Partner: Aktualisierung Energiebezugsflächen)
- Anlagenspezifische Inputdaten
 - Technologiekennwerte (spezifischer Energieverbrauch, prozessbedingte Emissionen)
 - Best-Practice-Werte und Beste Verfügbare Technologien
 - Alternative und konkurrierende Produktionsverfahren
 - Querschnittstechnologien (bspw. Elektromotoren, Druckluft, Wärmedämmung)
 - Investitionskosten (CAPEX)

Um Informationen zu anlagenspezifischen Rahmendaten zumindest für die energetisch und emissionsseitig relevantesten Branchen/Produkte zusammenzustellen, ist es erforderlich, viele verschiedene Veröffentlichungen heranzuziehen. Als Quellen dienen hierfür neben den offiziellen Veröffentlichungen der Bundesämter für Statistik und Energie, auch Veröffentlichungen von Verbänden, Fachveröffentlichungen, Papers, Benchmark-Analysen u. a. Für die meisten Rahmendaten existieren jährliche Zeitreihen ab 1990 bis zum jeweils letzten Jahr, für welches statistische Daten vorliegen. Einige wenige zentrale SSP-spezifische Rahmendaten ersetzen die im Modell hinterlegten Rahmendaten, nämlich die Bevölkerung, die Wirtschaftsleistung und Rahmendaten, die mit diesen beiden korrelieren.

6.2.3. Plausibilisierung der Daten im Jahr 2023

Das Industriemodell ist auf die verwendeten Statistiken und Datenquellen kalibriert und reproduziert diese im Allgemeinen mit hoher Genauigkeit bzw. Unsicherheiten von wenigen Prozent. Im Rahmen dieses Projektes wurde nicht nur auf Sektor-interne, sondern auch auf Sektor-übergreifende Konsistenz geachtet und eingehalten. Bspw. muss der Einsatz von Biomasse zur Energieerzeugung adäquat über Industriebranchen und Sektoren hinweg und entlang der Zeitachse ablaufen.

6.3. Beschreibung Szenarien für Sektor Industrie

6.3.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

SSP0-CH

Der starke Ausbau erneuerbarer Energieproduktion benötigte Ressourcen, wie Beton, Stahl etc., was die durch den Konsumrückgang reduzierte Produktion energieintensiver Bereiche bis zur Mitte des Jahrhunderts teilweise aufhebt. Erst danach beginnt die Produktion energieintensiver Unternehmen deutlich zu sinken. Am Ende des Jahrhunderts sind energieintensive Industrien teils in den energiesicheren Mittelmeerraum abgewandert, teils ist ihre Produktion geschrumpft, weil die Nachfrage nach ihren Produkten stark zurückgegangen ist.

SSP1-CH

Der starke Ausbau erneuerbarer Energieproduktion benötigte Ressourcen, wie Beton, Stahl etc. Die in der Produktion verwendeten Materialien werden fast vollständig recycelt, Materialkreisläufe wo immer möglich geschlossen, die Produktion ist sehr energieeffizient. Die allgemeine Produktelebensdauer ist gestiegen, der Konsum ist dadurch leicht gesunken. Gleichzeitig ist die Bevölkerung gewachsen.

SSP3-CH

Die Produktion energieintensiver Unternehmen ist auf ein Minimum gesunken: Wegen der unsicheren Energiesituation sind die Unternehmen entweder in energiesicherere Gegenden abgewandert oder haben die Produktion – auch wegen fehlender Nachfrage (wegen Bevölkerungsrückgang, sinkendem Konsum, fehlender Bautätigkeit etc.) - eingestellt.

SSP4-CH

Teile der Produktion energieintensiver Unternehmen werden staatlich subventioniert (Preisschwankungen dadurch ausgeglichen) und so in der Schweiz gehalten. Andere Teile der Industrie (insbesondere gut transportierbare Güter) wandert ab in energiereiche Gebiete; es findet eine Zunahme der internationalen Spezialisierung statt, der Import von grauer Energie ist somit hoch.

SSP5-CH

Die Schweizer Industrie ist abhängig von langfristigen Energieverträgen für fossile Energieträger - Preise können je nach Vertragsauflösung stark und sprunghaft ansteigen. Der Staat stützt die energieintensiven Industrien, um Preisschwankungen abzufedern. Die Produktion ist bis in die zweite Hälfte des Jahrhunderts hoch: die Bevölkerung mit einem hohen

Konsumniveau nimmt zu, flächenintensive Wohn- und Verkehrsinfrastruktur wird zugebaut. Mit der abnehmenden Wirtschaftsleistung ab Mitte des Jahrhunderts und entsprechend schrumpfendem Staatshaushalt, kann die Stützung der Industrie nicht aufrechterhalten werden. Die Instabilität und teilweise teuren Energiepreise lassen immer grössere Anteile der energieintensiven Industrien abwandern. Der Anteil der Produktion von energieintensiven Unternehmen an der Gesamtproduktion bleibt relativ hoch, aber insgesamt geht die Produktion zurück, auch wegen der sinkenden Nachfrage durch Bevölkerungsrückgang und teuren Energiepreisen.

6.3.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

SPA0 – Status Quo

Die derzeitige Schweizer Industriepolitik ist gekennzeichnet durch die Konzentration auf einen Kohlenstoffpreismechanismus (ETS), der in das EU-System eingebettet ist, und ausgewählte regulatorische und finanzielle Anreize (Zielvereinbarungen, F&E-Ausgaben). Die grösste Herausforderung zur Erreichung eines klimaneutralen Industriesektors besteht darin, schwer vermeidbare Emissionen besonders in der Zement- und anderen Baubranchen zu reduzieren und gleichzeitig auf den (internationalen) Märkten wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Industriepolitik liegt weitgehend in der Verantwortung der Bundesverwaltung (Emissionshandelssystem, Regulierung von F-Gasen usw.) und zu einem geringen Teil auf kantonaler/kommunaler Ebene (Besteuerung, Genehmigungen usw.).

SPA1 – Grüner Staat

Die Schweizer Industriepolitik unter dem Grünen Staat zeichnet sich durch eine ehrgeizigere Ausgestaltung des Emissionshandelssystems (ETS) und eine gleichzeitige Abfederung der Belastungen der Schweizer Industrie hinsichtlich internationalen Wettbewerbs durch eine gezielte Industriepolitik aus, darunter Kohlenstoffgrenzausgleichsmechanismus (CBAM) und Differenzverträge. Ein weiterer Schwerpunkt sind verbindliche Zielvorgaben für die Kreislaufwirtschaft auf Unternehmensebene und Verbote für ausgewählte F-Gase.

SPA2 – Ökologische Republik

Die Schweizer Industriepolitik unter der Ökologischen Republik zeichnet sich vor allem durch eine ambitioniertere Ausgestaltung des Emissionshandelssystems (ETS) aus. Ein weiterer Schwerpunkt sind verpflichtende Ziele für die Kreislaufwirtschaft auf Unternehmensebene und gesetzliche Verbote für ausgewählte F-Gase. Finanzielle Subventionen für Forschung und Entwicklung (FuE) sind verfügbar, aber die kostspielige Industriepolitik ist begrenzt, die Erhaltung

der Wettbewerbsfähigkeit auf internationalen Märkten erfolgt durch Grenzregulierung (CBAM). Innovation in der Privatwirtschaft wird durch Anschubfinanzierung und flexible Zielvereinbarungen unterstützt.

SPA3 – Ordoliberaler Staat

Die Schweizer Industriepolitik unter dem ordoliberalen Regime ist durch einen Laissez-faire-Ansatz für die Unternehmenstätigkeit gekennzeichnet. Das Emissionshandelssystem wird zwar beibehalten, aber seine Zielvorgaben werden nicht erhöht und das Ambitionsniveau wird nur durch Marktmechanismen (mehr Versteigerungen) bestimmt. Die CO₂-Abgabe und die Zielvereinbarungen werden nicht mehr umgesetzt und die Regulierung wird auf ein Minimum beschränkt (Arbeitsschutz usw.). Politische Innovationen auf EU-Ebene werden in der Regel übernommen, wenn die staatlichen Eingriffe dadurch nicht zu stark zunehmen (z.B. nimmt die Schweiz am Mechanismus zur Angleichung der CO₂-Grenzwerte teil).

SPA4 – Kompensierender Staat

Die Schweizer Industriepolitik unter dem kompensierenden Staat zeichnet sich durch eine starke Abfederung (Schutz vor hohen CO₂-Kosten) der kohlenstoffintensiven Schweizer Industrie gegenüber dem internationalen Wettbewerb aus. Die CO₂-Abgabe und die Zielvereinbarungen werden abgeschafft und die Regulierung wird auf ein Minimum reduziert (Arbeitsschutz etc.). Eine Kompensation für hohe Energiekosten wird eingeführt. Das Emissionshandelssystem wird beibehalten, allerdings mit grossen Mengen an kostenlosen Zertifikaten für die Industrie. Politische Neuerungen auf EU-Ebene werden in der Regel übernommen, wenn sie zum Schutz der Schweizer Industrie beitragen (z.B. Teilnahme der Schweiz am Mechanismus zur Anpassung der Kohlenstoffgrenzen).

6.4. Modellierung

6.4.1. Basisentwicklung

Zur Bestimmung der Pfade von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen bedienen wir uns eines Basisszenarios. Dieses führt die technischen Entwicklungen und politischen Instrumente aus der Vergangenheit in die Zukunft fort. Es findet demnach keine Nachjustierung statt, die auf bestimmte Ziele abzielen würde, bspw. auf eine Netto-Null Zielerreichung 2050. Damit kommt hier implizit das SPA0 als Referenz der Intensität der Instrumente zur Anwendung. Die zugrunde gelegten Änderungen der Produktionsmengen setzen in der Basisentwicklung historisch bestehende Trends bis ins Jahr 2100 fort. Sie sind in Tabelle 16 aufgezeigt.

Für die Basisentwicklung liegen alle Parameter auf Basis einer eigenen Trendfortschreibung der SSPs vor. Zusammen mit der Wirkungsmatrix (s.u.) ist es möglich, durch die Änderung der

Parameter zwischen Basisentwicklung und jeweiligem SSP auf eine Änderung der Modellparameter zu schliessen (analog zu Elastizitäten) (siehe Kapitel 2.2).

6.4.2. Wirkungsmatrix Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

6.4.2.1. Szenarioparameter

Die Wirkungsmatrix verknüpft die für den jeweiligen Industriesektor relevanten Szenarioparameter der SSPs-CH mit den Modellparametern (Einleitung zur SSP-CH-Wirkungsmatrix siehe Kapitel 3.2). Manche Szenarioparameter werden nicht in der ursprünglichen Definition herangezogen, sondern gekoppelt. So benötigt das Modell als Input BIP, das sich aus den Szenarioparametern «BIP pro Kopf» und «Wohnbevölkerung» leicht bestimmen lässt (siehe Tabelle 17). Zudem wird dort angegeben, wie die aus den Workshops abgeleiteten qualitativen Änderungen der einzelnen Szenarioparameter interpretiert werden. Wenn dort bspw. die Produktnutzungsdauer deutlich ansteigt («+3»), so nehmen wir an, dass die Produktnutzungsdauer um 33% ansteigt bzw. die Produktions-/Importrate der Güter dementsprechend sinkt. Diese Übersetzung ist ebenfalls rein qualitativ motiviert und stützt sich auf die Aussagen der Stakeholder-Workshops sowie auf Erfahrungswerte der Modellierenden. Werte zwischen ± 3 werden jeweils linear interpoliert.

Die Veränderung der Szenarioparameter wurde im Industriesektor teilweise anders übersetzt als in den anderen Sektoren. Der Grund ist, dass wir diese Parameter im Industriesektor auf andere Art interpretiert haben als in den anderen Sektoren bzw. die Parameter einen anderen Einfluss haben (u.a. Produktnutzungsdauer: bezieht sich überwiegend auf Grundstoffe und nicht auf Konsumgüter, Konsumniveau: berücksichtigt nur die inländisch produzierten Güter und keine Importe, Fortschrittlichkeit: Überlagerung von Energieeffizienz und Emissionsintensität).

Tabelle 17: Szenarioparameter Industrie

Szenarioparameter	Modellparameter (Modellinput)	Übersetzung der qualitativen Änderungen ggü. Basisentwicklung (Bandbreiten)
Wohnbevölkerung	Bevölkerung	-*
BIP pro Kopf	BIP (absolut)	-*
Anteil erneuerbarer am Gesamtmix	Anteil nicht-fossiler Energieträger am Industriemix	0.55**
Produktion energieintensiver Güter	(dito)	±3 → ±33%
Wohnraum pro Kopf	Wohnraum (absolut)	±3 → ±22%
Produktenutzungsdauer	(dito)	±3 → ±33%
Internationale Handelsströme	Selbstversorgungsgrad (Mittelwert)	±3 → ±50%
Ökonomische Integration		
Individuelles Konsumniveau	Individueller Konsum	+/-3 → +100/-50%
Ausbildungsstand/Qualifikation	(dito)	+/-3 → +100/-50%
Innovationstätigkeit	Fortschrittlichkeit (Mittelwert)	±3 → +100/-50%
Effizienz in der Produktion		
Umweltbewusstsein	Öko-Technologien (Mittelwert)	+/-3 → +100/-50%
Technologie-Akzeptanz		

*) Für diese Parameter existiert bereits eine quantitative Vorgabe aus den SSP-CH.

**) Keine Änderungsrate, sondern der tatsächliche EE-Anteil am Energieträgermix. Für den «Anteil nicht-fossiler Energieträger am Industriemix» wurden die aus den Workshops bestimmten Änderungsraten beim «Anteil erneuerbarer am Gesamtmix» übernommen und um den angegebenen Wert skaliert, um die 100%-Marke nicht zu überschreiten.

Tabelle Prognos.

6.4.2.2. Zusammenhang zwischen Szenarioparameter und Modellparametern

In einem weiteren Schritt werden die genutzten Szenarioparameter mit den zentralen Modellparametern korreliert, zumindest wo eine Kausalität besteht oder inhaltliche Nähe erwartet wird. Bspw. hängt die Produktion von Baustoffen (Zement, Fensterglas, Ziegel, usw.) u.a. von der Bautätigkeit bzw. der Änderung des Wohnraumes ab. Die resultierende Gewichtungsmatrix von Szenarioparametern zu Modellparametern ist in Tabelle 18 genannt.

Tabelle 18: Gewichtungsmatrix Szenarioparameter bzw. Modellinput zu Modellparameter

Modellparameter	Grundstoffe / Baustoffe	Weiterverarbeitete Güter	Konsumgüter	Produktionsverfahren (fossil vs. THG-arm)	Effizienz (QTs) / Spezifischer Verbrauch	CCS	Substitution / Brennstoffanteil	Bevölkerung	BIP	Beschäftigte / EBF
Wohnbevölkerung	m=-1,451 b=0,005 r2=0,00 6	m=-0,739 b=0,036 r2=0,00 4	m=1,51 b=-0,014 r2=0,05 3					+1,000		m=1,57 b=-0,022 r2=0,05 8
Wohnraum (aus Wohnraum pro Kopf x Wohnbevölkerung)	m=-1,477 b=0,014 r2=0,00 4									
BIP (aus BIP pro Kopf x Wohnbevölkerung)	m=1,18 b=0 r2=0,14 9	m=2,36 b=-0,004 r2=0,63 5	m=0,33 b=0 r2=0,09 6	m=0,4 b=-0,015 r2=0,04 6	m=2,01 b=0 r2=0,05 4			+1,000		m=0,10 b=-0,01 r2=0,00 4
Anteil nicht-fossiler Energieträger am Industriemix							0,634			
Produktion energieintensiver Güter	+1,000									
Nutzungsdauer von Produkten	-1,000		-1,000							
Selbstversorgungsgrad	m=0,30 b=0,002 r2=0,00 6	m=0,08 b=0,032 r2=0,00 1	m=0,32 b=0,004 r2=0,06 6	m=0,01 b=-0,009 r2=0 5	m=0,97 b=-0,011 r2=0,00 7		m=0,07 b=0,014 r2=0,00 6			
Individueller Konsum			+1,000							

Ausbildungsstand/Qualifikation	m=0,13 2 b=0 r2=0,47 2	m=0,08 8 b=0 r2=0,31 1	m=0,02 2 b=0 r2=0,10 9	m=0,00 7 b=- 0,01 r2=0,00 8	m=0,39 b=0 r2=0,51	m=0,00 1 b=0,009 r2=0	m=0,01 1 b=- 0,009 r2=0,02 3
Fortschrittlichkeit				-1,000	-1,000		
Öko-Technologien				m=- 0,357 b=- 0,007 r2=0,09 6	ja/nein		

Legende:

blau = lineare Korrelation zwischen Szenario- und Modellparameter, Ergebnis: m (Steigung), b (Offset) und r^2 (Bestimmtheitsmass, entspricht dem quadratischen Korrelationskoeffizienten)

rot = positive Korrelation (maximal +1)

orange = negative Korrelation (minimal -1)

grün = binäre Entscheidung (ja/nein)

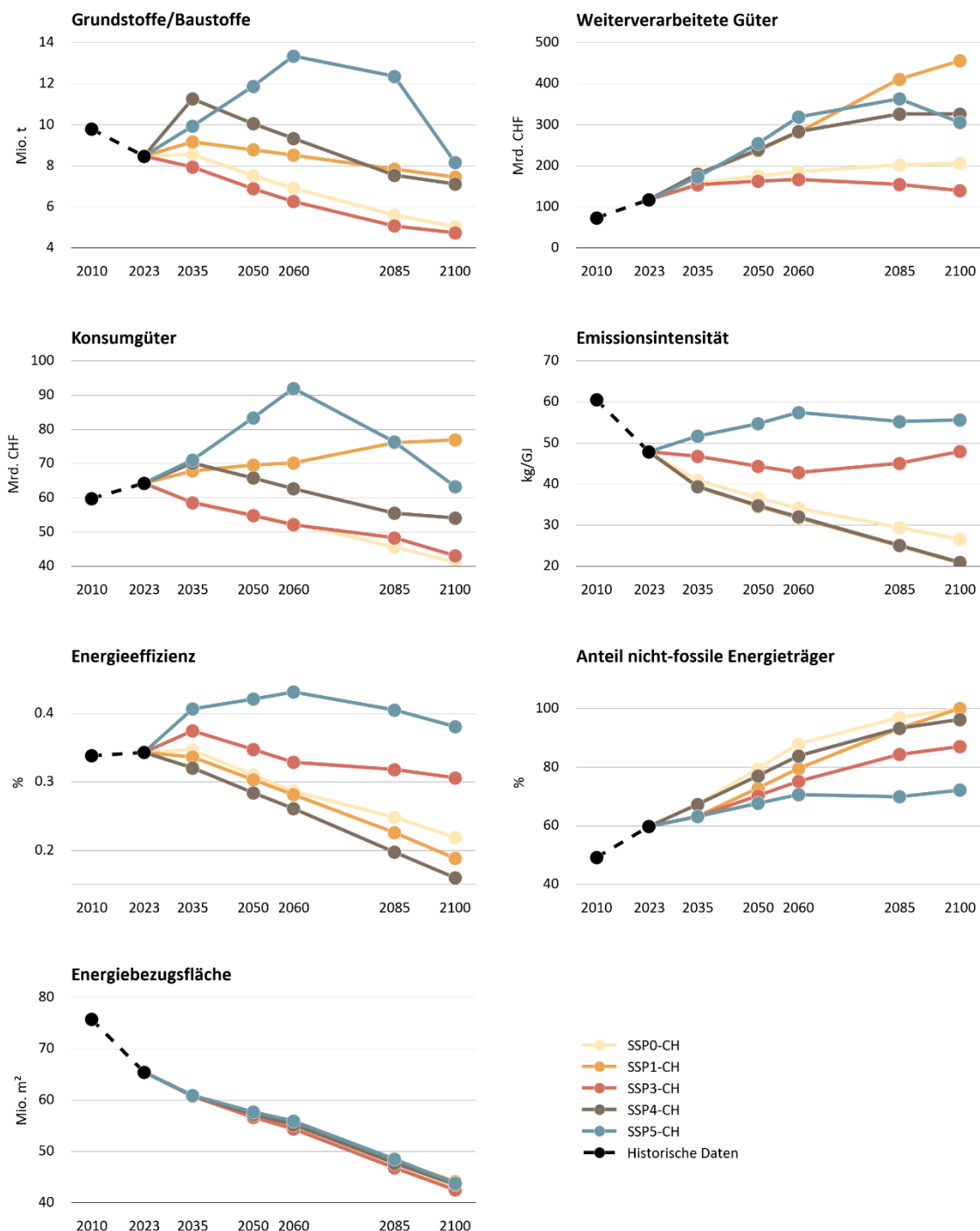
Abkürzungen:

BIP = Bruttoinlandsprodukt / BWS = Bruttowertschöpfung / THG = Treibhausgase / QT = Querschnittstechnologien / EBF = Energiebezugsfläche

Tabelle Prognos.

Wir haben die Änderungsraten der historischen Zeitreihen (überwiegend von 1990 bis 2023) der Parameter-Paare linear korreliert und so deren Elastizitäten bestimmt. Die gefitteten und mit dem Bestimmtheitsmass gewichteten Elastizitäten sind generell gültig, d.h. sie werden über alle SSPs-CH konstant belassen. Bei mehreren Szenarioparametern je Modellparameter werden die auf den Elastizitäten beruhenden Änderungen addiert. Die resultierenden Pfadentwicklungen der einzelnen Modellparameter unter Berücksichtigung der SSP-CH-spezifischen Entwicklungen der Szenarioparameter sowie der (konstanten) Elastizitäten ist in Abbildung 25 dargestellt.

Abbildung 25: Pfade zentraler Modellparameter je SSP



Hinweis: Die ersten drei Parameter bezeichnen die jeweilige Produktionsmenge (physisch bzw. monetär).

Grafik Prognos.

Aus den Pfaden werden die jeweiligen SSP-CH-Annahmen ersichtlich. So steigen die Produktionsmengen im SSP5-CH durchweg an und auch in den SSPs-CH 4 und 1 kommt es z.T. zu einer verstärkten Produktion. Wohingegen die beiden SSPs-CH 0 und 3 durchweg sinkende Produktionsmengen in Bezug auf die Basisentwicklung zeigen. Ein ähnliches Bild geben Emissionsintensität und Energieeffizienz ab: Die SSPs-CH 5 und 3 liegen über, die SSPs-CH 4, 1 und 0 unter der Basisentwicklung, d.h. weisen eine niedrigere Emissionsintensität und höhere Energieeffizienz auf. Der Anteil nicht-fossiler Energieträger (Erneuerbare Energieträger-Anteil; EE-Anteil) weist eine abweichende Fächerung auf: Hier liegen alle SSPs-CH im Mittel über der Basisentwicklung (auch wenn sich SSP5-CH zum Ende der Laufzeit wieder an die Basisentwicklung angleicht). Dies ist ein direktes Resultat der Workshops, in denen nirgends ein Rückgang der EE-Anteile (am Gesamtmix) bis 2100 gesehen wurde, auch nicht bei SSP5-CH. Diejenigen SSPs-CH mit zukünftig hohem EE-Anteil (SSPs-CH 0, 1 und 4) emittieren entsprechend zukünftig keine oder kaum Treibhausgase für die Energiebereitstellung. Bei der Energiebezugsfläche, welche den Gebäudeenergiebedarf (Raumwärme, Beleuchtung, u.a.) bestimmt, liegen alle SSPs-CH aus verschiedenen Gründen unter der Basisentwicklung, weisen jedoch einen vernachlässigbaren Fächer untereinander auf, was auf eine sehr geringe Korrelation dieses Modellparameters mit den Szenarioparametern zurückzuführen ist.

6.4.3. Ausgestaltung SPA

Die SPAs, also die möglichen, in den jeweiligen SSP-CH wirkenden politischen Klimaschutz-Instrumente, überlagern bzw. verstärken die Entwicklung der SSPs-CH zusätzlich (siehe Kapitel 3.2). Die qualitative Beschreibung der SPAs in Kapitel 6.3 legt den Grundtenor der Wirkrichtung und Ambition. Um die konkret gewählten politischen Instrumente zu bestimmen, haben wir ein mehrstufiges Verfahren genutzt: In einem ersten Schritt wurden in der Schweiz und insbesondere international bestehende Politiken recherchiert, die direkt oder indirekt den Industriesektor adressieren. Weiter haben wir die recherchierten Politiken aufbereitet und hinsichtlich des Wirkmechanismus und der potenziellen Wirkhöhe in der Schweizer Industrie klassifiziert. Dafür wurden die Politiken den Kategorien Autorität (z.B. Gesetze), Finanzen (z.B. Förderprogramme), Organisation (z.B. Informationen) and Strategie (Strategien) zugeordnet. Anhand dieser Kategorien lassen sich die Wirkrichtungen der einzelnen SPAs abbilden und die Wirkung auf bestimmte zentrale Aspekte (CO₂-Preis, Grüne Produktion, Effizienz, Energiepreise, F-Gase, CCS/NET und Circular Economy) qualitativ abschätzen. Tabelle 19 führt die anhand dieser Methode bestimmten Politiken je SPA auf.

Tabelle 19: Politiken je SPA im Industriesektor

SPA und Politiken	Datum Einführung	Instrumententyp	Wirkung	Gesamtwirkung auf Wirkfelder / Modellparameter
SPA0 – Status Quo				
Emissionshandelssystem	alle bereits eingeführt	Autorität	CO ₂ -Preis: hoch	CO ₂ -Preis / Emissionsintensität: hoch
CO ₂ -Abgabe oder verbindliche Zielvereinbarungen		Autorität	CO ₂ -Preis: hoch	
Finanzielle Unterstützung für kohlenstoffarme Produktionsverfahren		Finanzen	Grüne Produktion: gering	Grüne Produktion / Emissionsintensität: gering
Klima- und Innovationsgesetz (KIG)		Finanzen	Effizienz: hoch	Effizienz / Energieeffizienz: sehr hoch
Rückerstattung der Stromnetzkosten		Finanzen	Energiepreise: mittel	Energiepreise / Energieeffizienz: gering
Förderung durch die Klimastiftung Schweiz		Finanzen	Effizienz: mittel	
ISO-Normen		Autorität	Effizienz: gering	F-Gase / Emissionsintensität: keine CCS/NET / Emissionsintensität: keine Circular Economy / kein Wirkungsfeld: keine
SPA1 – Grüner Staat				
SPA0: alle ausser Rückerstattung der Stromnetzkosten	eingeführt	s.o.	s.o.	CO ₂ -Preis / Emissionsintensität: sehr hoch
Klimaverträge (Carbon Contracts for Difference, CcFd)	bis 2050	Finanzen	Grüne Produktion: hoch	Grüne Produktion / Emissionsintensität: sehr hoch
Verbot von F-Gasen (HFKW)	bis 2050	Autorität	F-Gase: hoch	Effizienz / Energieeffizienz: sehr hoch
ETS-«Endgame»: Umwandlung in ein Instrument zur Finanzierung von CCS/NET	bis 2050	Autorität	CCS/NET: hoch	Energiepreise / Energieeffizienz: keine
Aufgestocktes P&D-Programm: Netto-Null-Technologie-Programm	bis 2050	Finanzen	Grüne Produktion: hoch	F-Gase / Emissionsintensität: keine
Strategie für Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen	bis 2050	Strategie	Grüne Produktion: hoch	
Verringerung der ETS-Obergrenze (Cap)	bis 2050	Autorität	CO ₂ -Preis: hoch	

Verbindliche, spezifische Emissionsreduktionspfade für einzelne Unternehmen mit Sanktionsmechanismus	bis 2050	Autorität	Grüne Produktion: hoch	sehr hoch CCS/NET / Emissionsintensität: mittel Circular Economy / kein Wirkungsfeld: mittel
SPA2 – Ökologische Republik				
SPA0: komplett	eingeführt	s.o.	s.o.	CO ₂ -Preis / Emissionsintensität: sehr hoch
ETS-«Endgame»: Umwandlung in ein Instrument zur Finanzierung von CCS/NET	bis 2050	Autorität	CCS/NET: hoch	Grüne Produktion / Emissionsintensität: mittel
Strategie für Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen	bis 2050	Strategie	Grüne Produktion: hoch	Effizienz / Energieeffizienz: sehr hoch
Subventionen für Anwendungen der Kreislaufwirtschaft	bis 2050	Finanzen	Circular Economy: mittel	Energiepreise / Energieeffizienz: gering
Finanzielle Unterstützung für den schrittweisen Ausstieg aus F-Gasen	bis 2050	Finanzen	F-Gase: mittel	F-Gase / Emissionsintensität: gering
Verringerung der ETS-Obergrenze (Cap)	bis 2050	Autorität	CO ₂ -Preis: hoch	CCS/NET / Emissionsintensität: mittel Circular Economy / kein Wirkungsfeld: gering
SPA3 – Ordoliberaler Staat				
SSPO: nur EHS, Finanzielle Unterstützung, ISO-Normen	läuft weitgehend aus bis 2035	s.o.	s.o.	CO ₂ -Preis / Emissionsintensität: hoch
Strategie für Sektoren mit schwer vermeidbaren Emissionen	ab 2050	Strategie	Grüne Produktion: hoch	Grüne Produktion / Emissionsintensität: mittel Effizienz / Energieeffizienz: gering Energiepreise / Energieeffizienz: keine F-Gase / Emissionsintensität: keine CCS/NET / Emissionsintensität: keine Circular Economy / kein

			Wirkfeld: keine
SPA4 – Kompensierender Staat			
SSPO: nur ISO-Normen	s.o.	s.o. Energiepreise: hoch	CO ₂ -Preis / Emissionsintensität: keine
Energiekostenausgleich bzw. Subventionen für die Schwerindustrie	Finanzen		Grüne Produktion / Emissionsintensität: keine Effizienz / Energieeffizienz: mittel Energiepreise / Energieeffizienz: mittel F-Gase / Emissionsintensität: keine CCS/NET / Emissionsintensität: keine Circular Economy / kein Wirkungsfeld: keine

Tabelle Prognos.

Weiter haben wir die Wirkfelder den betroffenen Modellparametern zugeordnet:

- CO₂-Preis und Grüne Produktion à Emissionsintensität; Anteil nicht-fossile Energieträger (bewusst ohne Einfluss auf die Produktionsmengen)
- Effizienz und Energiepreise à Energieeffizienz
- F-Gase und CCS/NET à Emissionsintensität (nur Prozessemissionen bzw. Zementindustrie),
- Circular Economy à keine (bewusst ohne Einfluss auf die Produktionsmengen; auslassen, weil direkte Wirkung auf Modellparameter nicht abbildbar)

Anschliessend haben wir die Wirkhöhe je SPA als Summe der Einzelwirkungen je Wirkfeld bestimmt, je Modellparameter aufaddiert und final den Unterschied zur Basisentwicklung pseudo-quantifiziert (siehe Tabelle 20). CCS wird in der Tabelle der Vollständigkeit halber genannt, jedoch in Kapitel 11 näher beschrieben.

Tabelle 20: Wirkfelder und Wirkhöhe der SPAs Industriesektor

Modellparameter	SPA-Wirkfelder	Änderung der Wirkhöhe ggü. SPA0*			
		SPA1	SPA2	SPA3	SPA4
Emissionsintensität	CO ₂ -Preis Grüne Produktion	+21%	+9%	-1%	-9%
Anteil nicht-fossile Energieträger	CO ₂ -Preis Grüne Produktion	+21%	+9%	-1%	-9%
Energieeffizienz	Effizienz Energiepreise	-3%	+16%	-9%	-5%
Emissionsintensität (nur Prozessemissionen)	F-Gase	+100%**	+20%	±0%	±0%
Emissionsintensität (nur Zement)	CCS/NET	+100%**	+80%	±0%	±0%

*) «+» meint eine Verbesserung (Senkung) und «-» eine Verschlechterung (Steigerung) hinsichtlich der THG-Emissionen

***) im SPA1 werden F-Gase verboten und alle Zementwerke mit CCS ausgestattet (maximale Wirkhöhe des SPA)

Tabelle Prognos.

6.5. Ergebnisse und Diskussion

6.5.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

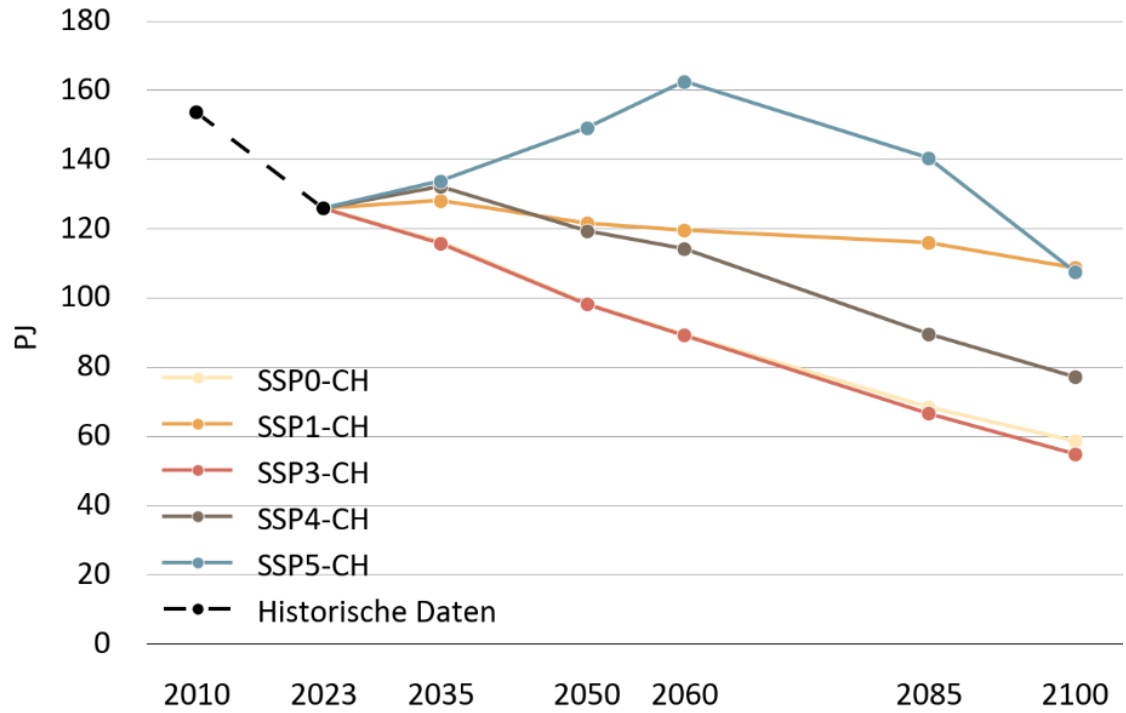
6.5.1.1. Endenergieverbrauch

Der Endenergieverbrauch (EEV) nach Energieträgern im Industriesektor ist für alle SSPs-CH in Abbildung 26 und Abbildung 27 dargestellt. Bereits in der Vergangenheit (2010 bis 2023) war ein Rückgang von 18 % beim EEV zu verzeichnen, wobei der Anteil fossiler Energieträger bereits um 12 % rückläufig ist und gleichzeitig die Bedeutung des Stroms ansteigt (+5 %). Diese grundlegenden Trends der jüngeren Vergangenheit setzen sich in den einzelnen SSPs-CH fort.

Lediglich SSP5-CH weist mit einem zwischenzeitlich ansteigenden EEV, der erst zum Ende des Jahrhunderts aufgrund des wirtschaftlichen Rückganges abnimmt, und auch zukünftig einem relevanten Anteil fossiler Energieträger (10 % im Jahr 2100) eine deutliche Abweichung zu den anderen SSPs-CH auf. SSP0-CH und SSP3-CH weisen mit je über 50 % den grössten EEV-Rückgang bis 2100, allerdings aus unterschiedlichen Gründen: Eine suffiziente Gesellschaft in SSP0-CH impliziert geringere Produktionsmengen der Güter, die dann weniger und länger genutzt werden. Hingegen begründet sich der EEV-Rückgang in SSP3-CH mit der einerseits abnehmenden Bevölkerung und andererseits mit dem wirtschaftlichen Abstieg der Schweiz. Beide Parameter führen ebenfalls zu einer merklichen Reduktion der Güterproduktion im Inland. SSP1-CH zeichnet sich durch eine effiziente, jedoch auch konsumfreudige Gesellschaft aus, weshalb der EEV perspektivisch nurmehr langsam sinkt um insgesamt 15 % bis 2100. Dabei überwiegt die stetig bessere Energieeffizienz gegenüber der stark wachsenden Bevölkerung bzw. gegenüber der Zunahme bei der Herstellung von Gütern. In SSP4-CH gehen deutliche Wohlstandseinbussen in grossen Teilen der Bevölkerung einher mit einer leicht sinkenden Bevölkerung zum Ende des Jahrhunderts. Dies führt vor allem in späteren Jahren zu einem Rückgang des Endenergieverbrauchs von insgesamt 38 % im Jahr 2100 gegenüber 2023.

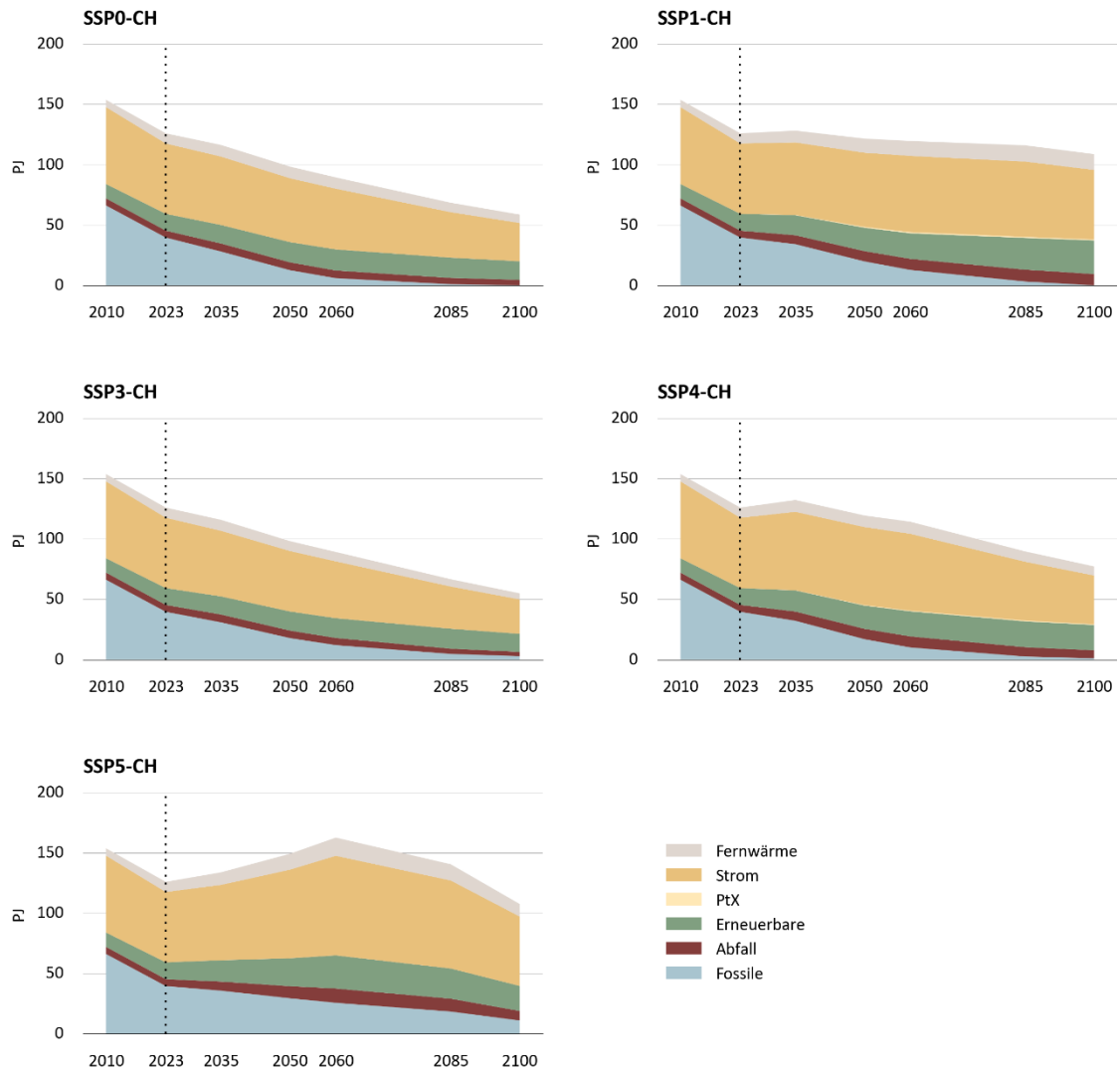
Strom bleibt in allen SSPs-CH der relevanteste Energieträger. Sein Anteil stellt sich bis 2100 bei rund 50 % ein, jedoch mit grossen Unterschieden hinsichtlich des absoluten Verbrauchs. Dieser liegt im Jahr 2100 zwischen 30 und 60 PJ. Erneuerbare steigen ebenfalls in ihrer anteiligen Bedeutung am EEV – in allen SSPs-CH und absolut vor allem in den SSPs-CH 1, 4 und 5 (dies auch in SSP-CH 5, weil gegen Ende des Jahrhunderts fossile Energieträger teuer und inländische erneuerbare verfügbar sind). In den letzten beiden insbesondere deshalb, weil es sich um einen inländischen und somit allseits verfügbaren Energieträger handelt.

Abbildung 26: Energieverbrauch gesamt pro SSP-CH im Industriesektor (in PJ)



Grafik Prognos.

Abbildung 27: Energieverbrauch nach Energieträger pro SSP-CH im Industriesektor (in PJ)



Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch.

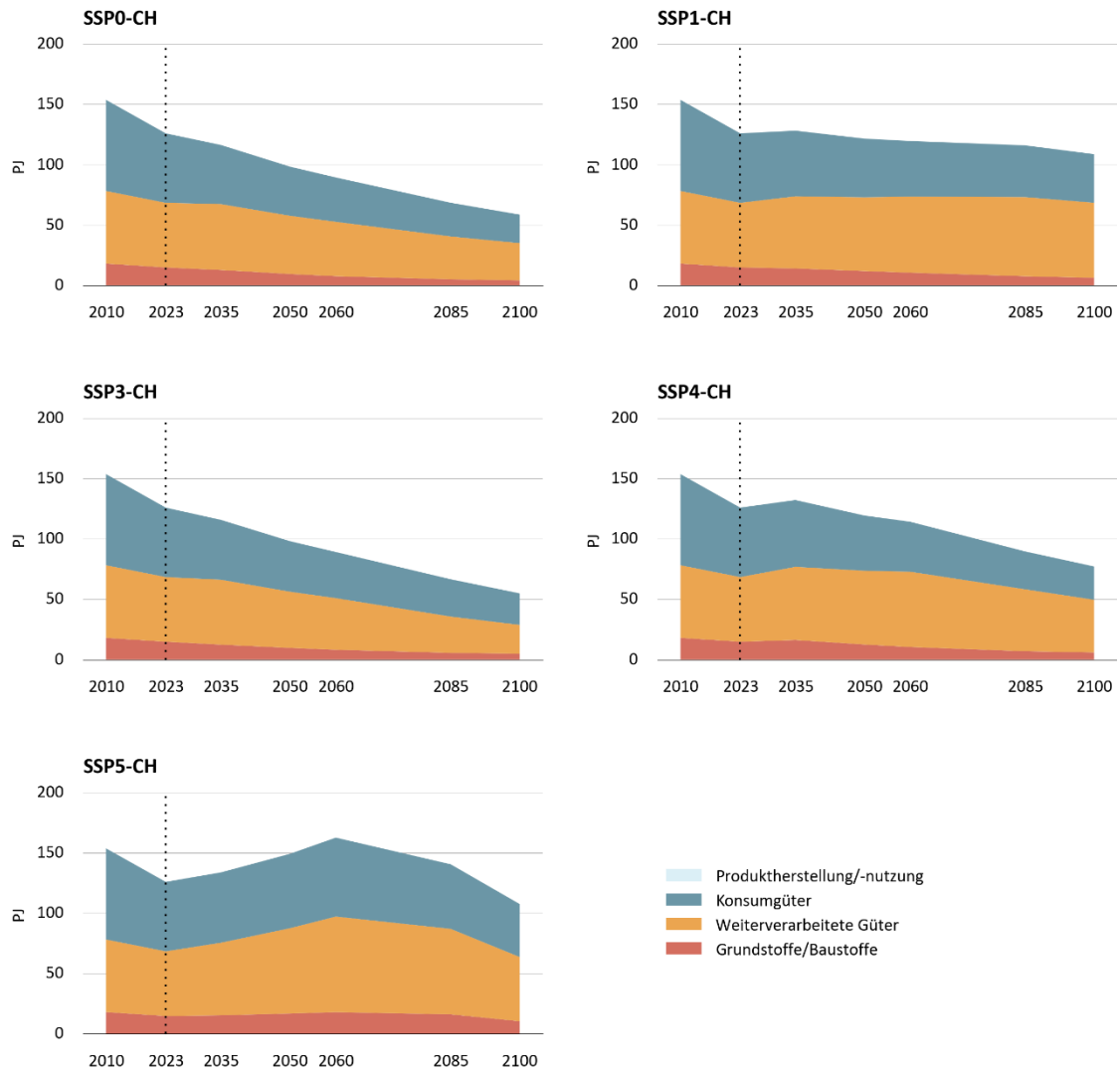
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Die Bedeutung der Branchengruppen am Endenergieverbrauch folgt meist dem historischen Trend: Grundstoffe und Konsumgüter nehmen anteilig ab, während weiterverarbeitete Güter zunehmen (siehe Abbildung 28). Dies trifft für SSP0-CH, SSP1-CH und SSP4-CH zu. Hingegen wird dieser Trend in SSP3-CH aufgrund rückläufigen internationalen Handels perspektivisch umgekehrt: Grundstoffe sowie Konsumgüter werden vermehrt im Inland hergestellt. Dieses Bild ist auch in SSP5-CH am Ende des Betrachtungszeitraumes zu erkennen, da es dort ebenfalls zu wirtschaftlicher Isolation kommt und damit zur Notwendigkeit, vermehrt die einst

importierten Güter selbst zu produzieren. Insgesamt jedoch kommt es zu keinen Verwerfungen bei der Struktur der Branchengruppen.

Abbildung 28: Energieverbrauch nach Branchengruppe pro SSP-CH im Industriesektor (in PJ)



Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

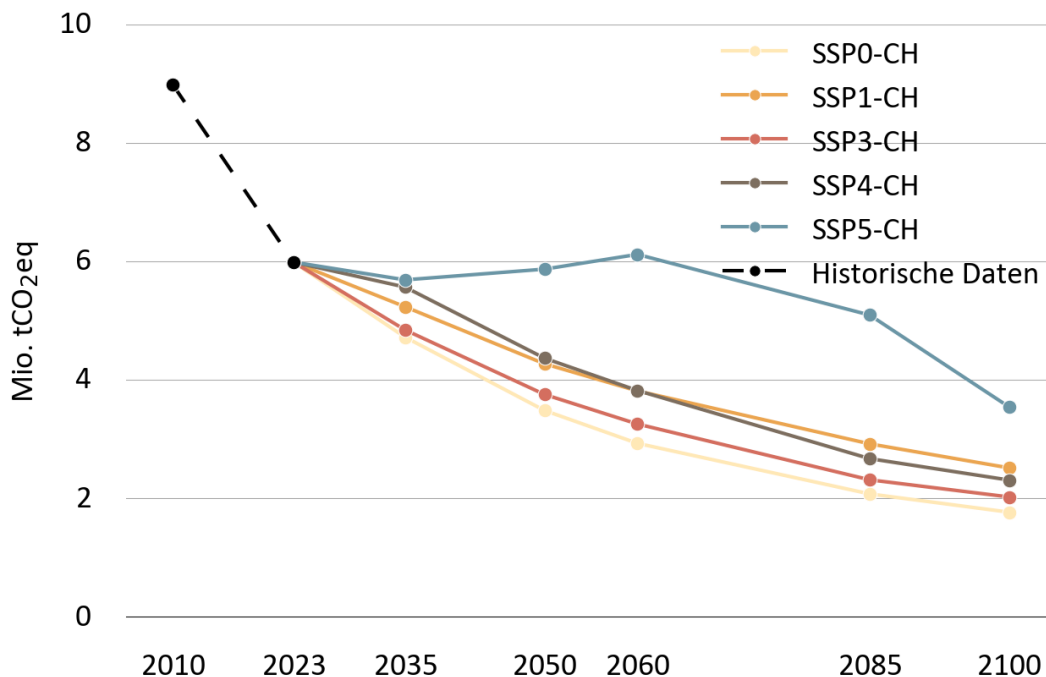
6.5.1.2. Treibhausgasemissionen

Ähnlich wie beim Endenergieverbrauch folgen auch die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) dem historischen Trend einer deutlichen Reduktion. Zwischen 2010 und 2023 haben die THG-Emissionen um 33 % abgenommen (siehe Abbildung 29). Im SSP0-CH sind die THG-

Emissionen auch weiterhin deutlich rückläufig und erreichen 2100 -71 % gegenüber 2010 (2 Mio. tCO₂eq). Die fast ausschliesslich nicht-energieintensive Herstellung von Konsumgütern ist bereits 2085 dekarbonisiert. Letztlich verbleibende THG-Emissionen bei den Grundstoffen, den weiterverarbeiteten Gütern sowie bei den prozessbedingten Emissionen bei Produktherstellung/-nutzung stellen schwer vermeidbare Emissionen dar, die (wahrscheinlich) nur mittels CCS vermieden werden können (siehe Abbildung 30 und Kapitel 11). Der insgesamt deutliche Rückgang ist überwiegend auf den zentralen Modellparameter «Anteil nicht-fossile Energieträger» zurückzuführen. Dieser Modellparameter steigt in fast allen SSPs deutlich an (siehe Abbildung 25). Dies ist auch der Grund dafür, dass SSP1-CH, SSP3-CH und SSP4-CH einen ähnlichen Verlauf wie SSP0-CH zeigen, allerdings mit geringfügig langsamer Reduktion von -57 %, -66 % bzw. -60 % zwischen 2023 und 2100.

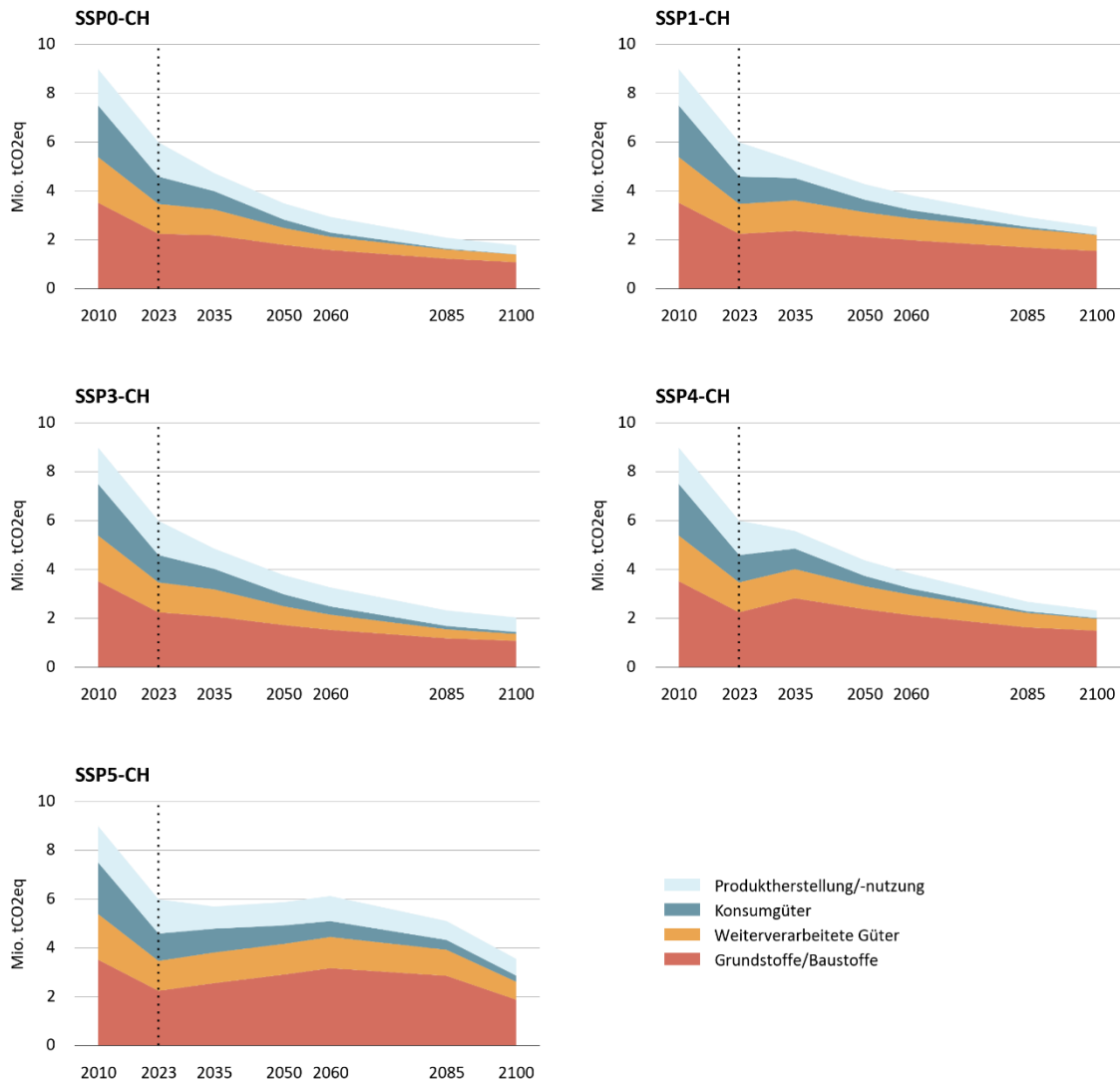
Abweichend verhält sich SSP5-CH: bis 2060 kommt es hier zwar zu einer strukturellen Verschiebung zwischen den Branchengruppen, jedoch stagnieren die THG-Emissionen auf einem ähnlichen Niveau wie 2023 von rund 7 Mio. tCO₂eq. Erst mit dem Einsetzen der wirtschaftlichen Isolation ab 2085 bzw. dem Rückgang des BIP ab 2060 kommt es zu einem markanten Produktionsrückgang, der eine ebenso markante THG-Reduktion verursacht. Schliesslich betragen die THG-Emissionen im Jahr 2100 noch rund 4 Mio. tCO₂eq (-40 % gegenüber 2023).

Abbildung 29: Treibhausgasemissionen gesamt pro SSP-CH im Industriesektor (in Mio. tCO₂eq)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Abbildung 30: Treibhausgasemissionen nach Branchengruppe pro SSP-CH im Industriesektor (in Mio. tCO₂eq)

Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

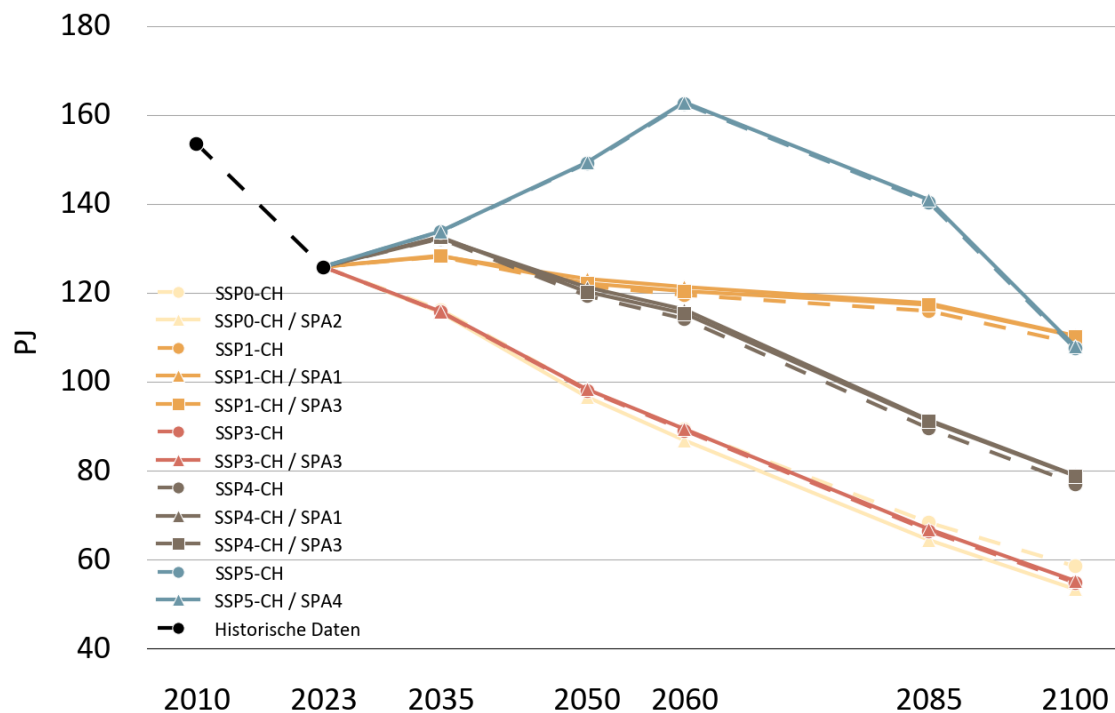
6.5.2. Klimapolitische Instrumente (SPA) in Kombination mit SSP-CH

6.5.2.1. Endenergieverbrauch

Bei der Wirkung der SPAs auf die einzelnen Modellparameter beeinflusst ausschliesslich die Energieeffizienz den Endenergieverbrauch. Nach Tabelle 20 ergeben sich jedoch nur geringe Wirkhöhen durch Energieeffizienz (SPA 1: -3%, SPA2: +16%, SPA3: -9%, SPA4: -5%), was in Abbildung 31 ersichtlich ist. Eine merkliche Verbesserung der Energieeffizienz und damit des

Energieverbrauchs stellt sich nur im SPA2 ein, welches einmal in SSP0-CH wirkt. Die anderen SPAs führen aufgrund ihrer Politikenschwerpunkte zu geringfügig verringerter Energieeffizienz. Insgesamt ist der Einfluss des SPAs auf den Endenergieverbrauch in der Industrie gering im Vergleich zu den Unterschieden zwischen den SSPs-CH.

Abbildung 31: Energieverbrauch gesamt pro SSP-CH und SPA im Industriesektor (in PJ)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos

6.5.2.2. Treibhausgasemissionen

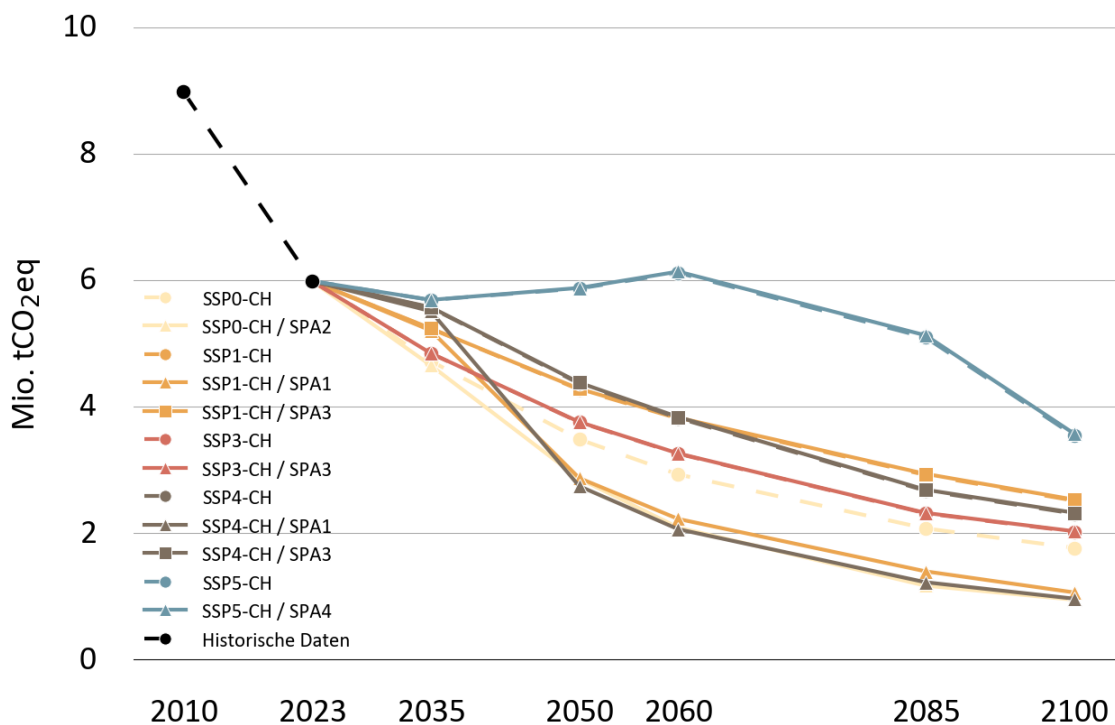
Die SPAs wirken über die beiden Modellparameter Emissionsintensität und Anteil nicht-fossile Energieträger direkt auf die Treibhausgasemissionen. Eine deutliche Reduktion wird in SPA1 und SPA2 erreicht, -58 % bzw. -46 % bis 2100 jeweils gegenüber SPA0 (siehe Abbildung 32). Insbesondere SPA1 bewirkt einen flächendeckenden Einsatz von CCS in Zementwerken⁷⁰ und verbietet den Einsatz von F-Gasen. Dies adressiert Emissionen, die nicht mittels der üblichen Massnahmen wie Energieeffizienz und Energieträgertausch gesenkt werden können und sonst als Sockel-Emissionen verbleiben. Ersichtlich ist dies im direkten Vergleich von SPA1/2 zu SPA3/4 in Abbildung 33. Insbesondere die Emissionen der Grundstoffe/Baustoffe (zentral hierbei sind

⁷⁰ Zur Erinnerung: CCS in KVAs wird im Sektor «CCS und Negativemissionstechnologien» (Kapitel 11) beschrieben.

die prozessbedingten Emissionen in der Zementherstellung) können nur mit SPA1/2 merklich gesenkt werden. Zudem reizt das SPA1 den Ersatz fossiler durch erneuerbare bzw. leitungsgebundene Energieträgern an – beide bilanziell ohne THG-Emissionen im Industriesektor. SPA2 wirkt ähnlich wie SPA1, jedoch etwas weniger ambitioniert. Insgesamt beschleunigen bzw. ermöglichen SPA1/2 die weitgehende Klimaneutralität der Industrie.

Ähnlich wie beim Endenergieverbrauch im Kapitel zuvor verursachen SPA3 und SPA4 nur eine sehr geringe Erhöhung der THG-Emissionen von je unter einem Prozent. Hier ist der Einfluss der SPAs auf die Entwicklung der Treibhausgasemissionen irrelevant.

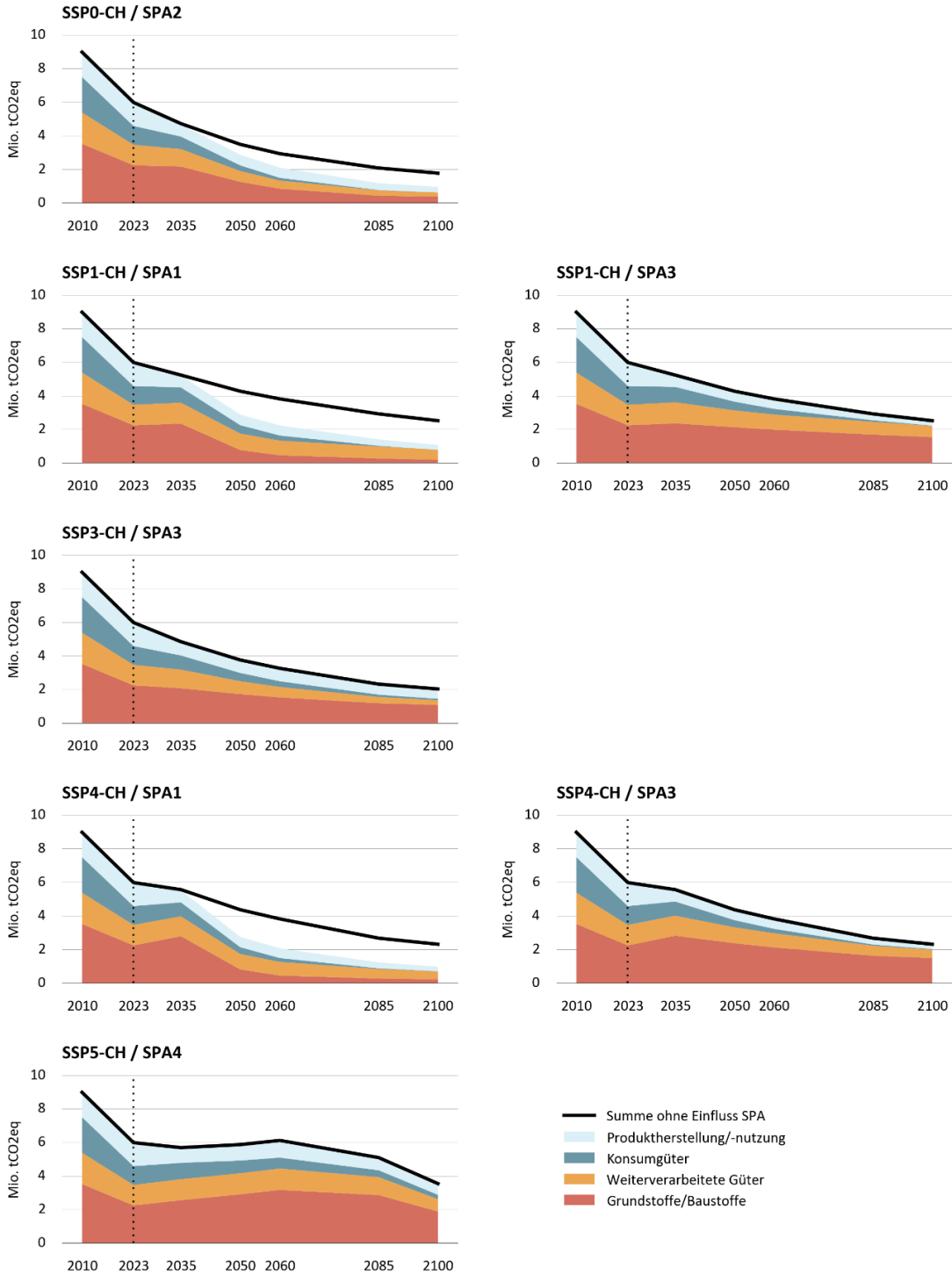
Abbildung 32: Treibhausgasemissionen gesamt pro SSP-CH und SPA im Industriesektor (in Mio. tCO₂eq)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Abbildung 33: Treibhausgasemissionen nach Branchengruppen pro SSP-CH und SPA im Industriesektor (in Mio. tCO₂eq)



Die gepunktete Linie markiert den Beginn unserer Modellierung. Die historischen Daten vor dieser Linie sind für alle Szenarien identisch. Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos

7. Energiewirtschaft

7.1. Modellbeschreibung

Das SSP-CH-Energiewirtschaftsmodell der Prognos modelliert den Zu- und Rückbau an Kraftwerken zur Strom- und Fernwärmeerzeugung. Dabei berücksichtigt das Modell sowohl den Strom- und Fernwärmebedarf der Nachfragesektoren als auch verschiedene Szenarioparameter, wie den Selbstversorgungsgrad oder die Akzeptanz einzelner Technologien in der Bevölkerung. Aufbauend auf den aktuell installierten Kraftwerksleistungen wird eine Entwicklung des Kraftwerksparks konstruiert, mit welcher der jährliche Strombedarf abzüglich der möglichen maximalen Importmenge gedeckt werden kann.

7.1.1. Kraftwerkspark

Das Modell basiert auf der Strom- und Fernwärmeerzeugung durch die aktuell (im Jahr 2023) vorhandenen Kraftwerke. Diese sind unterteilt in

- Kraftwerke, die der reinen Stromerzeugung dienen (Photovoltaik, Windenergie, Wasserkraftwerke, Kernkraftwerk Leibstadt, fossile Gaskraftwerke),
- gekoppelte Kraftwerke, die Strom und Fernwärme erzeugen (Biomasse (Holz), Biogas, Abwasserreinigungsanlagen (ARA), Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA), Geothermie, Kernkraftwerke in Beznau und Gösgen, fossile Gaskraftwerke), und
- Heizkraftwerke, die ausschliesslich der Fernwärmeerzeugung dienen (z. B mit Grosswärmepumpen, Elektro-Kessel ⁷¹, industrielle Abwärme).

Der Kraftwerkspark unterliegt folgenden Annahmen:

- Windenergie- und Photovoltaikanlagen verfügen über eine Laufzeit von 25 Jahren.
- Wasserkraftwerke bleiben bis mindestens 2100 in Betrieb.
- Die Laufzeit der Kernkraftwerke variiert je nach SSP-CH und SPA zwischen 60 und 80 Jahren (bei Bedarf könnten für verschiedene Kraftwerke verschiedene Laufzeiten vorgegeben werden). Neu zugebaute Kernkraftwerke bleiben bis mindestens 2100 in Betrieb.
- Fossile Gaskraftwerke haben eine Laufzeit von 25 Jahren.
- KVA und ARA bleiben bis 2100 in Betrieb.
- Gekoppelte erneuerbare Anlagen, die durch den Einsatz von Biomasse (Holz) und Biogas Strom und Fernwärme erzeugen, haben eine Laufzeit von 25 Jahren.

⁷¹ Elektro-Kessel wandeln elektrische Energie direkt in Wärme (Heisswasser oder Dampf) um und werden in Fernwärmenetzen vor allem für Spitzenlastdeckung und Netzstabilisierung eingesetzt.

- Grosswärmepumpen und E-Kessel können nach Zubau bis 2100 flexibel⁷² betrieben werden. Dasselbe gilt für Geothermie-Kraftwerke.

Ein zentrales Element des Modells ist der Zubau an neuen Kraftwerken. Dieser Zubau wird anhand der folgenden Schritte modelliert:

- Der Zubau an gekoppelten Erneuerbaren (d.h. Biomasse (Holz), Biogas, Abwasserreinigungsanlagen (ARA), Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA), Geothermie) erfolgt in Abhängigkeit der Vorgaben durch die Szenarioparameter, jedoch unabhängig von der Nachfrage an Strom und Fernwärme.⁷³
- Werden weitere Kraftwerke zur Stromerzeugung benötigt, um die Nachfrage zu decken, wird zunächst geprüft, ob der aus Szenarioparametern abgeleitete Zielwert für den Anteil erneuerbarer Energien (PV, Wind, Biomasse; ohne Wasserkraft) bereits erreicht ist. Ist dies nicht der Fall, werden Wind- und Photovoltaik-Anlagen zugebaut (im durch die Inputparameter vorgegebenen Verhältnis).
- Anschliessend erfolgt der Zubau an Wasserkraft, Kernkraft oder fossilen Gaskraftwerken. Dabei werden die Szenarioparameter zur Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit der einzelnen Technologien berücksichtigt.
- Wenn notwendig, erfolgt im Fernwärme-Modul der Zubau an (weiteren) Wärme-Kraftwerken – je nach Szenario oder gewählten Einstellungen variiert der Anteil der Biomasse- oder Erdgaskraftwerke, Grosswärmepumpen oder Elektro-Kessel⁷⁴.

7.1.2. Modellparameter

Das Modell baut auf folgenden Szenarioparametern auf:

- Selbstversorgungsgrad: Je nachdem, wie sich der Selbstversorgungsgrad im Laufe der Jahre entwickelt, kann mehr oder weniger Strom aus dem Ausland importiert werden. Dies wirkt sich auf den Zubau-Bedarf im Inland aus.
- Anteil erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) an der Stromerzeugung: Je nach Szenario soll der Anteil erneuerbarer Energien an der inländischen Stromerzeugung höher oder niedriger liegen. Dies wird berücksichtigt, sobald Zubau-Bedarf besteht. Erneuerbare Energien umfassen in diesem Fall Wind- und Photovoltaik-Anlagen sowie gekoppelte Kraftwerke (Biomasse (Holz), Biogas, ARA, KVA (Anteil erneuerbarer Energien) und Geothermie. Die Wasserkraft wird separat betrachtet.

⁷² Diese Kraftwerke werden nur eingesetzt, wenn der Fernwärmebedarf nicht durch andere Kraftwerke gedeckt werden kann.

⁷³ Hierbei handelt es sich um eine vereinfachende Massnahme. Die Einstellungen haben nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse, da die Anteile dieser Kraftwerke sehr gering sind und auch der Zubau dementsprechend gering ausfallen würde.

⁷⁴ Der im ersten Punkt aufgeführte Zubau an Biomasse wird hier nicht berücksichtigt. Es geht an dieser Stelle nur darum, den notwendigen weiteren Zubau auf die genannten Anlagen zu verteilen.

- Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit von Wasserkraft, Kernkraft und fossiler Energie: Je nach Verhältnis dieser Szenarioparameter werden die einzelnen Technologien bei Zubau-Bedarf mehr oder weniger bevorzugt. Die Szenarioparameter fassen dabei die Akzeptanz einer Technologie in der Bevölkerung und die Wirtschaftlichkeit des Zubaus neuer Kraftwerke dieser Technologie zusammen. Da neue Kernkraftwerke nur bei einer Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen errichtet werden können (Aufhebung des Neubauverbots, siehe Kapitel 7.4.2), wird dieser Parameter zunächst für alle Szenarien so eingestellt, dass in den Referenzszenarien (SSP-CH in Kombination mit SPA0) keine neuen Kernkraftwerke zugebaut werden.

Weitere Parameter, die im Modell eingestellt werden können, sind:

- Anteil bzw. Verhältnis von Wind- und Photovoltaikanlagen beim Zubau ungekoppelter erneuerbarer Energien
- Zubau gekoppelter erneuerbarer Energien (Biomasse (Holz), Biogas, ARA, KVA (EE-Anteil), Geothermie)
- Mindestleistung neu zugebauter Wasserkraft-, Kernkraft- und fossiler Gaskraftwerke
- Laufzeit bestehender Kernkraftwerke
- Volllast von Gaskraftwerken: Vor dem Zubau neuer Kraftwerke kann die Volllast fossiler Gaskraftwerke bis zu einem eingestellten Prozentsatz erhöht werden
- Anteile Biomasse (Holz), Erdgas, Grosswärmepumpen und E-Kessel beim Zubau neuer Fernwärmekraftwerke (unabhängig vom oben genannten Zubau bei gekoppelten Erneuerbaren)
- Wasserstoffproduktion im Inland sowie Anteile der Produktion im Winter/Sommer

7.1.3. Umsetzung

Im Nachfolgenden wird beschrieben, in welchen Schritten das Modell die Entwicklung des Kraftwerkparks bis zum Jahr 2100 berechnet.

Strom- und Fernwärmenachfrage als zentrale Modellinputs

- Zentrale Modellinputs sind die Strom- und Fernwärmenachfrage der Nachfragesektoren Industrie, Gebäude und Verkehr sowie die benötigte Wasserstoffmenge. In einzelnen SPA wird ausserdem Strom und Wärme für den Betrieb von CCS-Anlagen benötigt.
- Die Fernwärmenachfrage wird im Fernwärmemodul (siehe nächster Abschnitt) verarbeitet. Daraus resultiert die Strommenge, die bei der Fernwärmeerzeugung durch Grosswärmepumpen, Elektro-Kessel und Geothermie verbraucht wird.
- Anhand der nachgefragten Wasserstoffmenge wird berechnet, wieviel Strom für die inländische Wasserstoffherstellung benötigt wird.

- Zur Ermittlung des tatsächlichen Strombedarfes werden ausserdem Netzverluste in Höhe von 7,5 % berücksichtigt.

Fernwärmemodul

Ins Fernwärmemodul geht zunächst der Fernwärmebedarf der Nachfragesektoren sowie gegebenenfalls auch der Wärmeverbrauch für den Betrieb von CCS bei KVA ein.⁷⁵ Wir gehen von einem fixen Winteranteil des Fernwärmebedarfs von 75 % aus (basierend auf den Annahmen, dass Raumwärme (die 75% des Fernwärmebedarfs ausmacht) zum grössten Teil im Winter nachgefragt wird (85 %), während der Bedarf an Warmwasser (25% des Fernwärmebedarfs) weitgehend unabhängig von der Jahreszeit ist). Unter Berücksichtigung der Netzverluste von 9,5 % ergibt sich für jedes Jahr eine erforderliche Fernwärmeerzeugung, aufgeteilt in zwei Jahreszeiten mit Sommer- und Winterbedarf.

Da die Fernwärme-Nachfrage im Winter wesentlich höher ist als im Sommer, genügt es, für den Zubaubedarf die Wintermonate zu betrachten. Ist die Nachfrage im Winter gedeckt, gilt dasselbe auch für den Sommer.

Durch die entsprechenden Modellparameter wird gesteuert, wie gross der jährliche Zubau an gekoppelten Erneuerbare-Energien-Anlagen (EE-Anlagen) ist und welche Kraftwerkstypen zu welchem Anteil zugebaut werden: Biomasse- oder Erdgaskraftwerke, Grosswärmepumpen oder Elektro-Kessel. Bei Bedarf erfolgt der Zubau zu den vorgegebenen Anteilen (siehe Kapitel 7.1.2).

Bei den Biomasse- und Erdgaskraftwerken handelt es sich um gekoppelte Anlagen, die auch Strom erzeugen. Für Geothermie, Grosswärmepumpen und Elektro-Kessel wird, basierend auf fixen Wirkungsgraden, der zur Fernwärmeerzeugung eingesetzte Strom ermittelt.

Strombedarf gedeckt?

Für Wasserkraft, übrige erneuerbare Energien (PV, Wind, gekoppelte Anlagen), fossil betriebene Kraftwerke und Kernkraft wird anhand von aus den EPCH 2050+ abgeleiteten mittleren Sommer- und Winter-Volllaststunden und den angenommenen installierten Leistungen je Kraftwerkstyp (siehe Kapitel 1.2) die erwartete Stromerzeugung durch bereits vorhandene Kraftwerke ermittelt.

Der Szenarioparameter «Selbstversorgungsgrad» definiert, welcher Anteil des Strombedarfes durch inländische Produktion gedeckt werden soll. Darauf aufbauend wird für Sommer- und Winterhalbjahre berechnet, ob die vorhandene Kraftwerksleistung im jeweiligen Halbjahr ausreicht, oder ob neue Kraftwerke zugebaut werden müssen. Vor dem Zubau neuer Kraftwerke

⁷⁵ Im Industriesektor wird bei CCS vom Oxyfuel-Verfahren ausgegangen. Bei diesem Verfahren wird ausschliesslich Strom benötigt.

können gegebenenfalls (je nach Vorgabe durch den Modellparameter) die Volllaststunden fossiler Kraftwerke (deutlich) erhöht werden.

Aufgrund des geringeren Stromverbrauchs im Sommer gilt: Kann im Winter ausreichend Strom zur Verfügung gestellt werden, so ist dies mit dem bestehenden Kraftwerkspark auch im Sommer möglich. Das Modell fokussiert daher darauf, den Strombedarf im Winter zu decken. Im Ergebnis liegt die Differenz zwischen der erforderlichen Stromerzeugung und bereits vorhandener (bzw. mit dem bestehenden Kraftwerkspark möglicher) Stromerzeugung vor.⁷⁶

Mögliche Importmenge

Aus den Angaben zum Selbstversorgungsgrad (zulässiger Importanteil, siehe Kapitel 7.1.2) errechnet das Modell die Strommenge, die aus dem Ausland importiert werden darf. Der Anteil kann für Winter und Sommer unterschiedlich eingestellt sein. Es resultiert eine im Inland erforderliche Stromerzeugung, aufgeteilt in Winter- und Sommerhalbjahre, die gedeckt werden muss. Da der Strombedarf im Winter deutlich höher als im Sommer ist, fokussiert das Modell ausschliesslich auf das Winterhalbjahr.

Möglicher Zubau Windkraft und Photovoltaik

Ausgehend von der oben berechneten zusätzlich erforderlichen Stromerzeugung im Inland wird zunächst betrachtet, welcher Anteil der inländischen Stromerzeugung durch die erneuerbaren Energien Wind und PV gedeckt werden soll (siehe Kapitel 7.1.2). Damit wird ermittelt, wie viel Energie (in TWh) im Winterhalbjahr zusätzlich durch erneuerbare Energien erzeugt werden soll. Das Verhältnis zwischen neuen Wind- und neuen Photovoltaik-Anlagen kann dabei in Abhängigkeit der jeweiligen Szenario-Vorgaben variabel eingestellt werden. Mithilfe dieses Inputs wird der Zubau an Wind- und PV-Anlagen so gesteuert, dass der durch die Szenariovorgaben geforderte Anteil an erneuerbaren Energien (ohne Wasserkraft), über das gesamte Jahr betrachtet, erfüllt wird. Dieser Zwischenschritt ist notwendig, da Photovoltaik-Anlagen im Sommer mehr Strom produzieren als im Winter, während es bei Windanlagen genau umgekehrt ist.⁷⁷

⁷⁶ Ein steigender Kühlbedarf im Sommer ist im Gebäudesektor modelliert und berücksichtigt. Dennoch ist der Strombedarf im Winter deutlich höher als im Sommer.

⁷⁷ Beispiel: Es gibt in einem Szenario im Winterhalbjahr des Jahres 2030 einen Zubau-Bedarf von insgesamt 2 TWh. Das Modell betrachtet in einem ersten Schritt, dass der vorgegebene EE-Anteil (ohne Wasserkraft) erreicht wird. Im Beispiel ermittelt das Modell, dass über das gesamte Jahr 2030 betrachtet, 3 TWh aus Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen erzeugt werden sollten, um den vorgegebenen Anteil erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) an der Jahresproduktion zu erreichen. Das Modell baut entsprechend genau so viel an Windkraft und Photovoltaik zu, dass der gewünschte EE-Anteil (ohne Wasserkraft) über das gesamte Jahr erreicht wird. In einem nächsten Schritt wird geprüft, ob diese Zubaumenge ausreicht, um auch die notwendige zusätzliche Erzeugung im Winterhalbjahr von 2 TWh zu decken. Ist dies nicht der Fall, werden in einem weiteren Schritt zusätzliche Kraftwerke (Wasserkraft/Kernkraft/fossile Energie) zugebaut, bis die 2 TWh im Winterhalbjahr erreicht werden.

Möglicher Zubau Gas-, Wasser- und Kernkraftwerke

In einem nächsten Schritt prüft das Modell, ab welchem Jahr und in welchem Umfang andere Kraftwerke – Wasserkraftwerke, (fossile) Gaskraftwerke oder Kernkraftwerke – zugebaut werden können. Dabei spielen die Szenarioparameter «Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit» der einzelnen Technologien (siehe Kapitel 7.1.2) wie auch Einstellungen zur Mindestleistung neuer Kraftwerke⁷⁸ und die für einzelne Kraftwerke veranschlagte Bauzeit⁷⁹ eine wesentliche Rolle.

Tatsächlicher Zubau und Anpassungen

Anschliessend beginnt das Modell, falls erforderlich, mit dem Zubau neuer Kraftwerke. Dieser erfolgt Jahr für Jahr, das heisst: Der Zubau im Jahr 2030 erfolgt beispielsweise unter Berücksichtigung des bereits in den Vorjahren bis 2029 erfolgten gesamten Zubaus. Als Erstes wird jeweils geprüft, ob Zubaubedarf besteht. Wenn ja, wird dieser Bedarf zunächst, soweit für das Erreichen des gewünschten Anteils erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) notwendig oder möglich, durch den Zubau von Photovoltaik- und Windanlagen gedeckt. Als Nächstes erfolgt der Zubau von Wasserkraftwerken, fossilen Kraftwerken oder Kernkraftwerken. Dabei wird auch das Ausscheiden gewisser Kraftwerke berücksichtigt (Photovoltaik, Wind, Biomasse (Holz), fossile Gaskraftwerke).

Um einen sprunghaften Zubau (oder Rückgang) in der Stromerzeugung zu vermeiden, wird im nächsten Schritt der für ein Jahr ermittelte notwendige Zubau von Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft und fossilen Gaskraftwerken gleichmässig auf die (sobald möglich) zehn Vorjahre verteilt⁸⁰. Der für das Jahr 2040 notwendige Zubau startet also bereits im Jahr 2031. Hier ist anzumerken, dass angenommen wird, dass alle neu zugebauten fossilen Gaskraftwerke und Kernkraftwerke ungekoppelte Anlagen⁸¹ sind. Schliesslich ermittelt das Modell mögliche durch gesetzte Restriktionen bzw. Limits bedingte Verzögerungen beim Zubau von Windkraft- und Photovoltaikanlagen.⁸²

⁷⁸ Ein zugebautes Kernkraftwerk hat eine installierte Leistung von 0,5 GW oder mehr, ein neu zugebautes Wasserkraftwerk oder fossiles Gaskraftwerk hat eine installierte Leistung von 0,1 GW oder mehr.

⁷⁹ Die Bauzeit ist nur in den ersten betrachteten Jahren relevant. Da das Modell vorausschauend «arbeitet», kann in späteren Jahren frühzeitig genug mit dem Bau begonnen werden. Ermittelt beispielsweise das Modell für das Jahr 2058 den Bedarf eines neuen Kernkraftwerkes, kann dies im Jahr 2058 Strom liefern, sofern die Bauzeit nicht grösser 35 Jahre ist.

⁸⁰ Der Zubau erfolgt stetig über die Vorjahre verteilt – es steht also bereits in den Vorjahren mehr installierte Leistung als benötigt zur Verfügung.

⁸¹ „Ungekoppelt“ bedeutet, dass die Anlagen nur Strom und keine Fernwärme produzieren.

⁸² Es wird per exogener Setzung eine maximale jährliche Zubaumenge vorgegeben, welche nicht überschritten werden darf. Ist der Zubaubedarf höher als die Limite, führt dies zu einer zeitlichen Verzögerung im Zubau. Auftretende Lücken müssten, sofern möglich und nötig, durch zusätzliche Importe gedeckt werden. Bei den Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen haben wir Restriktionen auf der baulichen Seite berücksichtigt und ein jährliches Zubau-Limit eingestellt. Bei anderen Technologien fliesst dies über eine eingestellte Bauzeit für neue Kraftwerke ein.

Output

Als Resultat weist das Modell die installierte Leistung der unterschiedlichen Kraftwerkstypen (nur Stromerzeugung), die damit erzeugte Strommenge sowie die Nettoimporte aus. Die Ergebnisse werden für das gesamte Jahr sowie aufgeteilt auf Winter/Sommer dargestellt. Im Bereich Fernwärme wird als Ergebnis die Erzeugung nach Technologien und die jährlich erzeugte Fernwärmemenge ausgewiesen. Für die Weiterverarbeitung im Modellverbund gibt das Strommodell zudem den Umwandlungseinsatz und Umwandlungsausstoss an die Datensynthese bzw. an das Datenintegrationsmodul weiter (Strom und Fernwärme).

7.2. Bestehende Arbeit und Daten sowie zentrale Modellinputs

Folgende Daten gehen als Input in das Modell ein:

Aktueller Kraftwerkspark: Zunächst betrachtet das Modell den aktuellen Kraftwerkspark, genauer: die installierte Leistung je Technologie im Ausgangsjahr 2023. Als Quelle dienen die schweizerische Gesamtenergiestatistik 2023 (Bundesamt für Energie (BFE) 2024b), die schweizerische Elektrizitätsstatistik 2023 (Bundesamt für Energie (BFE) 2024a), der Stand der Wasserkraftnutzung (Bundesamt für Energie (BFE), Sektion Wasserkraft 2025) und die Energieperspektiven 2050+ (Bundesamt für Energie (BFE) 2022).

Stromverbrauch: Das Modell berücksichtigt die Stromverbräuche der Nachfragesektoren aus diesem Projekt (Gebäude, Industrie, Verkehr). Dazu kommen der Eigenverbrauch im Energiesektor sowie der Verbrauch für CCS und NET.

Fernwärmeverbrauch: Das Modell berücksichtigt den Fernwärmeverbrauch der Nachfragesektoren, dies betrifft die Sektoren Industrie und Gebäude (Private Haushalte, Dienstleistungen). Ausserdem wird beim zu deckenden Verbrauch auch der Wärmeverbrauch für den Betrieb von CCS in KVA-Anlagen berücksichtigt.⁸³

Wasserstoffbedarf (PtH₂): Das Modell betrachtet ausserdem den Wasserstoffbedarf, der in den Sektoren anfällt (im Wesentlichen im Verkehr und Industrie). Berücksichtigt wird dabei ausschliesslich grüner Wasserstoff, der durch Elektrolyse von Wasser unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt wird.

⁸³ Der Einsatz von CCS erfolgt nur in Kombination mit gewissen SPA. Bei KVA wird beim Einsatz von CCS vom Post-Combustion-Verfahren ausgegangen. Bei diesem Verfahren wird nebst Strom auch Wärme benötigt (siehe Kapitel 11 zu CCS und NET).

Volllaststunden: Auf Grundlage von Daten aus den Energieperspektiven 2050+ (Bundesamt für Energie (BFE) 2022) haben wir für die einzelnen Technologien die Entwicklung der Volllaststunden für die betrachteten Stützjahre abgeleitet und zwischen den Stützjahren jeweils linear interpoliert. Für Wasserkraft, Kernkraft, fossile Kraftwerke wie auch für Windkraft und gekoppelte EE-Kraftwerke sind wir von konstanten Werten ausgegangen. Die Volllaststunden der Photovoltaikanlagen steigen für die Winterhalbjahre im Zeitverlauf leicht an und gehen für die Sommerhalbjahre leicht zurück (jeweils bis 2060). Damit soll dem zunehmenden Anteil von Fassaden-PV-Anlagen, die gegenüber herkömmlichen Anlagen im Winter mehr und im Sommer weniger Strom produzieren, Rechnung getragen werden.

Winteranteile Stromverbrauch: Die Stromverbräuche der Nachfrage-Sektoren werden anhand der sektoralen Winteranteile (wieviel Prozent des Stroms wird in den Wintermonaten verbraucht) auf Winter- und Sommerhalbjahr aufgeteilt. Dabei nehmen wir an, dass die Winteranteile für fast alle Sektoren in allen Szenarien konstant bei 50 % liegen, einzig im Gebäudesektor rechnen wir aufgrund des in den kalten Monaten erhöhten Wärmebedarfs mit höheren Werten. Die Winteranteile des Gebäudesektors wurden anhand der Ergebnisse der Nachfragemodellierung bestimmt. Die Anteile unterscheiden sich leicht zwischen den Szenarien. In Szenarien, in denen die Wärmeversorgung über Wärmepumpen zunimmt, steigt der Winteranteil im Gebäudesektor im Zeitverlauf leicht an, von 57 % auf etwa 60-62 %. In den Szenarien, in denen die Bedeutung der Wärmepumpen für die Wärmeversorgung vergleichsweise wenig zunimmt, verbleibt der Winteranteil im Gebäudesektor bei rund 57-58 %.

Ausserdem haben wir auf Grundlage aktueller Werte oder Beobachtungen definiert, wie die Angaben zu den einzelnen Szenarioparametern (SP) in Modellparameter umgerechnet werden. Dasselbe gilt für die Einstellungen und Auswirkungen der weiteren Modellparameter:

Bauzeit neuer Kraftwerke: Für Wasserkraftwerke und Fossile Kraftwerke haben wir festgelegt, dass der Bau neuer Kraftwerke mindestens sieben bzw. zwei Jahre dauert. Für Kernkraftwerke dauert der Bau je nach Akzeptanz & Wirtschaftlichkeit zwischen 10 und 35 Jahren. Da das Modell «in die Zukunft schauen» kann, ist die Bauzeit nur in den ersten Jahren relevant.

Anteil erneuerbarer Energien (Wind, PV, gekoppelte Erneuerbare; ohne Wasserkraft) an der Stromerzeugung: Als Ausgangswert ist ein Wert von 10 % festgelegt, basierend auf Angaben der Energiestatistik für das Jahr 2020. Anschliessend liegt der Wert je nach Einstellung des entsprechenden Szenarioparameters «Anteil erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung» zwischen 0 % und 60 %.

Wert SP	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Anteil EE	0%	1%	2%	4%	6%	8%	10%	15%	20%	30%	40%	50%	60%

Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um Zielwerte handelt, die nur erreicht werden, wenn sich aus Stromnachfrage, Import-Möglichkeit und bereits vorhandener Erzeugung genügend hohe Zubau-Bedarfe ergeben.

Zusammen mit dem «Selbstversorgungsgrad» (siehe nächster Absatz) ist der «Anteil erneuerbarer Energien» der zentrale Parameter, der die Modellergebnisse treibt.

Anteil an Importen zur Deckung des Strombedarfs: Für das Jahr 2023 ist ein Wert von 20 % festgelegt. Anschliessend liegt der Wert je nach Einstellung des Szenarioparameters «Selbstversorgungsgrad» zwischen 0 % und 50 %.

Wert SP	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Importanteil	50%	45%	40%	35%	30%	25%	20%	15%	10%	8%	5%	3%	0%

Auch hier handelt es sich um Zielwerte, die nur erreicht werden, wenn sich aus Stromnachfrage und bereits vorhandener Erzeugung entsprechend grosse Differenzen ergeben.

Zubau gekoppelte Erneuerbare: Je nach Wahl der Modellparameter (MP) werden jährlich Kraftwerke mit einer installierten Leistung zwischen 0 und 50 MW zugebaut.

Wert MP	0	1	2	3	4	5	6
Jährl. Zubau [MW]	0	1	2	5	10	20	50

Inländische Wasserstoffproduktion: Je nach Wahl des Modellparameters wird zwischen 0 und 100 % des benötigten Wasserstoffs im Inland produziert.

Wert MP	0	1	2	3	4	5	6
Produktion im Inland	0%	17%	33%	50%	67%	83%	100%

Des Weiteren haben wir folgende technischen Setzungen für alle Szenarien festgelegt:

Wirkungsgrade Fernwärmeerzeugung: Folgende Wirkungsgrade (Fernwärmeerzeugung/Stromverbrauch) werden im Modell angenommen.

Wirkungsgrad	Wert
Grosswärmepumpe	2,50
Elektro-Kessel	0,98
Geothermie	4,50

Wirkungsgrad Wasserstoffproduktion: Folgender Wirkungsgrad (Wasserstoffproduktion/ Stromverbrauch) wird im Modell angenommen.

Wirkungsgrad	Wert
Wasserstoffproduktion	0,70

7.3. Beschreibung Szenarien für Sektor Energiewirtschaft

7.3.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

SSPO-CH

Der Selbstversorgungsgrad der Schweizer Energieversorgung für Wärme und Strom ist hoch – dank des Ausbaus der erneuerbaren Energien sowie einem stark gesunkenen Energieverbrauch, der sowohl durch Effizienzsteigerungen als auch durch Energiesparen zustande kam. Die Energieversorgung besteht aus vielen dezentralen Kleinanlagen, die oft privat von der Bevölkerung betrieben werden. Auch in der Planung der Energieversorgung ist die Bevölkerung involviert. Sie basiert auf einer Mischung aus Windenergie, Photovoltaik, Wasserkraft, Geothermie und Holz. Solarpanels sind auf fast jedem Hausdach sowie auf Landwirtschaftsflächen zu finden. Die Anlagen sind von der Bevölkerung akzeptiert, da sie hohe Umweltstandards erfüllen. Dennoch wirkt der ersichtliche Flächenverbrauch als starker Anreiz zum zusätzlichen Energiesparen. Die Schweiz ist in den EU-Strommarkt integriert, das Handelsvolumen ist aber gering. Weil die Schweiz dadurch wenig von internationalen Strompreisen und Lieferkapazitäten abhängig ist, sind die Energiepreise zwar hoch, aber relativ stabil.

SSP1-CH

Die Schweiz hat ihre Energieinfrastruktur stark ausgebaut. Sie verfügt über hocheffiziente Wasser-, Solar- und Windkraftwerke sowie über grosse Speicherkapazität. Dennoch reicht die inländische Energieproduktion nicht aus, um den eigenen hohen Strombedarf zu decken. Deshalb importiert die Schweiz einen Teil ihres Stromes aus erneuerbaren Quellen. Die Schweiz ihrerseits exportiert Strom aus den Pumpspeicherkraftwerken europaweit und trägt damit zum Ausgleich von saisonalen Schwankungen in der Produktion bei.

SSP3-CH

Die Schweiz betreibt so gut wie keinen Energiehandel. Sie importiert lediglich kleine Mengen an teuren fossilen Energieträgern, für die sie bereit ist, viel zu zahlen. Fossile Energieträger werden in alten Gas- und Heizwerken in Strom und Wärme umgewandelt. Die inländische Energieproduktion erfolgt hauptsächlich in alten Wasserkraftwerken. Der Staat muss den Energieverbrauch rationieren, um die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Grundstrukturen erhalten zu können. Viele Privathaushalte besitzen kleine Photovoltaikanlagen für den Eigenbedarf.

SSP4-CH

Die Energieproduktion im Inland basiert auf Solar-, Wind-, Wasser- sowie Atomenergie, ist aber insgesamt gering. Die Schweiz ist deshalb abhängig von internationalen Verträgen, die energieintensive Branchen teils direkt mit internationalen Energieversorgern aushandeln. Die Resilienz der inländischen Grundversorgung ist entsprechend niedrig. Schweizer Firmen beteiligen sich vermehrt an ausländischer Produktion, sodass Schweizer Firmen Wasserstoff-, Solar-, Wind- und Kernkraftanlagen im Ausland betreiben. Die gut vernetzte Wirtschaftselite kann sich vorteilhafte Verträge sichern. Der Staat federt potenzielle Energiepreisschwankungen für die energieintensiven Branchen ab. Die Bevölkerung passt ihren Konsum den Preisschwankungen an.

SSP5-CH

Der Ausbau erneuerbarer Energien wurde kaum vorangetrieben. Mittlerweile sind die Rohstoffe für ihren Ausbau so rar und der Zugang zu diesen so schwierig geworden, dass dieser kaum mehr möglich ist. Mit langfristigen Verträgen versucht die Schweiz, die hohe Nachfrage der grossen Wohnbevölkerung und der ressourcenintensiven Wirtschaft mit Importen von fossiler Energie zu decken. Um die Verträge abschliessen zu können und die Transportwege zu sichern, ist die Schweiz gezwungen, Bestimmungen und Konditionen zu erfüllen, die selten zu ihren Gunsten ausfallen. Aufgrund der geopolitischen Lage werden gegen Ende des Jahrhunderts vermehrt Energieabkommen aufgekündigt. Die Energiepreise steigen markant. Die europäischen Länder konkurrieren um die verbleibenden fossilen Ressourcen.

7.3.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Im Folgenden werden die SPA für den Sektor Energiewirtschaft beschrieben. Einen Überblick zu den konkreten Instrumenten des Sektor Energiewirtschaft je SPA und den Wirkungen auf die Modellparameter folgt in Unterkapitel 7.4.2.

SPA0 – Status Quo: Im Rahmen der Energiestrategie 2050 ist die Schweizer Energiepolitik im Status Quo durch eine starke Abhängigkeit von der Wasserkraft gekennzeichnet, während

gleichzeitig das Stromangebot aus erneuerbaren Energien (insbesondere Photovoltaik) erhöht und die Kernenergie schrittweise abgebaut wird. Die wichtigsten Herausforderungen sind i) die Deckung der Stromnachfrage im Winter und ii) der Ausbau und die Erhöhung der Flexibilität des Stromnetzes, um variable erneuerbare Energien und Energiespeicher zu integrieren. Für die Energiepolitik ist in erster Linie die Bundesverwaltung zuständig, die aber auch wichtige Erwartungen hat (Raumplanung, lokale Genehmigungen). Für den Unterhalt und die Erweiterung der Fernwärme sind die Kommunen und Stadtwerke zuständig.

SPA1 – Grüner Staat: Die Schweizer Energiepolitik im Sektor Energiewirtschaft unter dem Grünen Staat zeichnet sich aus durch einen raschen Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien, einschliesslich Windkraft und alpiner Photovoltaik. Der Staat setzt dabei auf ordnungsrechtliche Instrumente, die von finanziellen Anreizen begleitet werden. Die Energiepolitik fällt hauptsächlich in die Zuständigkeit der Bundesbehörden. Um den EE-Ausbau zu beschleunigen greift der Staat stark in die kantonalen und kommunalen Genehmigungs- und Raumplanungsverfahren ein. Der Staat kümmert sich auch um die Verbesserung und Erweiterung der Netzinfrastruktur (Schwerpunkt auf der Übertragung und Integration in das EU-System). Ausgebaut werden ausserdem Speicherlösungen, darunter netzgebundene Batterien oder Wasserstoff. Die Kernenergie wird im Rahmen der Energiestrategie 2050 schrittweise abgeschafft.

SPA2 – Ökologische Republik: Die Schweizer Energiepolitik im Sektor Energiewirtschaft unter der Ökologischen Republik zeichnet sich vor allem dadurch aus, den inländischen Strombedarf so schnell wie möglich vollständig mit erneuerbaren Energien zu decken. Der Staat interveniert jedoch nur geringfügig zugunsten dezentraler erneuerbarer Energien und Speicher (Haushaltsbatterien). In erster Linie besteht die staatliche Intervention in der Bereitstellung der notwendigen Infrastruktur (flexible Verteilnetzinfrastruktur) und ergänzend in finanziellen Anreizen (Subventionen) sowie in regulatorischen Änderungen (insbesondere der Regulierung der Versorgungsunternehmen). Gefördert werden der Eigenverbrauch und dezentrale Energiegemeinschaften.

SPA3 – Ordoliberaler Staat: Die Schweizer Energiepolitik im Sektor Energiewirtschaft unter dem ordoliberalen Staat ist durch einen Laissez-faire-Ansatz gekennzeichnet, bei dem der Staat den Energiesektor nur schwach in Richtung Dekarbonisierung steuert. Der Staat stellt nur einige grundlegende regulatorische Richtlinien (über Genehmigungen und Raumplanung) oder Informationen für Kunden/Unternehmen (Stromkennzeichnung) oder Netzmanagement zur Verfügung. Der Staat reduziert aber bereits vorhandene Finanzierungs- oder organisationsbasierte politische Instrumente wie Subventionen für erneuerbare Energien oder ambitionierte

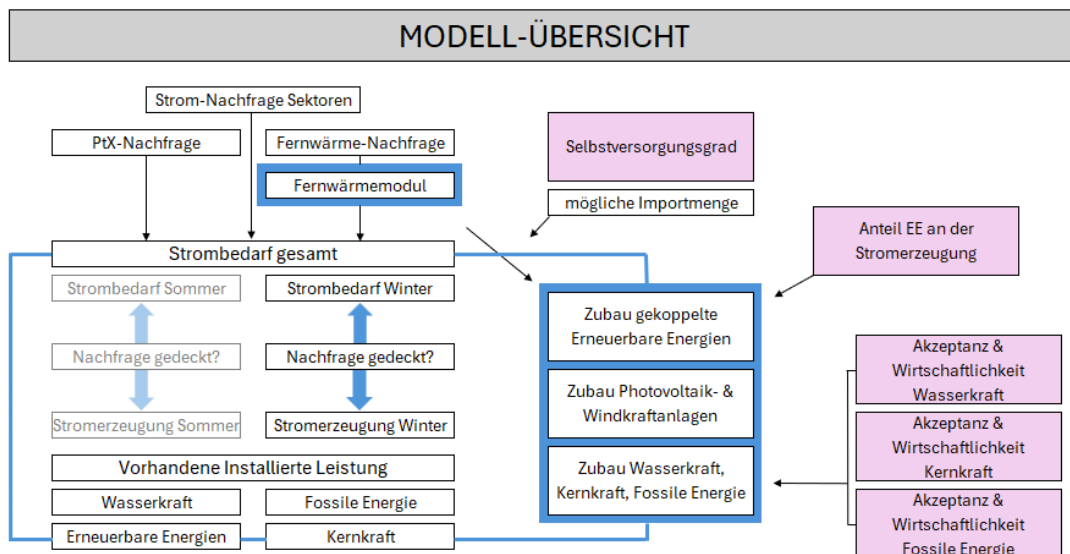
Ziele für staatliche Energieversorgungsunternehmen. Kernkraftwerke werden so lange wie technisch möglich betrieben.

SPA4 – Kompensierender Staat: Die Schweizer Energiepolitik im Sektor Energiewirtschaft unter dem kompensierenden Staat zeichnet sich aus durch die Rücknahme des Atomausstiegs und die schrittweise Einführung von Gas zur Stromerzeugung sowie die Abfederung allenfalls steigender Energiekosten für die Schweizer Konsumenten. Dazu setzt der Staat Instrumente wie Subventionen für neue fossile Energieerzeugungsanlagen ein. Förderinstrumente für kohlenstoffarme Lösungen werden gestrichen oder abgebaut. Die staatlichen Aktivitäten sind stark auf die Bundesebene konzentriert.

7.4. Modellierung

Innerhalb des Modells wird je nach Wahl des SSP-CH und den (zusätzlichen) politischen Instrumenten (SPA) entschieden, durch welche Stromerzeugungstechnologien der anfallende Strombedarf (Stromnachfrage plus Netzverluste) unter Berücksichtigung der Importmöglichkeiten gedeckt werden kann. Hierfür sind eine Reihe von Ausprägungen im Modell notwendig, die sich je nach SSP-CH und SPA unterscheiden. Die folgende Abbildung 34 fasst den Modellablauf zusammen.

Abbildung 34: Schematische Darstellung der Modellierung des Sektors Energiewirtschaft (Strom, Fernwärme)



Neben den lila eingefärbten Szenarioparametern gibt es einige weitere Modellparameter, die Einfluss auf die Modellergebnisse nehmen. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie sich die Wahl von SSP-CH und SPA auf diese Steuergrößen auswirkt.

7.4.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

In diesem Kapitel beschreiben wir, wie sich die in den SSP-CH festgelegten Szenarioparameter und die auf den Szenarioannahmen basierenden Einstellungen der Modellparameter für die Energiewirtschaft auf die Modellierung auswirken. Die konkrete Entwicklung der Szenario- und Modellparameter in den unterschiedlichen Szenarien wird in Kapitel 1.4.3 zusammengefasst und dargestellt.

Das Szenario **SSP0-CH** ist durch einen vergleichsweise hohen Selbstversorgungsgrad (da der Stromverbrauch deutlich zurückgeht, ist nicht viel Import nötig) und durch einen stetig steigenden Anteil erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) an der inländischen Stromerzeugung gekennzeichnet. Wasserkraft ist sehr gut akzeptiert, während in der solidarisch und klimafreundlich orientierten Bevölkerung Kernkraft und Fossile Energie wenig Akzeptanz finden.

In **SSP1-CH** können aufgrund der engen Beziehungen zur EU bei Bedarf auch grössere Strommengen importiert werden. Die inländische Energieversorgung wird vollständig auf erneuerbare Energien aus Wasserkraft, Photovoltaik, Windkraft und Biomasse umgestellt. Auch in diesem Szenario haben die Kernkraft und fossile Energie kaum Akzeptanz in der für Neues offenen Bevölkerung.

In **SSP3-CH** pflegt die Schweiz kaum politische und wirtschaftliche Beziehungen mit dem Ausland. Folglich werden Stromimporte schwieriger und der Strombedarf wird zunehmend durch inländische Stromerzeugung gedeckt. Der Anteil erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) an der Stromerzeugung steigt bis 2085 leicht an. Die Akzeptanz für Fossile Energien und Kernkraft ist hoch, diese werden gegenüber Wasserkraft bevorzugt. Die Laufzeit bestehender Kernkraftwerke wird auf 70 Jahre festgelegt. Zum Bau neuer Kernkraftwerke kommt es allerdings nicht, da dieser ohne zusätzliche politische Interventionen und Garantien bzw. ohne Förderung nicht rentabel ist. Auch beim Zubau neuer Fernwärmekraftwerke wird verstärkt auf Erdgaskraftwerke gesetzt.

SSP4-CH ist zunächst von Investitionen in technologische Entwicklungen (Transformation des Energiesektors, Digitalisierung, Entwicklung künstlicher Intelligenz u.a.) geprägt. Der Anteil erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) an der inländischen Stromversorgung steigt deutlich

an. Später wird das zweigeteilte Land von einer wirtschaftlichen Elite geprägt, die auch auf fossile Energien setzt. Der Selbstversorgungsgrad bleibt weitestgehend stabil. Kernkraft ist wie in SSP3-CH akzeptiert, der Bau neuer Kraftwerke ist allerdings ohne zusätzliche Instrumente nicht umsetzbar, da nicht rentabel.

In **SSP5-CH** sinkt der Selbstversorgungsgrad zunächst, steigt dann allerdings aufgrund von Protektionismus und sich verschlechternden internationaler Beziehungen wieder an. Der Anteil erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) an der inländischen Stromerzeugung steigt zunächst leicht an, kehrt bis 2085 aber wieder auf das aktuelle Niveau zurück. Fossile Energien stellen nach 2035 die günstigste Energieform dar – da externe Kosten fossiler Energieträger nicht berücksichtigt, Umweltstandards abgebaut und weil fossile Energieträger vom Staat subventioniert werden. Gegen Ende des Jahrhunderts werden die fossilen Energieträger jedoch aufgrund zunehmender internationaler Konkurrenz um die Ressourcen immer teurer.

7.4.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

In Kapitel 7.3 wurde der grundsätzliche Charakter der jeweiligen SPA für den Sektor Energiewirtschaft beschrieben. Zu Konkretisierung haben wir für jedes SPA eine Auswahl von Instrumenten getroffen (siehe Tabelle 21). Die Instrumente sind nach SPA und den Bereichen EE-Stromausbau, übergeordnete Regulierungen (inkl. konventionelle Erzeugung) sowie Fernwärme gegliedert.

Für die Modellierung haben wir in einem ersten Schritt bestimmt, auf welche Modellparameter die Instrumente primär einwirken und wie stark die Intensität der Wirkung ist. Dabei haben wir berücksichtigt, dass mehrere Instrumente auf dasselbe Betreffnis einwirken können und die Wirkung so verstärkt wird. Beispielweise verstärken sowohl eine verstärkte Förderung als auch eine Verpflichtung von Solaranlagen auf Dächern den Ausbau der EE-Stromerzeugung.

Die Ausprägung der für den Energiesektor relevanten Szenarioparameter der SSP-CH wurden auf einer ordinalen Skala von -3 bis +3 festgelegt (siehe Kapitel 7.4.3).⁸⁴ Die Wirkung der Instrumente wird primär über eine Verschiebung auf dieser Ordinalskala abgebildet. Dabei wird beachtet, dass der kombinierte Effekt aus SSP-CH und SPA im Bereich von -3 bzw. +3 verbleiben muss - andernfalls wird der Effekt des SPA gekappt. Die Umrechnung der ordinalen Werte der SSP-SPA-Kombinationen in quantitative Modellparameter erfolgt analog zum Vorgehen bei den SSP-CH. Teilweise werden durch die Instrumente auch direkt Modellparameter beeinflusst, z.B. das Verhältnis des EE-Zubaus zwischen Windkraft zu PV.

⁸⁴ Damit weicht das gewählte Vorgehen etwas ab vom Vorgehen in den übrigen Sektoren, bei welchem mit prozentualen Änderungen gearbeitet wird. Das abweichende Vorgehen ist aufgrund modelltechnischer Gründe nötig.

In der nachfolgenden Tabelle werden die ausgewählten Instrumente der jeweiligen SPA und deren Wirkung aufgelistet. Die unterstellte Wirkung der Instrumente auf die Szenarioparameter (und teilweise Modellparameter) ist ebenfalls in Tabelle 21 ausgewiesen.

Tabelle 21: SPA Energiewirtschaft: Zentrale Instrumente der SPA und deren Wirkung

Policy	Instrument	Einführung	Wirkung	Wirkung auf Parameter – ggü.- SPA0		
SPA0 – Status Quo						
	Fortführung: Verordnung über die Zusammenlegung zum Eigenverbrauch (ZEV)	bestehend	EE-Ausbau	-		
	Verschiedene Einspeiseprämien, Investitionsprämien für erneuerbare Energien (wie bisher)	bestehend	EE-Ausbau	-		
	Steuererleichterungen für erneuerbare Energien	bestehend	EE-Ausbau	-		
	Energiestrategie 2050 mit Zielen für erneuerbare Energien und Kernenergie	bestehend	EE-Ausbau, Verbot Kernkraft bleibt bestehen (kein Neubau)	-		
	F&E, P&D-Finanzierung	bestehend	EE-Ausbau, Anlageneffizienz	-		
SPA1 Grüner Staat						
EE-Stromausbau	Raumplanung: Einschränkung kantonaler Befugnisse und Zentralisierung von Planung und Bewilligung mit Priorisierung von Projekten im Bereich der erneuerbaren Energien (inkl. Wind, landwirtschaftliche und alpine PV, Wasserkraft)	vor 2035	mehr EE, u.a. auch Wind	EE-Ausbau +2, verstärkter Fokus auf Wind (+10%)		
	Verpflichtung von Solaranlagen auf Dächern		mehr PV			
	Fortführung und Erweiterung: - kantonale und eidgenössische Steuererleichterungen für EE und Speicherlösungen - Einspeiseprämien, Investitionsprämien für EE (vor allem auf Bundesebene)		mehr EE und mehr Batteriespeicher			
	Harmonisierung der Versorgungsunternehmen für EE-Integration und Netzausbau,		mehr EE			
	übergeordnet Regulierung der Netze, neuer Schwerpunkt auf mehr (EU-)Übertragung		vor 2035		Importe besser gesichert durch gute Anbindung ans Ausland	Selbstversorgung - 2
	Neue Strategie für Speicherung und Übertragung/Verteilung					

Policy	Instrument	Einführung	Wirkung	Wirkung auf Parameter – ggü.- SPA0
	Fortführung der Teilnahme am EU-ETS mit ambitioniertem Absenkpfeifen		Akzeptanz für Fossile bleibt gering	Reduktion der Vollbenutzungsstunden (VBH) um 30%
Fernwärme	Förderung von Energiespeichern und Residualkraftwerken	Hochlauf ab 2035-2060	mehr Einsatz von H2 und Wärmespeichern	ab 2060: +3 auf die H2-Produktion
	EE-Quoten für FW-Erzeugung	vor 2035	steigende EE-Anteile bei der Wärmeerzeugung	Zubau FW mit Holz +5%, GWP +10%, fossile -15%
SPA2 - Ökologische Republik				
EE-Stromausbau	Verstärkung durch Plattformen zur Förderung von Energiegemeinschaften und Eigenverbrauch		mehr EE	EE-Ausbau +2, auch Akzeptanz Wasserkraft steigt an: +1
	Finanzielle Anreize für lokal autarke Energiedrehscheiben (energy hubs)	vor 2035	mehr EE	
	Planung und Genehmigung: Begünstigung dezentraler erneuerbarer Energien und Speicher – neuer Fokus auf Dezentralität		mehr EE	
übergeordnet	zusätzlich Förderung für Energiespeicherung und Flexibilitätsoptionen	vor 2035	mehr Speicher und lokale Produktion, weniger Importe	Selbstversorgung +2
	Fortführung der Teilnahme am EU-ETS mit ambitioniertem Absenkpfeifen		Akzeptanz für Fossile bleibt gering	Reduktion VBH um 30%
Fernwärme	Förderung Speicher und Residualkraftwerke,	Hochlauf ab 2035-2060	mehr Einsatz von H2 und Wärmespeicher	ab 2060: +3 bei H2-Produktion
	ambitioniertes CO2-Gesetz	ab 2050	verstärkter Wechsel auf EE-Erzeugung	Zubau FW mit Holz +5%, GWP +10%, fossile -15%
SPA3 - Ordoliberaler Staat				
EE-Stromausbau	Abschaffung: Steuererleichterungen für Projekte im Bereich der erneuerbaren Energien		EE-Ausbau verlangsamt sich	EE-Ausbau -1

Policy	Instrument	Einführung	Wirkung	Wirkung auf Parameter – ggü.- SPA0
	Abschaffung: Verschiedene Einspeiseprämien, Investitionsprämien für erneuerbare Energien (Bund, Kantone, Gemeinden)	vor 2035	EE-Ausbau verlangsamt sich	
	Aufweichung der Energiestrategie, Abschaffung der konkreten EE-Ausbau-Ziele		EE-Ausbau verlangsamt sich	
übergeordnet	Liberalisierung der Energieversorgungsunternehmen und Strommärkte		EE-Zubau marktgetrieben, mehr Importe, weniger Eigenproduktion	Selbstversorgung - 2
	Kürzung: F&E, P&D-Förderung (EE, Geothermie)	vor 2035	EE-Ausbau nimmt ab, Anlageneffizienz stagniert	EE-Ausbau -1
	Weiterbetrieb von Kernkraftwerken wird erleichtert		Akzeptanz Kernkraft nimmt zu	Akzeptanz +2
	CO2-Gesetz wird aufgeweicht und Ziele gelockert, keine CO2-Bepreisung der Brennstoffe für kleine und mittlere Anlagen, Loslösung von EU-ETS		Akzeptanz Fossile nimmt zu	Akzeptanz +2, steigende VBH: +10%
Fernwärme	CO2-Gesetz wird aufgeweicht und Ziele gelockert	2035	Akzeptanz fossile nimmt zu	Zubau FW mit Fossilen +20%, Holz - 10%, GWP -5%, Elektrodenkessel - 5%
SPA4 - Kompensierender Staat				
EE-Stromausbau	Abschaffung: Steuererleichterungen für Projekte im Bereich der erneuerbaren Energien		EE-Ausbau verlangsamt sich	EE-Ausbau -1
	Abschaffung: Verschiedene Einspeiseprämien, Investitionsprämien für erneuerbare Energien (Bund, Kantone, Gemeinden)	vor 2035	EE-Ausbau verlangsamt sich	
	Aufweichung der Energiestrategie, Abschaffung der konkreten EE-Ausbau-Ziele		EE-Ausbau verlangsamt sich	
übergeordnet	angepasst: F&E, P&D-Förderung, neue auch Förderung Kernenergie		Realisierungszeit von Kernkraftwerken wird kürzer, neue Reaktortypen	Mindestleistung der Anlagen nimmt ab (-0,5 GW)

Policy	Instrument	Einführung	Wirkung	Wirkung auf Parameter – ggü.- SPA0
	Verbot der Kernenergie wird aufgehoben	vor 2035	Akzeptanz von Kernkraft nimmt zu	Akzeptanz +6
	staatliche Einflussnahme auf Investitionsentscheidungen, u.a. Festlegung von Strompreisen, Tarifen usw. durch (Mit-)Eigentum an Versorgungsunternehmen			
	Strategie zur Sicherung der Energieversorgung durch Diversifizierung mit fossilen Brennstoffen und Kernenergie, u.a. mit Handelsabkommen		Akzeptanz Fossile und Kernkraft steigen an, Importe gewinnen jedoch nicht an Bedeutung	Akzeptanz +3, VBH +15%
	Teilnahme am EU-ETS wird aufgekündigt		Akzeptanz fossiler Wärmeerzeugung steigt an	
Fernwärme	CO2-Gesetz wird abgeschafft	vor 2035	Akzeptanz fossile nimmt zu	Zubau FW mit Fossilen +20%, Holz -10%, GWP -5%, Elektrodenkessel -5%

FW: Fernwärme

GWP: Gross-Wärmepumpen

VBH: Vollbenutzungsstunden (bzw. Volllaststunden)

7.4.3. Überblick Einstellungen Szenarioparameter

Im Folgenden wird auf die Szenarioparameter genauer eingegangen:

Selbstversorgungsgrad

Der Selbstversorgungsgrad wirkt sich auf die zulässigen Importmengen aus. Dargestellt ist der im Modell zulässige Netto-Import-Anteil an der Deckung des Winter-Strombedarfes. Über das gesamte Jahr betrachtet liegt der Anteil der Netto-Importe stets niedriger, da im Sommer weniger Strom nachgefragt und gleichzeitig aus dem vorhandenen Kraftwerkspark mehr Strom produziert wird. Ausgehend von 20 % im Basisjahr sinkt der zulässige Netto-Import-Anteil in SSP3-CH auf 0 %, da in diesem SSP-CH keine Netto-Importe zugelassen werden. In SPP4-CH setzt die Schweiz im Bereich Energieversorgung hingegen stark auf internationale Verträge und Zusammenarbeit, weshalb der mögliche Anteil auf 40 % steigt. In den anderen SSP-CH liegen die erlaubten Anteile zwischen diesen Werten.

Tabelle 22: Möglicher Import-Anteil an der Deckung des Winter-Strombedarfes

SSP-CH/Jahr	2023	2035	2060	2085	2100
SSP0-CH	20%	10%	10%	10%	10%
SSP1-CH	20%	15%	15%	15%	15%
SSP3-CH	20%	0%	0%	0%	0%
SSP4-CH	20%	40%	40%	40%	40%
SSP5-CH	20%	30%	30%	20%	20%

Anteil erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) an der Stromerzeugung

Die Zielvorgabe für den Anteil der erneuerbaren Energien – damit sind Photovoltaik- und Windkraftanlagen sowie die gekoppelten Biomassekraftwerke gemeint (Wasserkraft wird separat betrachtet) – an der Stromerzeugung ist zwischen in den verschiedenen SPP-CH sehr unterschiedlich. Ausgehend von den aktuellen rund 10 % steigt der Ziel-Anteil im SSP0-CH bis auf 60 % im Jahr 2085 an. Auch im SSP1-CH steigt der Anteil auf 60 %, wenn auch erst bis 2100. Im SSP4-CH steigt der Anteil langsamer und nur auf 50 %. Besonders langsam steigt der Anteil im SSP3-CH, im SSP5-CH liegt der Anteil langfristig, trotz leichten zwischenzeitlichen Anstiegs, im Jahr 2085 wieder bei 10 %.

Tabelle 23: Zielvorgabe Anteil erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) an der Stromerzeugung

SSP-CH/Jahr	2023	2035	2060	2085	2100
SSP0-CH	10%	20%	50%	60%	60%
SSP1-CH	10%	15%	30%	50%	60%
SSP3-CH	10%	15%	20%	30%	30%
SSP4-CH	10%	20%	40%	50%	50%
Das SSP5-CH	10%	15%	15%	10%	10%

Es bleibt zu beachten, dass es sich hierbei um Zielwerte handelt, die nur erreicht werden, wenn sich aus Stromnachfrage, Import-Möglichkeit und bereits vorhandener Erzeugung genügend hohe Zubau-Bedarfe ergeben.

Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit von Wasserkraft, Kernkraft und fossilen Kraftwerken

Die Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit der Stromerzeugungstechnologien Wasserkraft, Kernkraft und fossile Energie variiert je nach SSP-CH. Der Zubau der Technologien wird anhand des Verhältnisses der einzelnen Werte in den jeweiligen Jahren entschieden. Der Mechanismus erfolgt anhand der quadrierten Anteile der jeweiligen Werte. Dafür wird die Skala von -3 bis +3 zunächst auf eine Skala von 0 bis 6 angepasst, dies erfolgt durch eine einfache Addition mit dem Wert 3. Im nächsten Schritt werden die Werte quadriert und dann die Anteile gebildet.⁸⁵

Tabelle 24: Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit Wasserkraft

SSP-CH/Jahr	2023	2035	2060	2085	2100
SSP0-CH	0	2	2	2	2
SSP1-CH	0	3	3	3	3
SSP3-CH	0	-2	-2	-2	-2
SSP4-CH	0	3	3	3	3
SSP5-CH	0	-2	-1	-1	-1

⁸⁵ Durch das Quadrieren haben wir die Ausprägungen zwischen hoher und niedriger Akzeptanz stärker akzentuiert. Beispiel: Wasserkraft hat im SSP4-CH im Jahr 2100 den Wert 3, Kernkraft den Wert -3 und fossile Kraftwerke den Wert 0. Dies bedeutet auf einer Skala von 0 bis 6: 6 für Wasserkraft, 0 für Kernkraft und 3 für fossile Kraftwerke. In quadrierten Anteilen ergeben sich folgende Anteile: Wasserkraft: $80\% = (6*6) / (6*6 + 0*0 + 3*3)$; Kernkraft: $0\% = (0*0) / (6*6 + 0*0 + 3*3)$; Fossile Kraftwerke: $20\% = (3*3) / (6*6 + 0*0 + 3*3)$. Ohne zu quadrieren würde der Wasserkraft-Anteil nur $67\% = 6 / (6 + 0 + 3)$ und der Anteil fossiler Kraftwerke $33\% = 3 / (6 + 0 + 3)$ betragen.

Tabelle 25: Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit fossiler Kraftwerke

SSP-CH/Jahr	2023	2035	2060	2085	2100
SSP0-CH	-3	-3	-3	-3	-3
SSP1-CH	-3	-3	-3	-3	-3
SSP3-CH	1	1	1	1	1
SSP4-CH	0	0	0	0	0
SSP5-CH	3	3	3	3	3

Für Kernkraft ist die «Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit» in allen SSP-CH bei -3 eingestellt. Zwar liegt die Akzeptanz in SSP3-CH und SSP5-CH deutlich höher, dennoch ist der Zubau von Kernkraftwerken auch in diesen SSP-CH aufgrund der geltenden bestehenden Gesetze nicht umsetzbar, solange keine zusätzlichen politischen Instrumente vorgesehen sind. Erst durch die in SPA4 vorhandenen zusätzlichen Instrumente können neue Kernkraftwerke zugebaut werden.

Weitere Parameter, auf die das Modell zurückgreift, sind:

- Anteil Wind- und Photovoltaikanlagen beim Zubau ungekoppelter erneuerbarer Energien: jeweils 15 % Windkraft, 85 % Photovoltaik. SPA1 erhöht den Wind-Anteil um 10 %: Windkraft 25 %, Photovoltaik 75 %.
- Zubau gekoppelter erneuerbarer Energien: geringer konstanter Zubau an Biomasse (Holz), Biogas und Geothermie. Kein Zubau bei ARA und KVA. SPA1 erhöht den Zubau an Biomasse leicht.
- Die Mindest-Leistung neu zugebauter Wasserkraftwerke und fossiler Gaskraftwerke liegt bei 0.1 GW. Kernkraftwerke werden nur mit SPA4 zugebaut. Dann liegt die Mindest-Leistung bei 0.5 GW.
- Für die Laufzeit der bestehenden Kernkraftwerke werden in SSP0-CH und SSP1-CH 60 Jahre, in den SSP-CH 3, 4 und 5 werden 70 Jahre angenommen. Die Instrumente in SPA3 verlängern die Laufzeit bestehender Kernkraftwerke um 10 Jahre.
- Vor dem Zubau neuer Kraftwerke können die Volllaststunden fossiler Gaskraftwerke bis zu einem eingestellten Prozentsatz von 80 % erhöht werden⁸⁶. SPA1 und SPA2 lassen nur eine Erhöhung auf 50 % zu, SPA3 und SPA4 dagegen sogar eine Erhöhung auf 90 bzw. 95 %.
- Die Anteile beim Zubau neuer Fernwärmekraftwerke (unabhängig vom oben genannten Zubau bei gekoppelten Erneuerbaren) betragen in SSP0-CH und SSP1-CH:
 - 2023: Biomasse (Holz) 20 %; Erdgas 15 %; Grosswärmepumpen 55 % und E-Kessel 10 %.
 - ab 2035: Biomasse (Holz) 25 %; Erdgas 0 %; Grosswärmepumpen 60 % und E-Kessel 15 %.
 In SSP4-CH gehen wir von einem Rückgang der Erdgas-Anteile auf höherem Niveau aus:

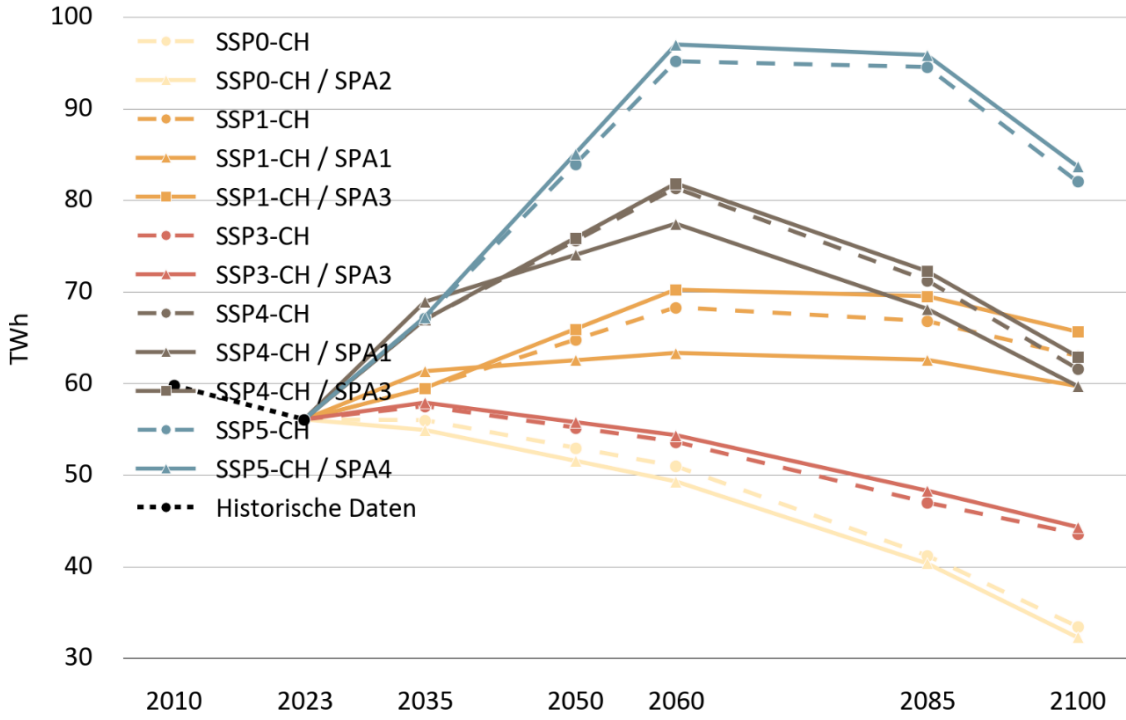
⁸⁶ 100 % entsprechen dabei 8760 Stunden, das sind alle Stunden eines Jahres (365*24 Stunden).

- 2023: Biomasse (Holz) 10 %; Erdgas 35 %; Grosswärmepumpen 45 % und E-Kessel 10 %.
- 2035: Biomasse (Holz) 13 %; Erdgas 26 %; Grosswärmepumpen 48 % und E-Kessel 13 %.
- ab 2060: Biomasse (Holz) 15 %; Erdgas 20 %; Grosswärmepumpen 50 % und E-Kessel 15 %.
- In SSP3-CH und SSP5-CH machen Erdgaskraftwerke konstant mehr als ein Drittel aus:
 - Biomasse (Holz) 10 %; Erdgas 35 %; Grosswärmepumpen 45 % und E-Kessel 10 %.
- SPA1 kombiniert mit SSP4 reduziert den Erdgas-Anteil ab 2035 weiter, SPA 3 und 4 erhöhen dagegen den Erdgas-Anteil auf bis zu 55 %.
- Ohne zusätzliche politische Instrumente findet keine Wasserstoff-Produktion im Inland statt. Folglich sind die Anteile der Produktion im Winter/Sommer für die Referenzszenarien (SPA0) der SSP-CH irrelevant. In SPA1 und SPA2 ergibt sich eine inländische Wasserstoffproduktion, die zwischen 2023 und 2060 ansteigt und danach konstant bleibt. 25 % der Produktion findet im Winterhalbjahr statt.

7.4.4. Strom- und Fernwärmeverbrauch

Der Verbrauch an Strom und Fernwärme in den SSP-CH und den jeweiligen Kombinationen mit den SPA sind zentrale Inputs für die Modellierung des Sektors Energiewirtschaft. Diese Grössen werden im Wesentlichen durch die Nachfrage in den Sektoren Gebäude, Industrie und Verkehr bestimmt (siehe Modellierung und Ergebnisse der Hervorgehenden Kapitel). Hinzu kommen der Eigenverbrauch im Energiesektor sowie der Verbrauch für CCS und NET. Nachfolgende Abbildung 35 zeigt den gesamten Stromverbrauch für alle Kombinationen aus SSP-CH und SPA. Den Fernwärmebedarf der Kombinationen aus SSP-CH und SPA haben wir Abbildung 36 dargestellt.

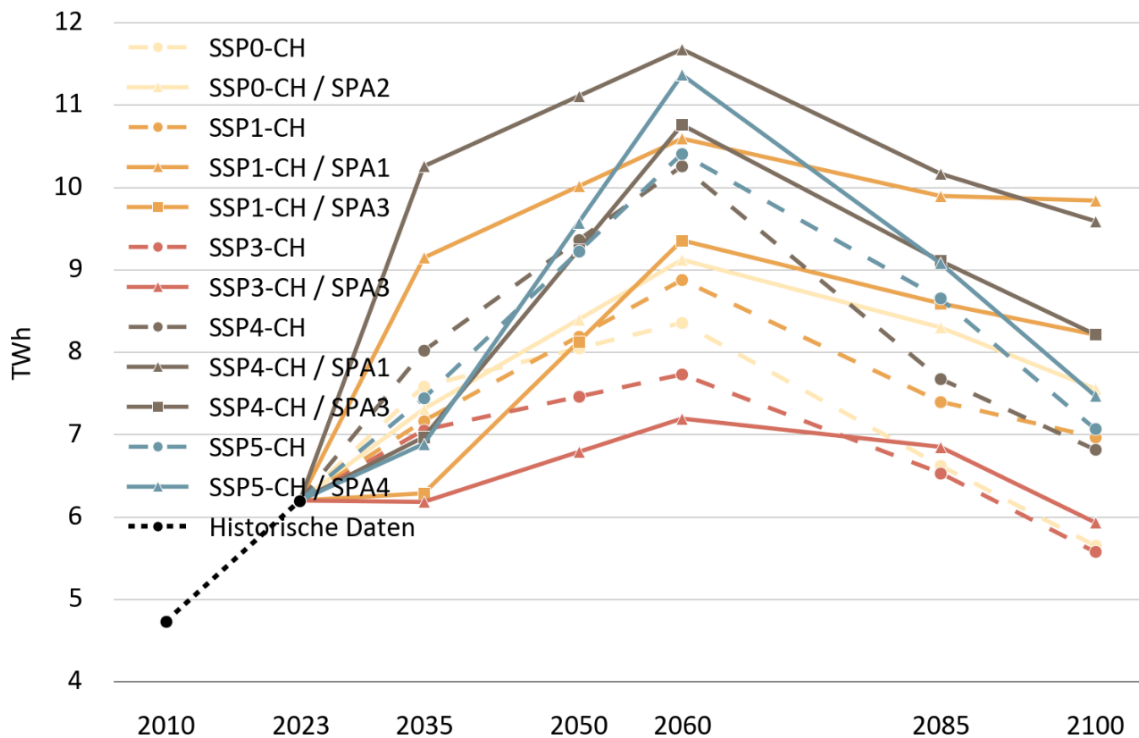
Abbildung 35: Gesamter Stromverbrauch in den betrachteten Szenarien (in TWh)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Abbildung 36: Gesamter Fernwärmeverbrauch in den betrachteten Szenarien (in TWh)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos.

7.5. Ergebnisse und Diskussion

7.5.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

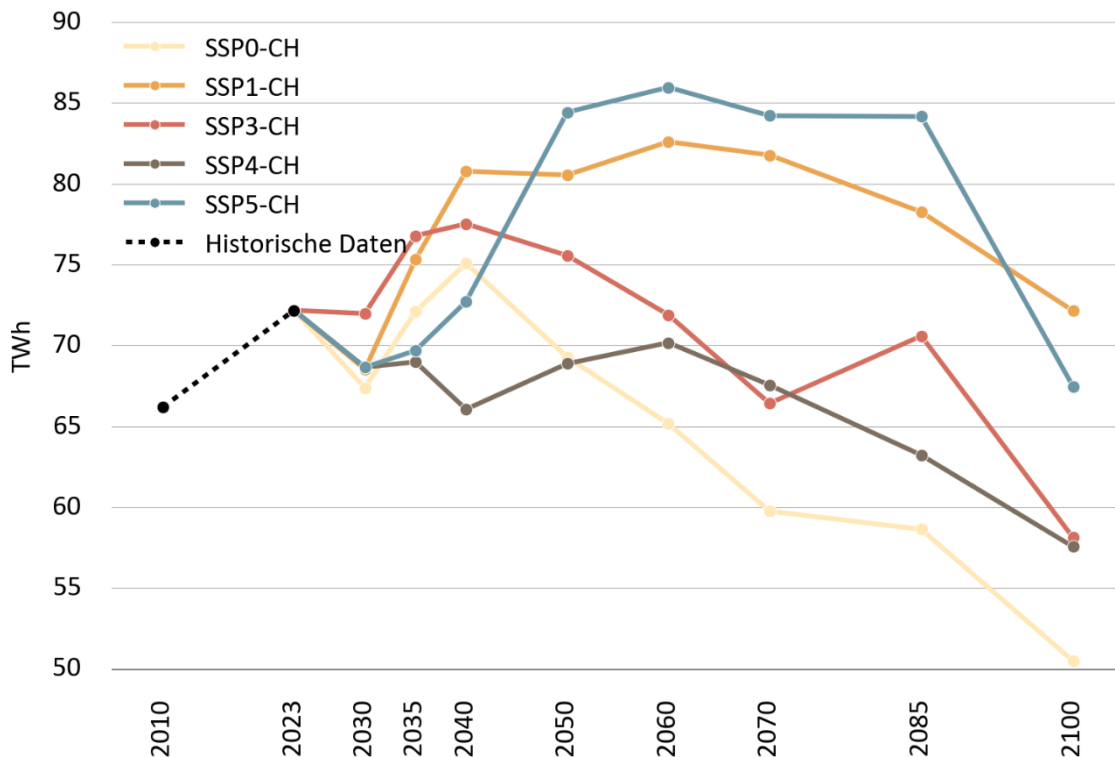
In Abbildung 37 ist die Stromerzeugung je SSP-CH dargestellt. Die Stromerzeugung hängt stark von der Stromnachfrage (Abbildung 35), den Im- und Exporten sowie den Netzverlusten ab.

Bis zum Jahr 2060 ergibt sich in SSP4-CH und SSP5-CH ein deutlich steigender Stromverbrauch. Auch in SSP1-CH steigt der Stromverbrauch im selben Zeitraum leicht, in SSP0-CH und SSP3-CH geht der Stromverbrauch leicht zurück. Nach 2060 geht der Stromverbrauch in allen Szenarien zurück und liegt bis zum Jahr 2100 in SSP1-CH und SSP4-CH in etwa wieder auf dem aktuellen Niveau. In SSP5-CH wird auch im Jahr 2100 noch deutlich mehr, in SSP0-CH und SSP3-CH deutlich weniger Strom verbraucht als aktuell.

In den beiden letztgenannten Szenarien geht die Stromerzeugung parallel zum Verbrauch, nach einem kurzen leichten Anstieg, bis Ende des Jahrhunderts zurück. Auch in SSP1-CH verläuft die Stromerzeugung ähnlich zum Stromverbrauch. Nach einem deutlichen Anstieg bis 2060 wird im Jahr 2100 wieder ähnlich viel Strom inländisch produziert wie aktuell. In SSP4-CH steigt die inländische Erzeugung trotz wachsendem Stromverbrauch nicht an – die zusätzliche Nachfrage

wird über zusätzliche Importe gedeckt. Langfristig geht mit dem Stromverbrauch auch die inländische Erzeugung zurück.

Abbildung 37: Gesamte Stromerzeugung je SSP-CH (in TWh)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

In der nachfolgenden Abbildung 38 ist die Stromerzeugung in den SSP-CH nach Erzeugungstechnologien aufgeschlüsselt. Entsprechend den Annahmen zur Modellierung (siehe Unterkapitel 7.1.1) bleiben in allen SSP-CH die bestehenden Wasserkraftwerke bis zum Jahr 2100 erhalten und die Wasserkraft bleibt die zentrale Erzeugungstechnologie. In SSP1-CH steigt die jährliche Erzeugung aus Wasserkraft durch den starken Zubau auf 56 TWh, in den anderen Szenarien werden jährlich zwischen 40 und 47 TWh Strom aus Wasserkraft erzeugt.

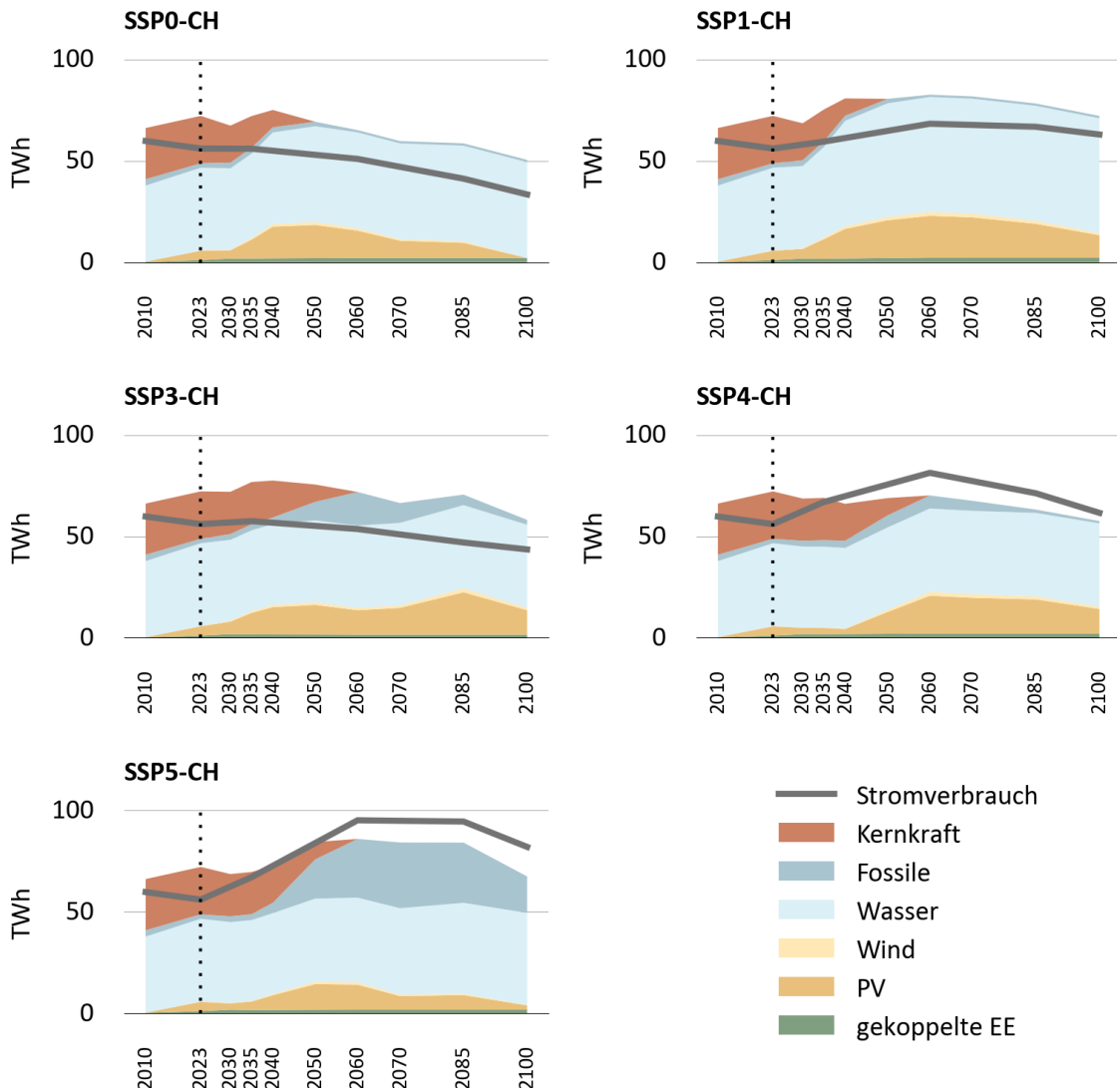
Bis etwa Anfang der 2050er-Jahre fällt in allen SSP-CH die Stromerzeugung aus Kernkraftwerken weg (Ausserbetriebnahme der bestehenden Kraftwerke und Verbot neuer Kernkraftwerke).

In SSP0-CH wird der Wegfall der Kernkraft überwiegend durch Zubau von Wasserkraft und Photovoltaik kompensiert. Aufgrund des deutlich sinkenden Stromverbrauchs und der konstanten Erzeugung durch Wasserkraft werden langfristig kaum noch Photovoltaik-Anlagen benötigt.

Die Stromnachfrage kann durch Wasserkraft und gekoppelte Wärmekraftwerke gedeckt werden. Auch in SSP1-CH ersetzen Wasserkraft- und Photovoltaik-Anlagen die wegfallende Kernkraft. Hier wird, wegen des gegenüber SSP0-CH höheren Stromverbrauchs und weil ein hoher Selbstversorgungsgrad sowie hohe EE-Anteile angestrebt werden, bis Ende des Jahrhunderts Photovoltaik zugebaut. Langfristig geht aufgrund des sinkenden Stromverbrauchs die installierte Leistung und damit die Erzeugung aus Photovoltaik-Anlagen wieder zurück. In SSP3-CH ersetzen neben Photovoltaik-Anlagen hauptsächlich fossile Kraftwerke die Kernenergie. Langfristig erhöht sich der PV-Anteil, da der Anteil erneuerbarer Energien (ohne Wasserkraft) an der Stromerzeugung steigen soll. In SSP4-CH werden die Kernkraftwerke vorwiegend durch PV-Anlagen ersetzt. Aufgrund des möglichen hohen Import-Anteils und des langfristigen Rückgangs des Stromverbrauchs bleibt der Kraftwerkspark bis Ende des Jahrhunderts nahezu konstant. Aufgrund der rückläufigen Stromnachfrage scheidet der Grossteil der wenigen fossilen Kraftwerke nach und nach aus, in den letzten Jahren des Jahrhunderts müssen auch wegfallende PV-Anlagen nicht mehr ersetzt werden. In SSP5-CH ergänzt die Stromerzeugung aus fossilen Energien die Wasserkraft. Neue fossile Anlagen werden zugebaut, um wegfallende Kernkraftwerke zu ersetzen. Auch in SSP5-CH wird PV zugebaut, die Mengen sind jedoch deutlich geringer als in den anderen Szenarien. In den letzten Jahren des Jahrhunderts sorgt der sinkende Stromverbrauch auch hier für einen Rückgang der gesamten installierten Leistung. Wegfallende fossile Anlagen werden dann nicht mehr ersetzt.

Die Bedeutung der Windenergie bleibt in allen SSP-CH gering. Gleiches gilt für die Stromerzeugung aus gekoppelten Kraftwerken (Strom und Wärme) auf Basis erneuerbarer Energien.

Abbildung 38: Stromverbrauch und Stromerzeugung nach Erzeugungstechnologie je SSP-CH (in TWh)



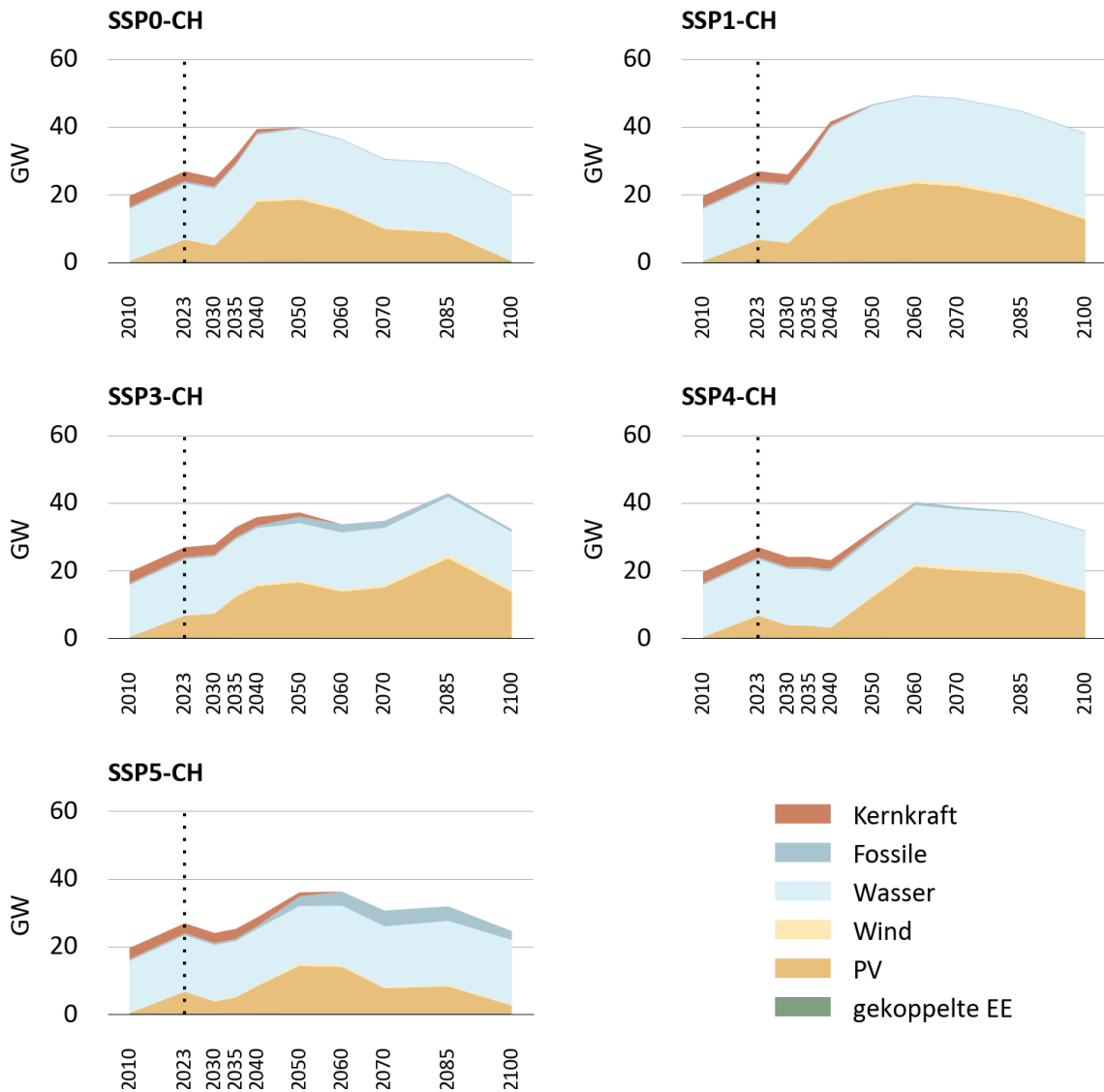
Fossile inkl. fossile Abfälle der KVA; Erneuerbare inkl. biogene Anteile des Abfalls. Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Ergänzend zur Stromerzeugung nach Technologien ist in Abbildung 38 die Stromnachfrage als Linie dargestellt (ohne Netzverluste). Der Vergleich der Linie mit der Fläche dient als Indikator für die jährlichen Nettoimporte bzw. Nettoexporte. In SSP4-CH wird nach 2040, nach dem Wegfall der Kernenergie, ein signifikanter Anteil der Strommenge importiert. Demgegenüber wird in SSP0-CH, aufgrund der starken Verbrauchsreduktion bei konstanter Produktion aus Wasserkraft, langfristig Strom exportiert. Auch in SSP1-CH und SSP3-CH wird netto Strom exportiert, während in SSP5-CH die Importe überwiegen.

Abbildung 39 stellt die installierte Leistung nach Erzeugungstechnologien pro SSP-CH dar. Die erzeugte Strommenge (Arbeit) ist abhängig von der installierten Leistung und den Stunden, in denen die «Kraftwerke» in Betrieb sind. Kernkraftwerke weisen in der Regel hohe Vollbenutzungs- bzw. Volllaststunden auf. Dadurch erklärt sich die vergleichsweise geringe Kraftwerksleistung im Vergleich zur erzeugten Strommenge. Umgekehrtes ist der Fall bei PV. Hier zeigen sich eine hohe installierte Leistung und tiefe Vollbenutzungstunden. In Szenarien mit starkem Zubau an PV nimmt die installierte Erzeugungsleistung (zwischenzeitlich) sehr stark zu.

Abbildung 39: Installierte Stromerzeugungsleistung nach Erzeugungstechnologie je SSP-CH (in GW)

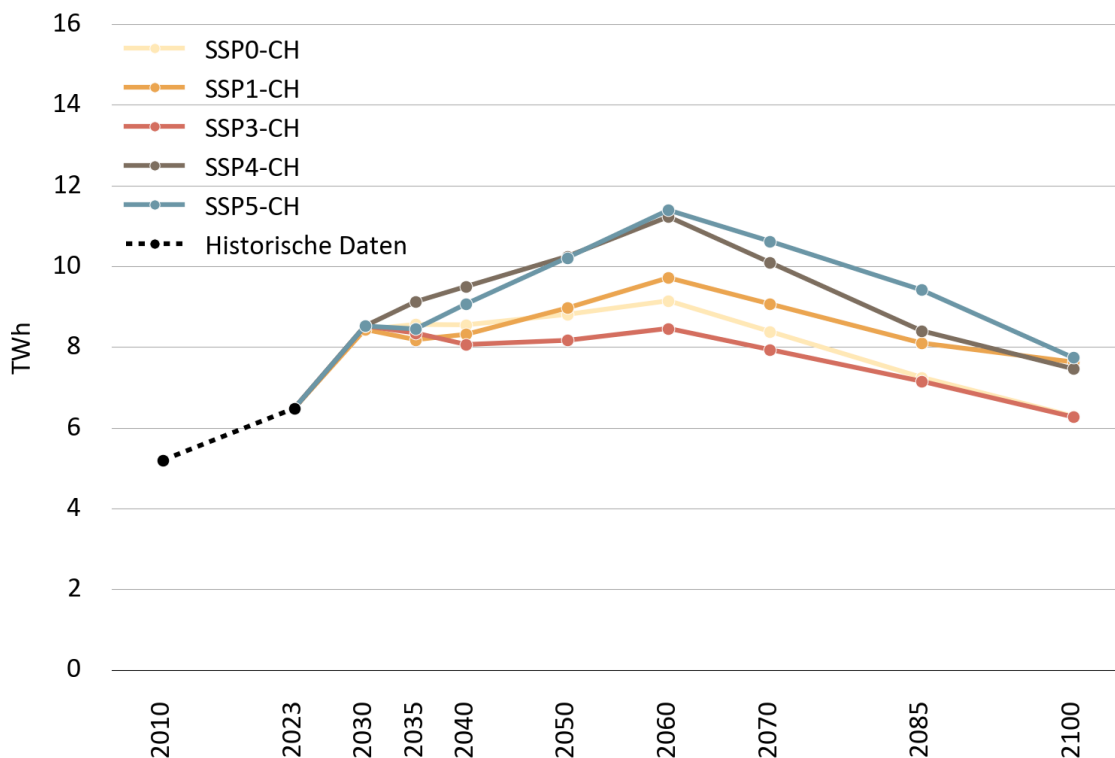


Fossile inkl. fossile Abfälle der KVA; Erneuerbare inkl. biogene Anteile des Abfalls.
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Die Fernwärmeerzeugung hängt direkt ab von der Fernwärmefachfrage, wobei auch hier die bei der Wärmeverteilung auftretenden Netzverluste berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu Strom wird Fernwärme weder importiert noch exportiert. Die Nachfrage nach Fernwärme steigt in allen SSP-CH an (Abbildung 36), somit nimmt auch die Fernwärmeerzeugung in allen Szenarien zu (Abbildung 40). Nach 2060 nimmt die Nachfrage nach Fernwärme in den SSP-CH wieder ab, u.a. aufgrund von gesteigerter Energieeffizienz bei Gebäuden und teilweise auch aufgrund des Bevölkerungsrückgangs. Entsprechend sinkt auch die Fernwärmeerzeugung nach 2060 in allen SSP-CH. In SSP0-CH und SSP3-CH fällt die Erzeugung bis zum Jahr 2100 wieder auf das Niveau des Jahres 2023, in den anderen SSP-CH bleibt sie leicht erhöht.

Abbildung 40: Gesamte Fernwärmeerzeugung je SSP-CH (in TWh)



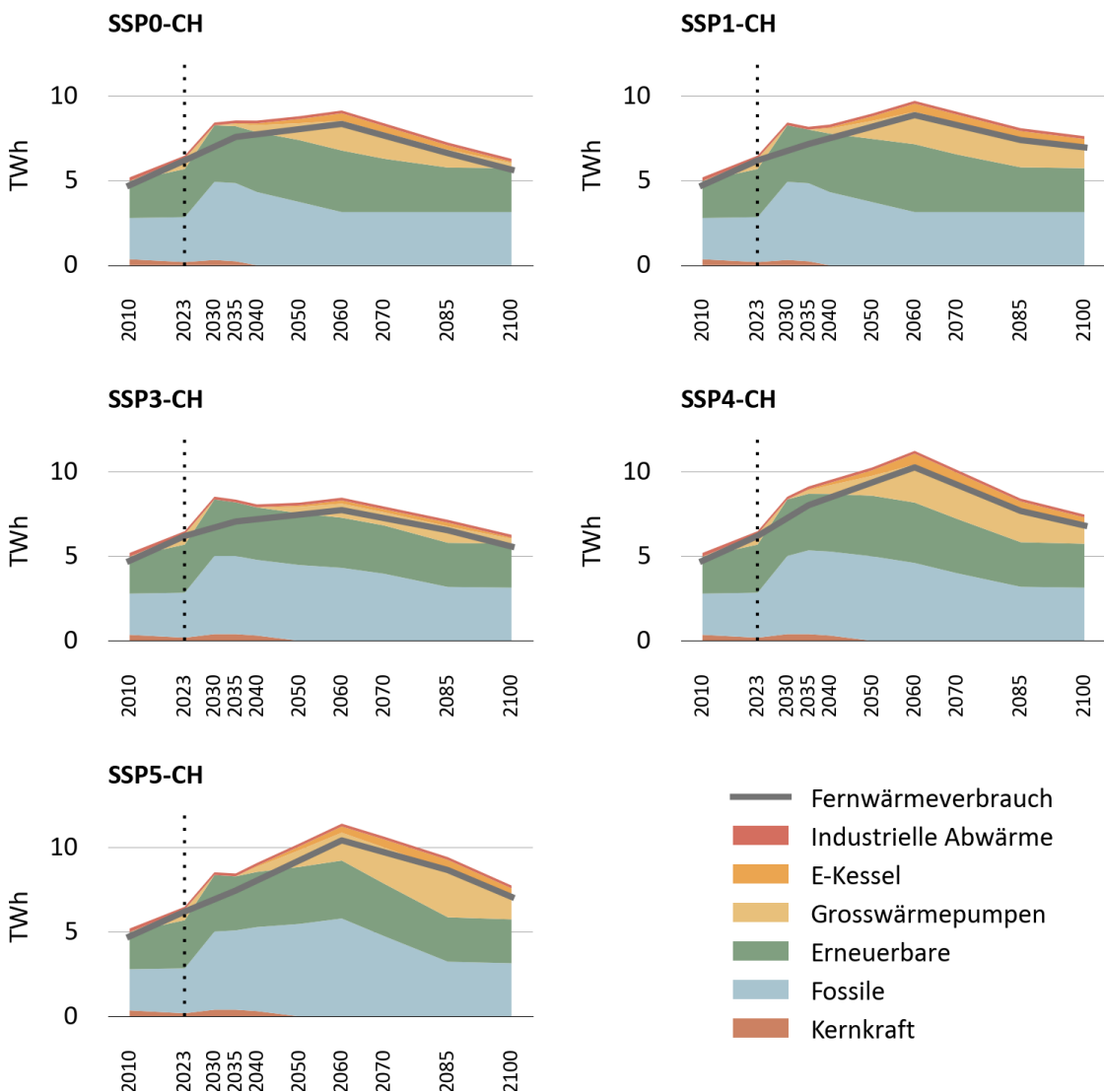
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Die Wärmeerzeugung durch die Müllverbrennung in KVA bildet auch weiterhin in allen SSP-CH den Sockel der Fernwärmeerzeugung (Abbildung 41). Beinahe 50 % des Mülls sind erneuerbare Abfälle (biogene Abfälle). Dieser Anteil wird in den Darstellungen den «Erneuerbaren» zugeordnet, während der fossile Anteil des Mülls bei der fossilen Erzeugung subsumiert wird. Aktuell beträgt der Anteil der Fernwärmeerzeugung der KVA-Anlagen sowohl bei den

«Erneuerbaren» als auch bei der fossilen Erzeugung etwa 60 %. Langfristig scheiden Gas- und Biomasse-Kraftwerke (wieder) aus dem Erzeugungsmix, während der Sockel aus KVA und (bei den Erneuerbaren) ARA bis Ende des Jahrhunderts erhalten bleibt. Kurzfristig erfolgt der Zubau der Fernwärmeerzeugung in allen SSP-CH auch über (gekoppelte) fossile Kraftwerke (Erdgas). Später gewinnen die Grosswärmepumpen stärker an Bedeutung (wobei der Anteil fossiler Kraftwerke in SSP5-CH erst nach 2060 zurückgeht).

Abbildung 41: Fernwärmeverbrauch und -erzeugung nach Erzeugungstechnologie je SSP-CH (in TWh)

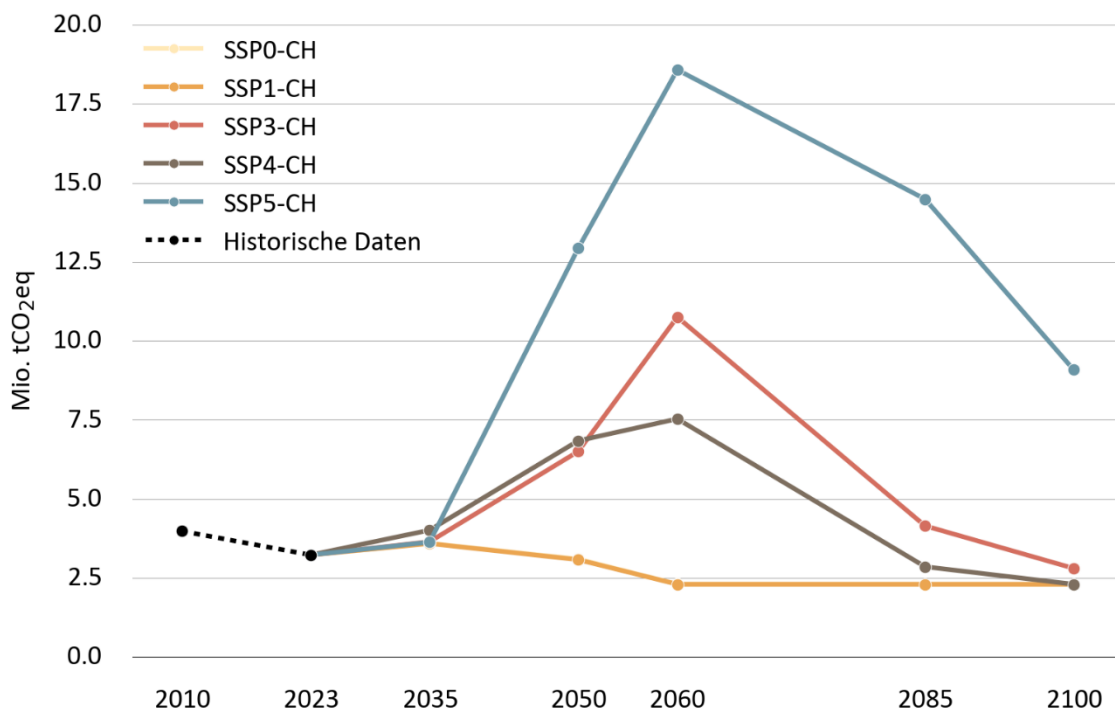


Fossile inkl. fossile Abfälle der KVA; Erneuerbare inkl. biogene Anteile des Abfalls.
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Die Treibhausgasemissionen des Sektors Energiewirtschaft aus der Erzeugung von Strom und Fernwärme pro SSP-CH sind in Abbildung 42 dargestellt. Im Jahr 2023 lagen die Treibhausgasemissionen gemäss dem nationalen Treibhausgasinventar bei 3.2 Mio. tCO₂eq. In SSP0-CH verbleiben die Emissionen bis zum Jahr 2050 in etwa auf diesem Niveau und gehen anschliessend leicht zurück, es verbleiben die Emissionen durch die Kehrrechtverwertung (KVA). In SSP1-CH ist dieselbe Entwicklung zu beobachten. Die Akzeptanz für fossile Energie ist auch hier nicht vorhanden, ab 2035 werden auch keine Gaskraftwerke zur Fernwärmeerzeugung zugebaut, somit verbleiben nach 2060 ausschliesslich die Emissionen der KVA. Starke (SSP4-CH) bis sehr starke (SSP3-CH) Zunahmen der Treibhausgasemissionen sind in den anderen Referenzszenarien zu beobachten, in SSP5-CH steigen die Emissionen sogar auf über 15 Mio. tCO₂eq. Hier ist die Zunahme der Emissionen überwiegend auf den (unterschiedlich hohen) Zubau von Gaskraftwerken zur Strom- und Fernwärmeerzeugung zurückzuführen.

Abbildung 42: Gesamte Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft je SSP-CH (in Mio. tCO₂eq)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

7.5.2. Klimapolitische Instrumente (SPA) in Kombination mit SSP-CH

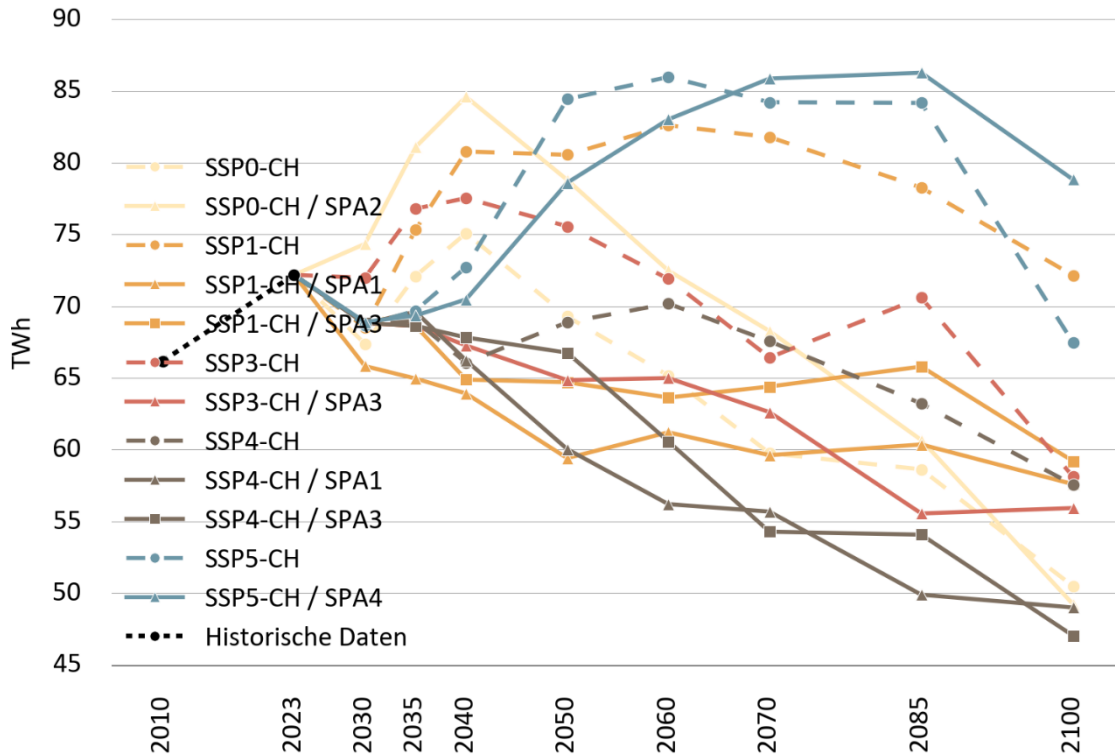
Die Entwicklung der Stromerzeugung (in TWh) und die installierte Leistung (in GW) nach Erzeugungstechnologien der SSP-CH in Kombination mit den SPA sind in Abbildung 44 und Abbildung

45 beschrieben. Bei den Kombinationen mit SPA1 (ab 2040) und in geringerem Umfang auch mit SPA2 verringert sich im Vergleich zu den SPA0 der Stromverbrauch. Bei den Kombinationen mit SPA3 (kombiniert mit SSP1 erst ab 2040) und SPA4 steigt hingegen der Stromverbrauch leicht und dadurch die Nachfrage nach Strom an. Die Unterschiede zwischen den SPA-Pfaden und den Baseline-Szenarien (Status Quo Szenarien) sind beim Stromverbrauch jedoch insgesamt wenig ausgeprägt, da sich die Effekte «Energieeffizienz» und «Durchdringung mit Elektroanwendungen» in Bezug auf die Stromnachfrage zumindest teilweise kompensieren.

Die Wirkung der SPA auf die Höhe des Stromverbrauchs überträgt sich teilweise auch auf die Höhe der Stromerzeugung, es zeigt sich jedoch kein einheitliches Muster. In den SSP-CH-Kombinationen mit SPA1 nimmt die Stromerzeugung im Vergleich zu den jeweiligen Baseline-Szenarien ab. Dies ist das Resultat davon, dass durch SPA1 mehr Importe möglich sind. Die Stromerzeugung in SSP0-CH ist in Kombination mit SPA2 zunächst höher als in der Baseline, da SPA2 darauf abzielt, den Strombedarf durch inländische Erzeugung zu decken (im Modell wird der Selbstversorgungsgrad durch SPA2 erhöht). Gegen Ende des Jahrhunderts ist die Stromerzeugung dann niedriger als in der Baseline, da durch SPA2 anstatt Wasserkraftwerken vermehrt PV- und Windanlagen zugebaut werden. Diese werden aufgrund sinkender Nachfrage später nicht mehr ersetzt, wohingegen die Wasserkraftwerke in der Baseline aufgrund der höheren Lebensdauer der Anlagen weiter Strom produzieren.

Die Instrumente von SPA3 führen aufgrund der grösseren Import-Möglichkeiten zu einer geringeren inländischen Erzeugung. In Kombination mit SSP4-CH führt SPA3 um 2040 zu einer «kurzzeitigen» Erhöhung der Stromerzeugung. Diese ist auf die längere Laufzeit der Kernkraftwerke zurückzuführen, Beznau I und II bleiben somit über 2045 hinaus am Netz. SPA4 führt langfristig zu einer leicht höheren Erzeugung, da die neu gebauten Kernkraftwerke weiterlaufen, auch wenn die Nachfrage sinkt (Abbildung 44).

Abbildung 43: Gesamte Stromerzeugung je SSP-CH und SPA (in TWh)

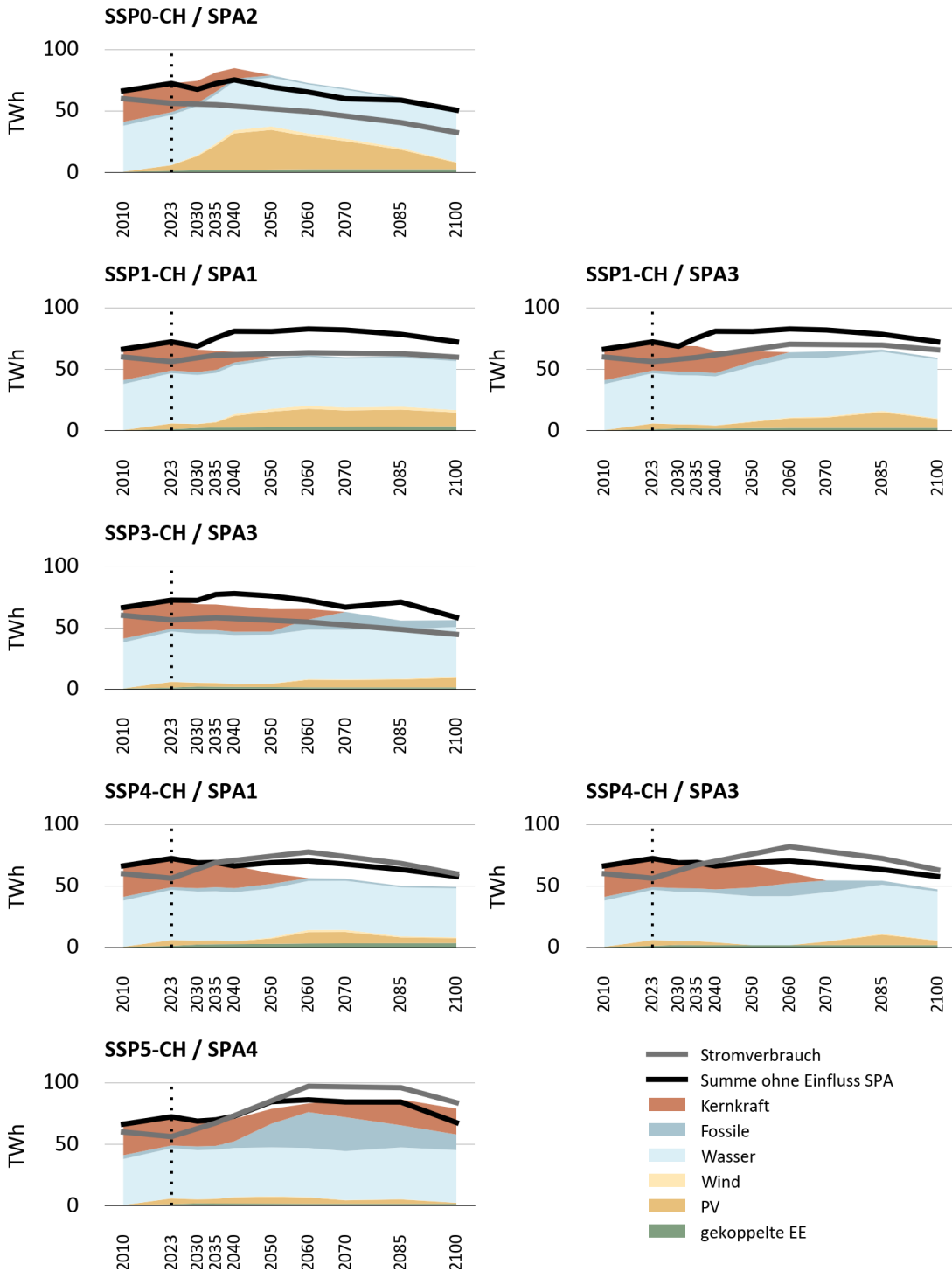


Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Durch die zusätzlichen Instrumente in SPA2 steigt die installierte Leistung in der Kombination mit SSP0-CH im Zeitraum bis 2085 deutlich an (Abbildung 45). Der Zubau fällt hauptsächlich auf PV. Hingegen sinkt in den SPA-Kombinationen mit dem SSP1-CH (SPA1, SPA3) die installierte Leistung – es wird deutlich weniger zugebaut, da mehr Importe möglich sind. Die höheren Import-Möglichkeiten bewirken eine geringere installierte Leistung bei PV-Anlagen. Bei der Kombination mit SPA3 bleibt zudem die Leistung der Kernkraftwerke aufgrund der längeren Laufzeiten länger erhalten. SPA4 wiederum erhöht sich die installierte Leistung der Kernkraftwerke, während die installierte Leistung von Photovoltaik deutlich und die von fossilen Kraftwerken in geringerem Masse sinkt.

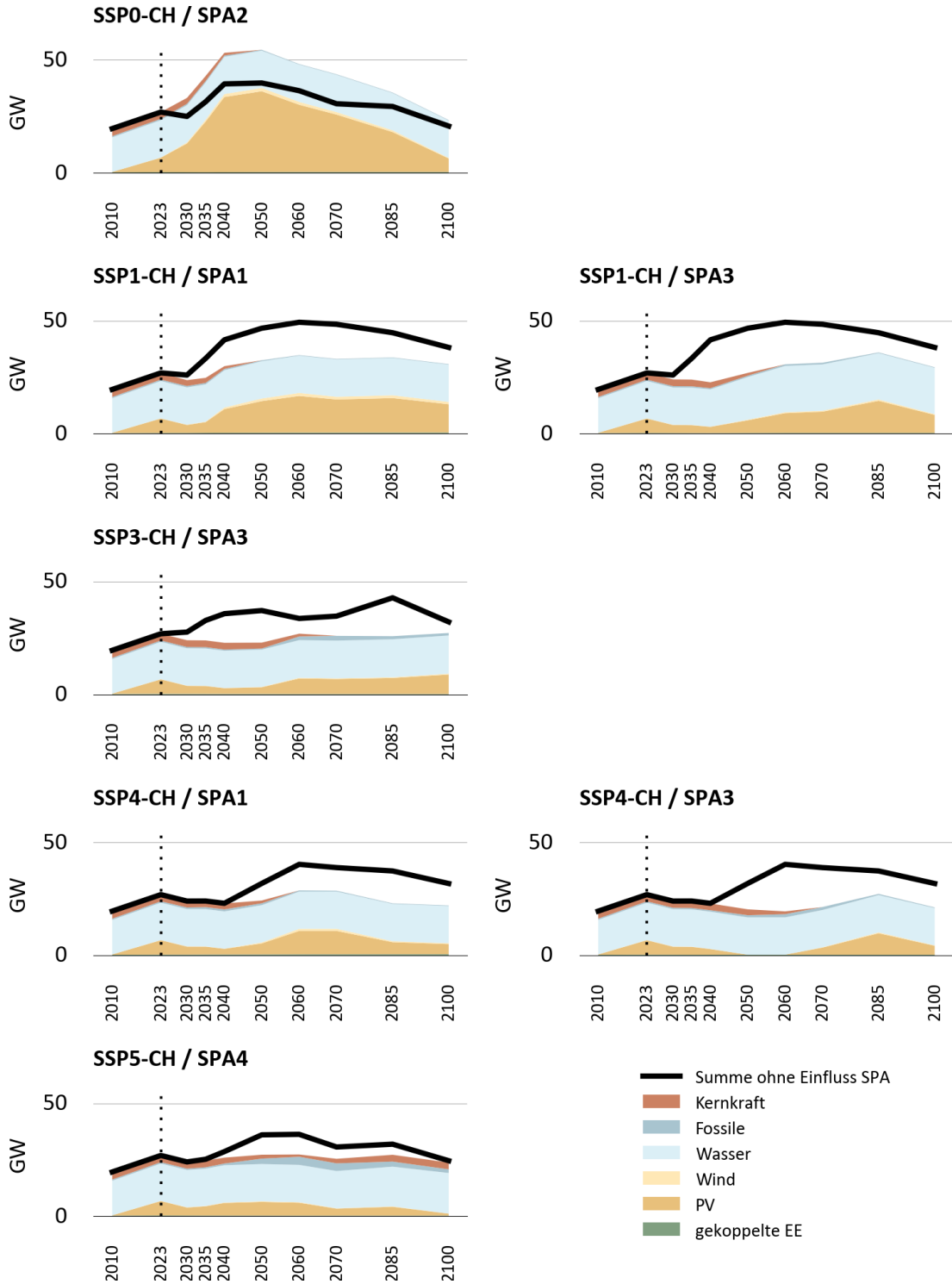
Abbildung 44: Stromverbrauch und Stromerzeugung nach Erzeugungstechnologie je SSP-CH und SPA (in TWh)



Fossile inkl. fossile Abfälle der KVA; Erneuerbare inkl. biogene Anteile des Abfalls
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Abbildung 45: Installierte Stromerzeugungsleistung nach Erzeugungstechnologie je SSP-CH und SPA (in GW)



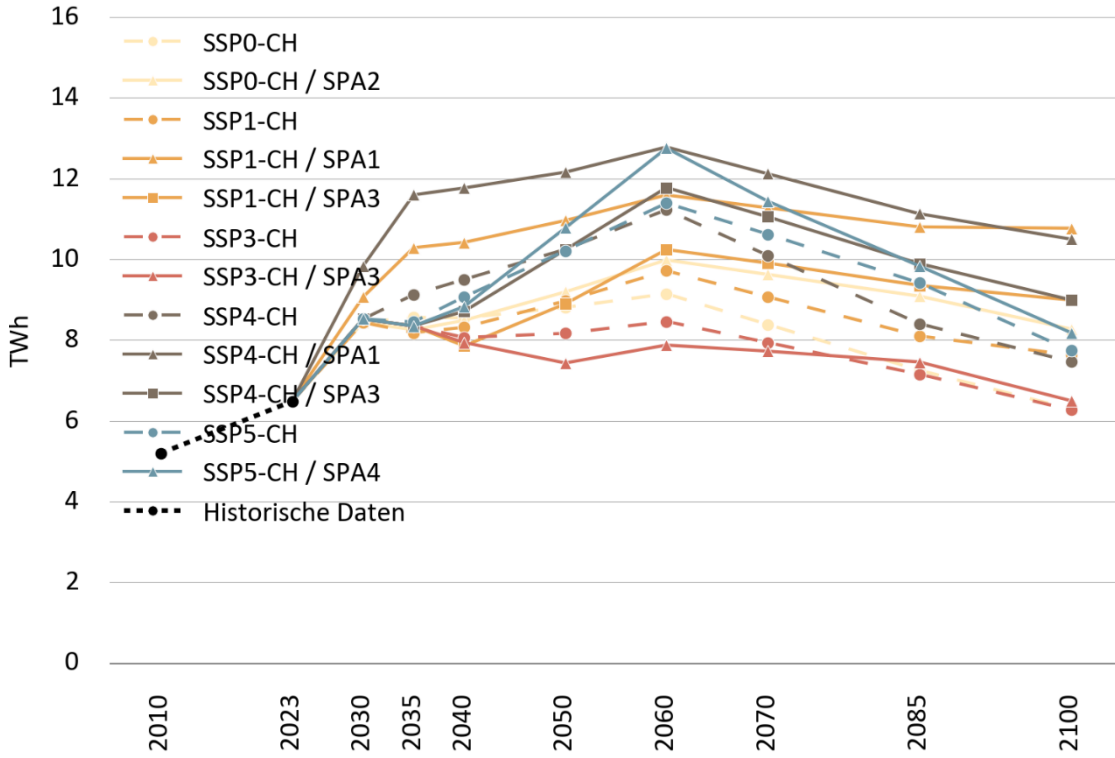
Fossile inkl. fossile Abfälle der KVA; Erneuerbare inkl. biogene Anteile des Abfalls.
 Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Die Fernwärmeerzeugung nach Erzeugungstechnologie je SSP-CH und SPA ist in Abbildung 47 beschrieben. Die Gesamterzeugung in den Baseline-Szenarien (SPA0) haben wir dabei als schwarze Line ausgewiesen. Durch die zusätzlichen Instrumente in SPA1 erhöht sich der Fernwärmebedarf und dementsprechend auch die Fernwärmeerzeugung. Beim Neubau von Fernwärmekraftwerken wird im Vergleich zum Referenzszenario weniger auf Erdgaskraftwerke und dafür vermehrt auf Biomasse (Holz), Grosswärmepumpen und E-Kessel gesetzt. Folglich erhöht sich zunächst die Erzeugung aus fossiler Energie (aufgrund der höheren Nachfrage) – langfristig liegt dieser Wert aber tiefer als in SPA0 bzw. auf dem gleichen Niveau, sobald nur noch in den KVA fossile Energie (Abfälle) genutzt wird. Die Erzeugung aus erneuerbaren Energien, durch E-Kessel und speziell durch Grosswärmepumpen ist konstant höher als in der Baseline-Variante. Auch in der Kombination SSP0-CH-SPA2 erhöhen sich Fernwärmebedarf und -erzeugung gegenüber der SPA0-Variante, allerdings erst ab 2040. Hier gewinnt die Erzeugung aus Grosswärmepumpen langfristig immer mehr an Bedeutung, während fossile Gaskraftwerke früher ausscheiden.

Durch die Instrumente in SPA3 und SPA4 sinkt der Fernwärmebedarf zunächst, langfristig liegt er aber über dem Niveau der SPA0-Varianten. Es wird mittelfristig deutlich mehr Fernwärme aus fossiler Energie erzeugt. Gegen Ende des Jahrhunderts lässt dieser Effekt nach, dafür gewinnen Grosswärmepumpen an Bedeutung.

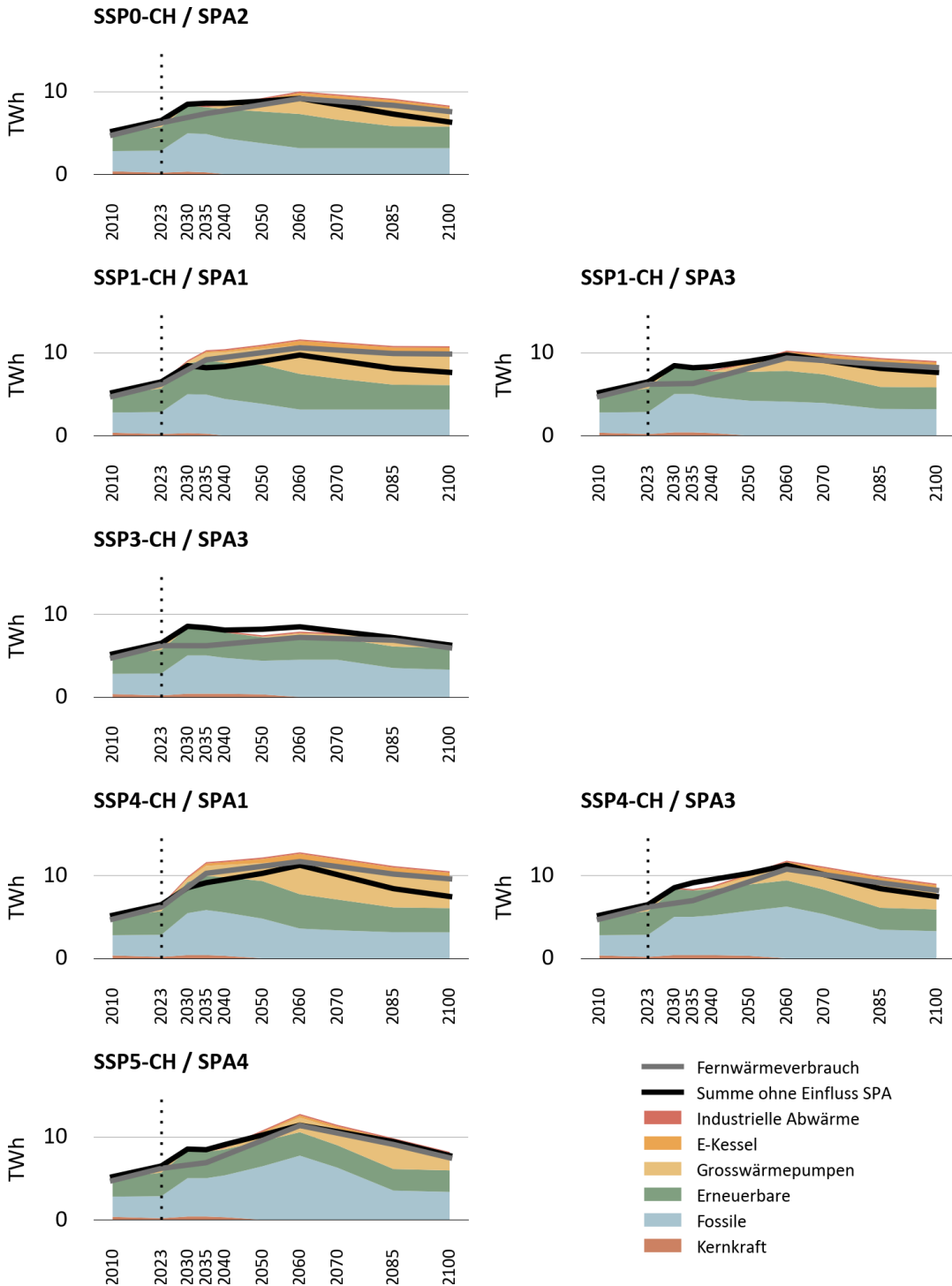
Abbildung 46: Gesamte Fernwärmeerzeugung je SSP-CH und SPA (in TWh)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Abbildung 47: Fernwärmeverbrauch und Fernwärmeerzeugung nach Erzeugungstechnologie je SSP-CH und SPA (in TWh)



Fossile inkl. fossile Abfälle der KVA; Erneuerbare inkl. biogene Anteile des Abfalls. Grafik Prognos.
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

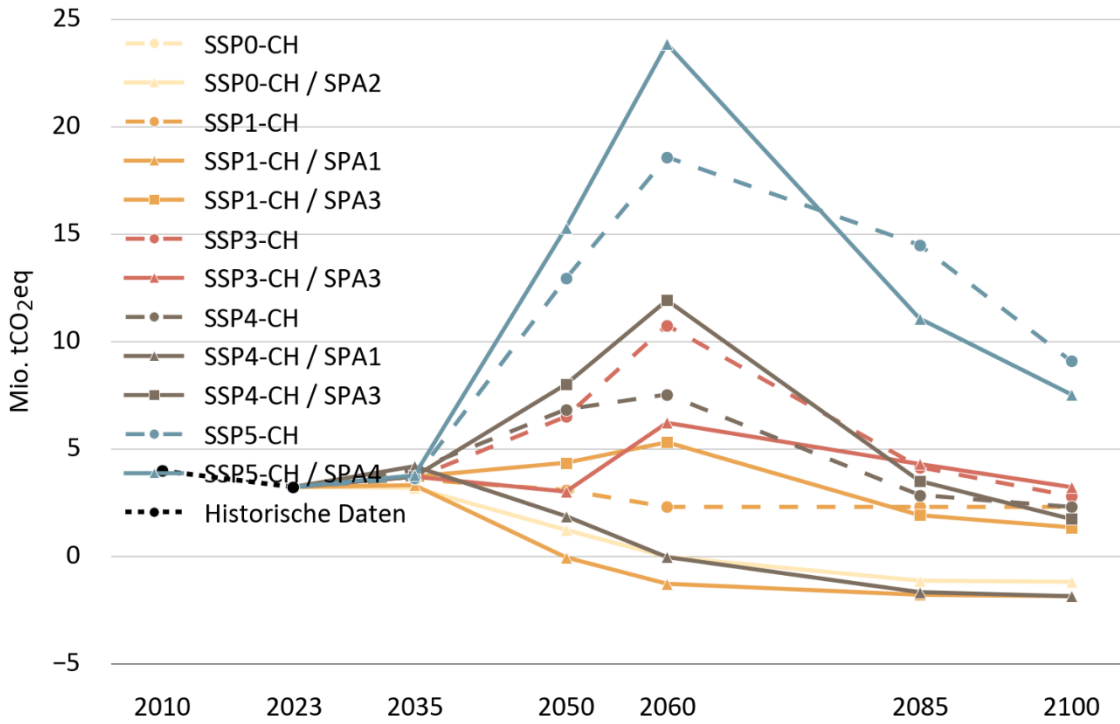
Grafik Prognos.

Die SPA haben einen starken Einfluss auf die Treibhausgasemissionen. In den Kombinationen mit SPA1 und SPA2 wird durch die zusätzlichen Instrumente die Erzeugung von Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien verstärkt. Ausserdem führt der Einsatz von CCS bei KVA zu einer Reduktion fossiler Emissionen (vgl. dazu Kapitel 1111). Da ein Teil des genutzten Mülls biogenen Ursprungs ist, können diese abgeschiedenen biogenen Mengen, sofern sie permanent gespeichert werden, als negative Emissionen angerechnet werden. Dadurch ergeben sich in den Kombinationen SSP0-CH-SPA2, SSP1-CH-SPA1 und SSP4-CH-SPA1 ab etwa 2050/2060 im Sektor Energiewirtschaft insgesamt negative Emissionen. Da bei SPA2 nicht alle KVA mit CCS ausgerüstet werden, sind die Emissionen auf lange Sicht etwas höher als in den Kombinationen mit SPA1.

Für einen deutlichen Anstieg der Emissionen bis 2060 sorgen die Kombinationen SPA3 mit SSP4-CH und SPA4 mit SSP5-CH. In der letztgenannten Variante erhöhen sich die Treibhausgasemissionen im Sektor Energiewirtschaft bis zum Jahr 2085 auf über 20 Mio. tCO₂eq. Der Anstieg ergibt sich durch den zusätzlichen Zubau an Gaskraftwerken. Ausserdem reizen die zusätzlichen Instrumente auch eine höhere Auslastung der fossilen Kraftwerke an (höhere Vollbenutzungsstunden), was ebenfalls zu höheren Emissionen beiträgt.

In Kombination mit SSP1-CH erhöhen sich durch SPA3 ebenfalls die Treibhausgasemissionen, allerdings fällt der Anstieg deutlich geringer aus. In Kombination mit SSP3-CH sorgt SPA3 zwischenzeitlich zu gegenüber dem Baseline-Szenario niedrigeren Treibhausgasemissionen. Zu erklären ist dies mit den grösseren Import-Möglichkeiten (SPA3 senkt den Selbstversorgungsgrad). Zudem verlängert sich hier die Laufzeit der bestehenden Kernkraftwerke, wodurch im Vergleich zum Basisszenario weniger Gaskraftwerke zugebaut werden.

Abbildung 48: Gesamte Treibhausgasemissionen in der Energiewirtschaft je SSP-CH und SPA (in Mio. tCO₂eq)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos.

8. Landwirtschaft

8.1. Modellbeschreibung

Für die Modellierung des Sektors Landwirtschaft unterscheiden wir zwischen den folgenden drei Emissionsquellen:

- Emissionen von Methan (CH₄) aus der Futtermitteldigestion von Nutztieren,
- Emissionen von Methan und Lachgas (N₂O) aus der Hofdüngerlagerung und
- Emissionen von Lachgas aus der Stickstoffdüngung von landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Der Fokus der Modellierung liegt auf Emissionen, die mit der Nutztierhaltung verbunden sind. Diese ist derzeit für über 85% der landwirtschaftlichen THG-Emissionen in CO₂-Äquivalenten verantwortlich (Kapitel 8.5, Der Bundesrat 2021). Folgende CO₂-Emissionen haben wir im Einklang mit der Abgrenzung des Treibhausgasinventars anderen Sektoren zugeteilt:⁸⁷

- Energieverbrauch von Gewächshäusern (Sektor Industrie),
- Energieverbrauch von landwirtschaftlich genutzten Gebäuden (Sektor Gebäude),
- Betrieb landwirtschaftlicher Maschinen (Sektor Verkehr, Non-Road).

Im Unterschied zu anderen Sektoren, werden in der Landwirtschaft keine vorgelagerten Aktivitäten modelliert, sondern die drei modellierten Emissionsquellen werden direkt von Szenarioparametern beeinflusst (Tierbestand und Innovation; siehe Kapitel 8.4). Das Modell ist daher weniger detailliert als die anderen Sektoren, unter anderem, da es keine entsprechenden Vorgaben aus den SSP-CH gibt. Folgende Aspekte sind daher zur Vereinfachung nicht enthalten:

- Wir modellieren keine Veränderung der Aufteilung zwischen den einzelnen Nutztierarten (Rindern gegenüber Schweinen und Geflügel).⁸⁸
- Die Änderungen der Lachgasemissionen aus der Stickstoffdüngung sind ausschliesslich anhand der Entwicklung des Nutztierbestands modelliert. Nutztiere sind heute durch den Einsatz von Hofdünger für rund 70 % dieser Emissionen verantwortlich.
- Wir modellieren einen linearen Zusammenhang zwischen der Entwicklung der Lachgasemissionen aus der Stickstoffdüngung und den Nutztierzahlen. In der Realität sind die Zusammenhänge komplexer, da die Denitrifikation – der zentrale Prozess zur Bildung von N₂O – auch stark abhängig ist von Bodenbeschaffenheit (Verfügbarkeit von Sauerstoff und denitrifizierenden Mikroben) und Witterungsbedingungen (relevant für die Bodenfeuchtigkeit).

⁸⁷ Dabei ist zu beachten, dass die Sektoren Industrie und Gebäude diese Emissionen aufgrund der geringen Relevanz nur zusammen mit anderen Bereichen aggregiert modellieren.

⁸⁸ Für Methanemissionen sind v.a. Rinder verantwortlich, da nur bei diesen im Verdauungsprozess Methan entsteht.

- Die Grösse der landwirtschaftlich genutzten Flächen ist nicht Bestandteil des Modells. Der Grund ist, dass die Emissionen primär aus der Tierhaltung kommen und die damit verbundene Landnutzung darin zudem indirekt bereits abgebildet ist.
- Wir vernachlässigen den Einfluss von ökologischer gegenüber konventioneller Landwirtschaft.

Für eine zukünftige detailliertere Anwendung könnte das Landwirtschafts-Modell um diese Aspekte erweitert werden.

8.2. Bestehende Arbeiten und Daten

Startpunkt für die Modellierung sind die im Schweizer Emissionsinventar ausgewiesenen THG-Emissionen der oben genannten Kategorien im Jahr 2023 (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2025a). Zudem nutzen wir die folgenden Datenquellen, um das Emissionsreduktionspotential durch technische Optimierungen in der Landwirtschaft abzuschätzen:

- Studie «Reduktionspotentiale von Treibhausgasemissionen aus der Schweizer Nutztierhaltung», Agroscope und BLW, 2018
- Studie «Ökologische und ökonomische Bewertung von Klimaschutzmassnahmen zur Umsetzung auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Schweiz», Agroscope, IP-Suisse, 2015
- Klimastrategie Landwirtschaft und Ernährung 2050, BLW, BLV und BAFU, 2021

8.3. Beschreibung Szenarien für Sektor Landwirtschaft

8.3.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

SSP0-CH: Die genügsame Schweiz

Die Landwirtschaft in der Schweiz ist ökologisch, kleinteilig und arbeitsintensiv. Viele Menschen sind in der Landwirtschaft beschäftigt – es ist in der Bevölkerung weit verbreitet, einen Teil der Freizeit für die Nahrungsmittelproduktion aufzuwenden. Die Bevölkerung geht sehr sparsam mit Lebensmitteln um. Grosse Teile der Städte werden direkt von den umliegenden Höfen beliefert. Es wird kein Tierfutter auf Ackerflächen angebaut und der Fleischkonsum ist auf ein Minimum gesunken. Auch andere Produkte sind aus der Ernährung verschwunden.

Die Alpen werden mit extensiven, langlebigen Milchkuhrassen beweidet. Die extensive Landwirtschaft nimmt viel Fläche in Anspruch: Die Voralpen sind weitgehend terrassiert. Die Biodiversität profitiert, da die Produktion extensiv und divers erfolgt. Die Ressourceneffizienz und geschlossene Kreisläufe sind zentral.

SSP1-CH: Die effiziente Schweiz

Die Landwirtschaft hat sich in zwei Bereiche geteilt: Die produzierende Landwirtschaft von Nahrungsmitteln und Energie, sowie die pflegende Landwirtschaft. Erstere betreibt eine hochspezialisierte landwirtschaftliche Produktion, diese findet grösstenteils in effizienten, mehrstöckigen Gewächshäusern («vertical farming») statt. Sie verbraucht viel Energie, spart aber dank effizienter Bewässerung und präzisiertem Einsatz von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln Ressourcen und Fläche. Die Fleischproduktion ist auf ein Minimum gesunken, weil die Landwirtschaft auf beschränkter Fläche stattfinden muss und die Bevölkerung eine Landwirtschaft mit begrenzter Tierhaltung wünscht. Der Import von Fleisch befindet sich auf einem überschaubaren Niveau. Die Milchproduktion wurde weitestgehend ausgelagert. Die Schweiz betreibt einen regen internationalen Handel mit anderen Agrarprodukten, grosse Anteile der Nahrungsmittelversorgung werden importiert, v.a. aus dem nahen Ausland. Der Selbstversorgungsgrad ist viel niedriger als noch in den 2020er-Jahren. Die freiwerdenden Flächen werden zur Energieproduktion mittels Energiepflanzen und Solarenergie verwendet und von der pflegenden Landwirtschaft für Naturschutzzwecke unterhalten.

SSP3-CH: Die konfliktreiche Schweiz

Die landwirtschaftliche Produktion ist extensiv – d.h. mit wenigen industriellen Zusatzmitteln – und wenig technologisiert. Die Anbauflächen werden mit viel Handarbeit bearbeitet und sind klein-strukturiert. Grossbetriebe sind selten. Es werden vor allem kalorie-intensive Nutzpflanzen wie Getreide sowie Ölsaaten angebaut, um den Grundbedarf decken zu können. Futter für Nutztiere wird kaum angebaut und der Fleischkonsum ist auf ein Minimum gesunken. Wer tierische Produkte möchte und sie sich leisten kann, hält Nutztiere privat. Insgesamt reicht die landwirtschaftliche Produktion nicht aus, um die Bevölkerung zu versorgen. Deshalb ist Selbstversorgung weit verbreitet, sowohl in städtischen als auch in ländlichen Gebieten.

SSP4-CH: Die ungleiche Schweiz

Die Produktion ist weitgehend automatisiert, nötige Arbeitskräfte werden aus der Unterschicht rekrutiert. Es wird grossflächig und kostengünstig produziert. Gentechnik wird eingesetzt. Das Mittelland wird von ein paar wenigen Grossbetrieben bewirtschaftet, die (Getreide-)Erträge werden exportiert. Während in der Mitte des Jahrhunderts in den Voralpen eine intensive Milchwirtschaft dominierte, haben sich Milchbetriebe seit 2080 immer mehr aus der Schweiz zurückgezogen, weil die Produktion im Ausland günstiger für sie wurde. Milchprodukte und Fleischprodukte werden importiert, deren Nachfrage ist hingegen zurückgegangen, weil sich die Unterschicht deren Konsum immer weniger leisten kann.

SSP5-CH: Die ressourcenintensive Schweiz

Die industriell produzierende Landwirtschaft mag den hohen Fleischkonsum einer wachsenden Bevölkerung nicht decken, damit sinkt der Selbstversorgungsgrad bis Mitte des Jahrhunderts. Gegen dessen Ende hin bemüht sich die Schweiz, den Selbstversorgungsgrad wieder zu erhöhen, als Reaktion auf die zunehmende wirtschaftliche Isolation. Die Produktion wird weiter intensiviert: Kalorie-intensive Produktion (z.B. Getreideanbau) findet in mehrstöckigen, sehr energieintensiven, vertikalen Landwirtschaftsbetrieben statt. Auch Kühe, Schweine und Geflügel werden im Mittelland oft in grossen, teils mehrstöckigen Ställen gehalten. Auf intensiv genutzten Flächen in den Alpen und Voralpen wird ebenfalls Milch und Fleisch produziert. Was an Futtermitteln importiert werden kann, wird zugefüttert. Mit sinkenden Importmöglichkeiten von Dünger und Futter gehen die Milchproduktion und die Fleischproduktion zurück.

8.3.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

SPA0: Status Quo

Die Schweizer Agrarpolitik im Status Quo ist durch eine starke finanzielle Unterstützung der Landwirte im Rahmen der Direktzahlungen und anderer Förderprogramme gekennzeichnet. Ansonsten sind die Eingriffe in das Ernährungssystem zur Emissionsreduktion gering. Herausforderungen sind die Verringerung der Emissionen aus der Viehzucht/Tierhaltung (Milch, Fleisch), die Bekämpfung von Ineffizienzen (Lebensmittelverschwendung) und das Abwägen von Kompromissen bei der Flächennutzung (Verstädterung, Schutz der biologischen Vielfalt usw.) und der Verwendung landwirtschaftlicher Erzeugnisse sowie das Management importierter Emissionen (Tierfutter, Gemüse, Fleisch usw.). Die Agrarpolitik liegt weitgehend in der Verantwortung des Bundes (Direktzahlungsregelung) und zu einem geringen Teil auf kantonaler/kommunaler Ebene (Raumplanung, lokale Subventionen, verbrauchsabhängige Massnahmen).

SPA1: Grüner Staat

Die Schweizer Landwirtschaftspolitik ist gekennzeichnet durch eine Veränderung des Direktzahlungssystems hin zu einem Fokus auf Emissionsreduktion (z.B. durch eine CO₂-Abgabe auf Lebensmittel). Es gibt eine stärkere Regulierung von Einzelhändlern (z.B. obligatorischer Anteil alternativer Proteine) und Verbrauchern (z.B. verbindliche Vorschriften für öffentliche Kantinen in Bezug auf tierische Produkte). Die Agrarpolitik fällt weitgehend in den Zuständigkeitsbereich der Bundesverwaltung (Direktzahlungsregelung, Handelsabkommen, usw.)

SPA2: Ökologische Republik

Die Schweizer Agrarpolitik ist gekennzeichnet durch eine starke Umstellung des Direktzahlungssystems und marktwirtschaftliche Instrumente wie die CO₂-Abgabe auf Lebensmitteln. Im Vordergrund stehen freiwillige Zielvereinbarungen mit Detailhändlern und Landwirten sowie Aufklärungskampagnen und sanfte Instrumente zur Unterstützung von Verhaltensänderungen (weniger Konsum von tierischen Produkten). Selbstversorgungs- und Kleinlandwirtschaftsprojekte werden finanziell unterstützt. Die Agrarpolitik fällt weitgehend in die Zuständigkeit der Bundesverwaltung (Direktzahlungsregelung, Handelsabkommen usw.).

SPA3: Ordoliberaler Staat

Die schweizerische Agrarpolitik zeichnet sich durch eine starke Reduzierung der staatlichen Eingriffe in den Agrarsektor aus, vor allem durch die Reduzierung der Direktzahlungen und die Aufhebung der ökologischen Konditionalität des Systems. Die Interventionen beschränken sich auf ein Minimum (Lebensmittelsicherheit, bestehende Regulierung und Status Quo). Neue Instrumente beschränken sich auf die Information der Verbraucher (öffentliche Etiketten), und die Landwirtschaft wird durch Lockerung der Einfuhrbestimmungen stärker für den internationalen Wettbewerb geöffnet. Die Agrarpolitik bleibt weitgehend in der Zuständigkeit der Bundesverwaltung.

SPA4: Kompensierender Staat

Die Schweizer Agrarpolitik ist gekennzeichnet durch die Aufhebung der ökologischen Konditionalität für Direktzahlungen und andere regulatorische Eingriffe zur Emissionsreduktion. Die Direktzahlungen werden beibehalten oder erhöht (z.B. zum Ausgleich steigender Energiekosten und Kosten für die Klimaanpassung, z.B. Erntereduktion), und die landwirtschaftliche Produktion ist am Ende des Jahrhunderts stark vom internationalen Wettbewerb geschützt. Die Agrarpolitik bleibt weitgehend in der Zuständigkeit der Bundesverwaltung (Handelsabkommen usw.).

8.4. Modellierung

8.4.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Auf Basis des Emissionsinventars berechnen wir die Entwicklung der Emissionen je SSP-CH mittels einer sektorspezifischen SSP-CH-Wirkungsmatrix (siehe Kapitel 3.2). Diese enthält zwei Szenarioparameter, die jeweils auf alle Modellelemente wirken (siehe Tabelle 26).

Tabelle 26: Qualitative Übersicht SSP-Wirkungspfad für Sektor Landwirtschaft

Modellparameter	Futtermitteldigestion Nutztiere (CH ₄)	Hofdüngerlagerung (CH ₄)	Hofdüngerlagerung (N ₂ O)	Stickstoffdüngung (N ₂ O)
Tierbestand*			+	
Innovationstätigkeit			-	

Ein «+»/«-» bedeutet eine positive/negative Elastizität zwischen Szenario- und Modellparameter.

* Hergeleitet aus den Szenarioparameter «Wohnbevölkerung» und den Ergebnissen «Tierbestand pro Kopf» der Szenario-Workshops.

Tabelle INFRAS.

Tierbestand

Dieser Szenarioparameter beschreibt die Entwicklung des Gesamtbestands an Nutztieren in der Schweiz. Er bildet die Nachfrage nach tierischen Produkten aus inländischer Produktion ab und wird von mehreren Faktoren beeinflusst:

- Wohnbevölkerung,
- Ernährungsgewohnheiten der Bevölkerung, die mehr oder weniger tierische Produkte beinhalten kann, sowie
- Selbstversorgungsgrad – also dem Mass dafür, ob die tierischen Produkte in der Schweiz oder im Ausland produziert werden.

Daher haben wir den Szenarioparameter Tierbestand aus dem Szenarioparameter Wohnbevölkerung und Tierbestand pro Kopf hergeleitet (nicht gezeigt). Der Tierbestand pro Kopf bildet die Ernährungsgewohnheiten und der Selbstversorgungsgrad ab.

Der Tierbestand wird mit Elastizität von 1 auf die Modellparameter übertragen. Das bedeutet beispielsweise, dass ein Anstieg des Tierbestands um 10 % zu einem Anstieg der Emissionen aus Futtermitteldigestion, Hofdüngerlagerung und Stickstoffdüngung um 10% führt.

Innovationstätigkeit

Je höher die Innovationstätigkeit, desto mehr wird die Landwirtschaft technisch optimiert. In der Folge sinken die Emissionen pro gegebenem Tierbestand. Die Innovationstätigkeit hat daher in der Wirkungsmatrix eine negative Elastizität. Um das maximale Potenzial für Emissionsreduktionen durch Innovationen (wie z.B. Futtermittelzusätze oder Gülle-Ansäuerung) abzuschätzen, haben wir mehrere Studien ausgewertet (siehe Kapitel 8.2). Tabelle 27 fasst deren Ergebnisse zusammen. Aus den Werten der Studien gehen wir davon aus, dass die technischen Massnahmen kumuliert ein Emissionsreduktionspotenzial von maximal 25% haben. Für die

Modellierung bis ins Jahr 2100 teilen wir dieses Potenzial auf in einen Anteil von 10 Prozentpunkten, der ohne den Einfluss zusätzlicher Instrumente bei maximaler Innovationstätigkeit (Trendwert +3) in den SSP-CH erreicht werden kann, und einen Anteil von weiteren 15 Prozentpunkten, der zusätzliche politische Klimaschutzinstrumente erfordert und nur mittels der SPA umgesetzt werden kann. Diese Aufteilung basiert auf der Annahme, dass die Entwicklungen der Schweizer Landwirtschaft traditionell von politischen Instrumenten abhängen. Allerdings ist es im Kontext der Landwirtschaft speziell schwierig, zwischen SSP-CH und SPA zu unterscheiden.

Tabelle 27: Auswahl Massnahmen Landwirtschaft und deren Potenzial für Emissionsreduktionen.

Quelle und Auswahl möglicher Massnahmen	Potenzial für Emissionsreduktionen
«Reduktionspotentiale von Treibhausgasemissionen aus der Schweizer Nutztierhaltung», Agroscope und BLW, 2018	
▪ N-optimierte Fütterung für Monogastrier oder Rindvieh	0.5% bis 1.2% (31 bis 70 ktCO ₂ eq)*
▪ Futterzusätze für Rindvieh (Tannine, Leinsamen)	5.2% (305 ktCO ₂ eq)
▪ Erhöhung der Laktationszahl	3.4% (200 ktCO ₂ eq)
▪ Züchtung von Rassen mit hoher Futterkonvertierungseffizienz und tiefen CH ₄ -Emissionen	6.2% (365 ktCO ₂ eq)
▪ Abdeckung des Düngelagers	0.7% (44 ktCO ₂ eq)
▪ Gülle-Ansäuerung	8.1% (480 ktCO ₂ eq)
▪ Biogasanlagen (Anaerobe Vergärung von verfügbarer/n Gülle und Mist)	4.1% (242 ktCO ₂ eq)
▪ Erhöhung der N-Effizienz in der Hofdüngerbewirtschaftung	4.4% (261 ktCO ₂ eq)
«Ökologische und ökonomische Bewertung von Klimaschutzmassnahmen zur Umsetzung auf landwirtschaftlichen Betrieben in der Schweiz», Agroscope, IP-Suisse, 2015	
▪ aus dem Bereich «Pflanzenproduktion»	11% bis 16% kgCO ₂ eq pro MJ verdauliche Energie
▪ Ausbringung von Gärresten	
▪ Reduktion des mineralischen N-Düngers	
▪ Umbruchlose Neuansaat des Dauergrünlandes	
▪ aus dem Bereich «Tierhaltung»	1% bis 5% kgCO ₂ eq pro MJ verdauliche Energie
▪ Erhöhung der Anzahl Laktationen	
▪ Milchproduktion mit zertifiziertem oder ohne Soja	
▪ Phasenfütterung in der Schweinemast	
▪ Sonstige	2% bis 17%
▪ Etablierung eines Agroforstsystems	kgCO ₂ eq pro MJ verdauliche Energie
▪ Ausbringung von Pflanzenkohle	

Quelle und Auswahl möglicher Massnahmen	Kumuliertes Emissionsreduktionspotential
Klimastrategie Landwirtschaft und Ernährung 2050, BLW, BLV und BAFU, 2021	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Effizienzverbesserungen beim Herdenmanagement und der Fütterung ▪ Verlustarmes Düngermanagement ▪ Erhaltung der Bodenkohlenstoffvorräte in Moorböden ▪ Ersatz fossiler Brenn- und Treibstoffe durch erneuerbare Energieträger 	20% zwischen 2021 und 2050 (-1.4 Mio. tCO ₂ eq)

Seit Veröffentlichung der Studien wurde das hier aufgeführte Reduktionspotential teilweise schon ausgeschöpft (z.B. ist die Abdeckung des Düngelagers mittlerweile Plicht).

*Die absolute Reduktion bezieht sich auf die Gesamtemissionen der im Modell berücksichtigten Landwirtschaftskategorien aus dem Jahr 2016. Es sind dies 5910 kt CO₂eq.

Tabelle INFRAS.

8.4.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Die Modellierung der SPA erfolgt analog zu den anderen Sektoren. Tabelle 28 gibt einen Überblick der SPA-Instrumente und ihrer Wirkung. Gezeigt sind die wichtigsten politischen Instrumente (erste Spalte) und deren Einführung (zweite Spalte). In den meisten Fällen modellieren wir die Wirkung so, dass das Instrument im nächsten Modellschritt nach der Einführung seine volle Wirkung entfaltet und durch die Interpolation zwischen den Modellschritten ein «phase-in» stattfindet. Ausnahmen sind z.B. Betriebsverbote, die sofort wirken. Spalte drei zeigt die Kategorie des Instruments und Spalte vier den Modellparameter, der von dem Instrument verändert wird. Da es zu komplex wäre, die Wirkung aller Instrumente einzeln zu modellieren, zeigt die letzte Spalte die von uns abgeschätzte Gesamtwirkung des Instrumentenbündels auf die drei modellierten Emissionskategorien gegenüber den SSP-CH.

Tabelle 28: SPA Sektor Landwirtschaft: Instrumente und Wirkung

Instrumente	Einführung	Instrumententyp	Gesamtwirkung SPA (% ggü. SSP)
SPA0 – Status Quo**			
1. Zielvereinbarungen (z.B. über Food Waste)	alle bereits eingeführt	1. Autorität	-
2. Reduktionsziele für Stickstoff- und Phosphorüberschüsse		2. Autorität	
3. Direktzahlungen an Landwirtschaftliche Betriebe (basierend auf ökologischem Leistungsnachweis)		3. Finanzen	
4. Absatzförderung für Schweizer Fleisch-/Molkereiprodukte		4. Finanzen	
5. Klimastrategie Landwirtschaft		5. Strategie	
SPA1 – Grüner Staat			
1. CO2-Steuer auf Lebensmittel (heimisch und importiert)	ab sofort, volle Wirkung 2035	1. Autorität	Reduktion der Emissionen aus allen Quellen um 30%
2. Obergrenze Import Futtermittel		2. Autorität	
3. Begrenzung Tierbesatzdichte gemäss ökologischen Grenzen Lebensraum		3. Autorität	
4. Konsequente Umsetzung der Düngeverordnung		4. Autorität	
5. Förderung für Futtermittelzusätze für Nutztiere		5. Finanzen	
6. Abschaffung der Förderung für Schweizer Fleisch-/Molkereiprodukte		6. Finanzen	
7. Verpflichtende Vorgaben für öffentliche Kantinen (z.B. >50% vegetarische Angebote)		7. Strategie	

Policy	Einführung	Instrumententyp	Gesamtwirkung SPA in %
SPA2 – Ökologische Republik			
1. CO ₂ -Steuer auf Lebensmittel (heimisch und importiert)	ab sofort, volle Wirkung 2035	1. Autorität	Reduktion der Emissionen aus allen Quellen um 10%
2. Abschaffung der Förderung für Schweizer Fleisch-/Molkereiprodukte		2. Finanzen	
3. Freiwillige Klimazielvereinbarungen mit landwirtschaftlichen Betrieben (z.B. Reduktionspfade)		3. Strategie	
4. Freiwillige Zielvereinbarungen mit dem Detailhandel		4. Strategie	
5. Klima-Label auf Lebensmitteln		5. Information	
6. Freiwillige Leitlinien für öffentliche Kantinen		6. Strategie	
SPA3 – Ordoliberaler Staat			
1. Abschwächung der Düngeverordnung	ab sofort, volle Wirkung 2035	1. Autorität	Zunahme der Emissionen aus allen Quellen um 10%
2. Reduktion der Direktzahlungen für landwirtschaftliche Betriebe		2. Finanzen	
3. Abschaffung der Förderung für Schweizer Fleisch-/Molkereiprodukte		3. Finanzen	
4. Klima-Label auf Lebensmitteln		4. Information	
5. Abschaffung der Vorgaben aus der Klimastrategie Landwirtschaft		5. Strategie	
SPA4 – Kompensierender Staat			
1. Abschwächung der Düngerverordnung und der Reduktionsziele für Stickstoff- und Phosphorüberschüsse	ab sofort, volle Wirkung 2035	1. Autorität	Zunahme der Emissionen aus allen Quellen um 20%
2. Erhöhung der Direktzahlungen an landwirtschaftliche Betriebe		2. Finanzen	
3. Abschwächung des ökologischen Leistungsnachweis als Bedingung für Direktzahlungen		3. Autorität	
4. Abschaffung der Vorgaben aus der Klimastrategie Landwirtschaft		4. Strategie	

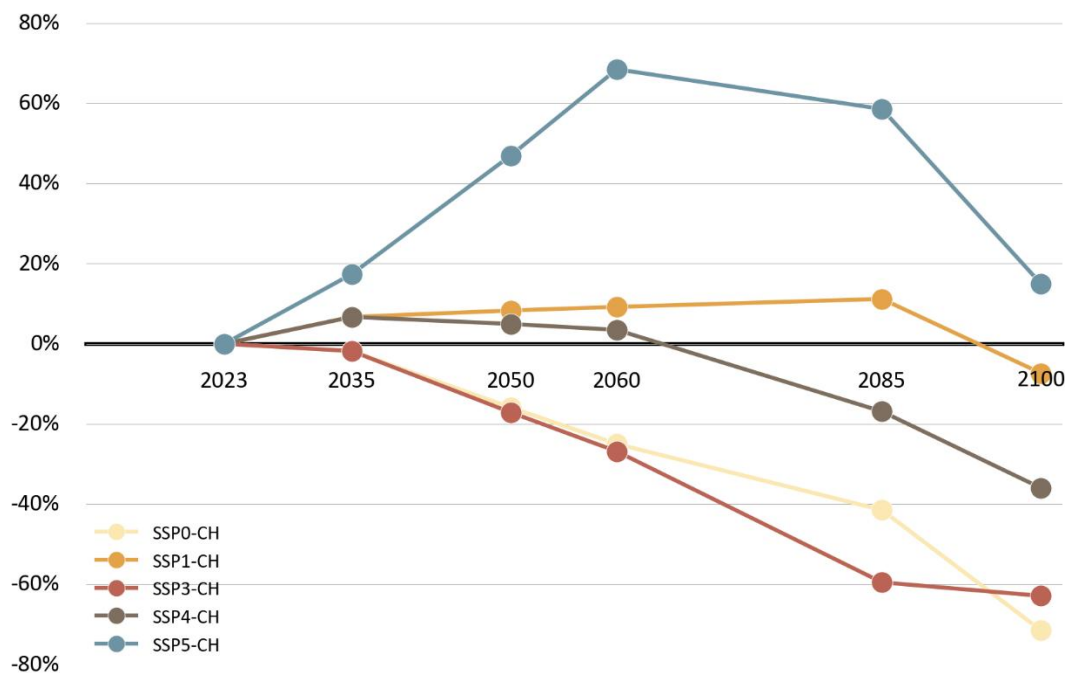
8.5. Ergebnisse und Diskussion

8.5.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Die Entwicklung der Nutztierzahlen in der Schweiz hat einen starken Einfluss auf die Ergebnisse. Abbildung 49 zeigt, dass diese Zahl in manchen Szenarien stark abnimmt — in SSP0-CH aufgrund von gestiegenem Umweltbewusstsein (freiwilliger Verzicht auf tierische Produkte) und in SSP3-CH infolge abnehmender Kaufkraft sowie jeweils aufgrund des Bevölkerungsrückgangs. Auch für die anderen SSP-CH lässt sich die Entwicklung des Tierbestands auf diese Einflussfaktoren zurückführen.

Bezüglich der Innovationstätigkeit gehen wir davon aus, dass diese die Emissionen um maximal 25% verringern (siehe Kapitel 8.4).

Abbildung 49: Entwicklung Tierbestand SSP-CH



Der Tierbestand beschreibt die absolute Menge an Tieren in der Schweiz (d.h. nicht Tiere pro Kopf). Nicht berücksichtigt sind Veränderungen der Tierarten.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Abbildung 50 zeigt das Ergebnis der Modellierung der SSP-CH. Alle Emissionen stammen von Nicht-CO₂-Treibhausgasen und wurden daher mittels GWP-100-Werten in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Der grösste Anteil der Emissionen in der Landwirtschaft stammt aus den Methanemissionen der Futterverdauung der Nutztiere.

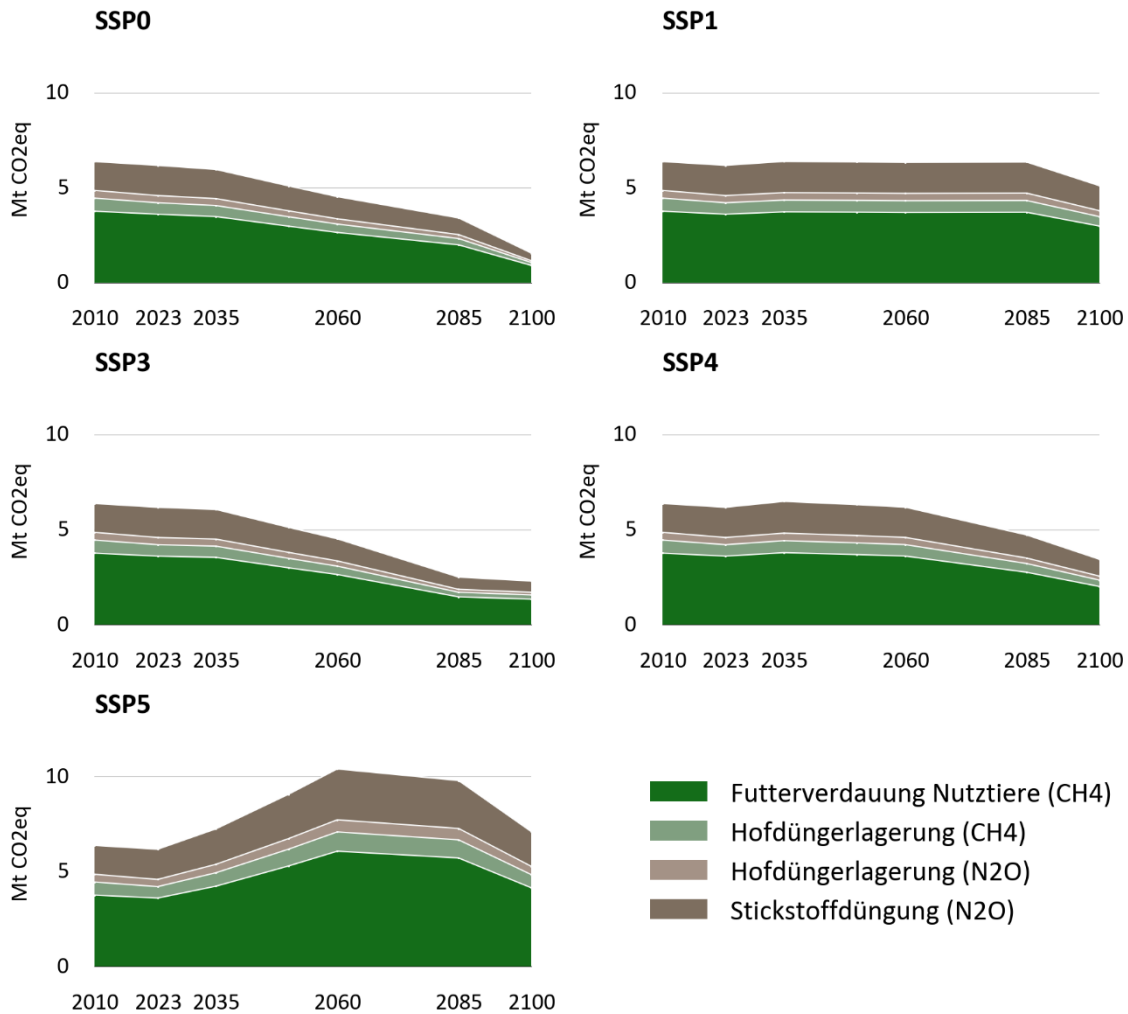
In SSP0-CH und SSP3-CH nimmt der Tierbestand und somit alle Emissionsquellen stark ab. In SSP1-CH bleiben die Emissionen konstant. Zwar setzt dieses Szenario auf Technologisierung und Effizienzsteigerung, jedoch sind solche Verbesserungen im landwirtschaftlichen Bereich im Vergleich zu anderen Sektoren – wie etwa der Elektrifizierung im Verkehrswesen – nur eingeschränkt möglich. Gleichzeitig wächst die Bevölkerung, während der Fleischkonsum pro Kopf nicht wesentlich sinkt, was den Tierbestand konstant bleiben lässt.

Im SSP4-CH kann sich ein grosser Teil der Bevölkerung ab der zweiten Jahrhunderthälfte weniger Fleisch leisten, wodurch der Konsum sinkt. Zudem wird verstärkt auf Lebensmittelimporte zurückgegriffen, was zur Verlagerung der Emissionen ins Ausland führt.⁸⁹ SSP5-CH stellt das einzige Szenario dar, in dem die Emissionen temporär ansteigen, bis sie dann zu Ende des Jahrhunderts aufgrund des Rückgangs an Wohlstand und der damit einhergehenden Reduktion des Fleischkonsums wieder sinken.

Insgesamt ist der maximale Rückgang der landwirtschaftlichen Emissionen bis 2100 deutlich geringer als in anderen Sektoren. Das bedeutet, dass in allen SSP-CH gegen Ende des Jahrhunderts signifikante Emissionen – insbesondere durch Methan – verbleiben. Im Vergleich zur heutigen Situation wird die Landwirtschaft in den meisten SSP-CH einen grösseren Anteil an den Gesamtemissionen der Schweiz in CO₂-Äquivalenten ausmachen.

⁸⁹ Diese Auswirkung wird – in hoher Aggregation – im Sektor Importe und Exporte berücksichtigt.

Abbildung 50: Emissionen der Landwirtschaft pro SSP-CH



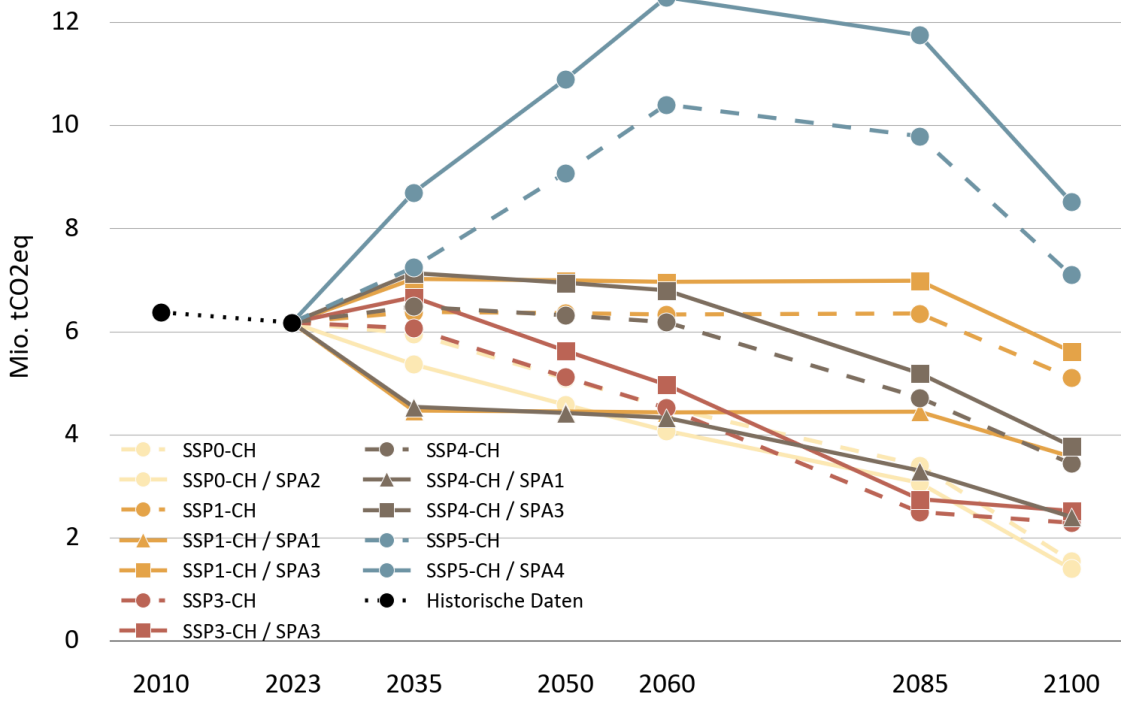
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

8.5.2. Klimapolitische Instrumente (SPA) in Kombination mit SSP-CH

Abbildung 51 zeigt eine Übersicht, der Emissionen der SSP-CH inklusive SPA, basierend auf den getroffenen Annahmen. Der Einfluss der SPA entspricht den in Tabelle 28 aufgeführten Wirkungen, welche jeweils pauschal alle Emissionsquellen um eine bestimmte Prozentzahl reduzieren oder erhöhen. SPA1 und SPA 2 senken die Emissionen. SPA3 und SPA4 erhöhen diese.

Abbildung 51: Gesamte Emissionen der SPPs und der SSP/SPA-Kombinationen im Landwirtschaftssektor in Mio. tCO₂eq.



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

9. Landnutzung

9.1. Beschreibung Modell

Für unsere Analyse der Landnutzung in den SSP-CH greifen wir auf ein bestehendes Modell der ETH Zürich zurück: das «Evoland-Modell».⁹⁰ Dieses Modell bietet uns wertvolle Informationen hinsichtlich der Flächenverteilung nach Landnutzungsklassen in Abhängigkeit der verschiedenen SSP-CH. Das Modell liefert uns jedoch keine Angaben zu Treibhausgasen der Landnutzung oder der Landnutzungsveränderungen.

Beim Modell Evoland handelt es sich um ein «Constrained Cellular Automata» (CCA) Modell, wobei die Landnutzung in der Schweiz als Zellen innerhalb eines Rasters dargestellt werden. Das Modell nutzt die Grundsätze eines zellulären Automaten⁹¹ und verknüpft diese mit räumlichen Beschränkungen, um den Entwicklungsprozess der Landnutzungsänderungen abzubilden. Die Beschränkungen (Constraint Map) werden beispielweise durch Umweltfaktoren, Infrastruktur oder regionale Gegebenheiten bzw. Regulierungen abgebildet. Unter Berücksichtigung dieser Beschränkungen werden im Modell die lokalen Interaktionen zwischen den Zellen und die sich daraus ergebende Art der Zustandsänderungen berechnet.

Für einen Modelllauf werden in einem ersten vorbereitenden Schritt die historische Landnutzungsänderungen analysiert. Die Übergangswahrscheinlichkeiten von einer Landnutzungs-klasse in eine andere werden innerhalb des Modells iterativ für verschiedene Zeitschritte berechnet. Für die zukünftigen Zeitschritte stellen wir dem Modell die Raten für jeden Übergang zur Verfügung, in Abhängigkeit des betrachteten Zeitschritts. Für diese Vorgaben werden zunächst die Fläche, bzw. die Flächenanteile jeder Landnutzungs-klasse im letzten Jahr der Simulation festgelegt und dann rückwärts berechnet. Abbildung 52 stellt den Ablauf schematisch dar. Die Festlegung der Zielflächen bzw. der Zielbilder erfolgt unter Einbezug von Fachexperten (siehe Kapitel 9.3).

Als Output liefert das Modell hochauflösende Raster-Karten, wobei die Auflösung des Rasters 100m*100m beträgt. Die Änderung der Landnutzung wird im Zeitverlauf dargestellt, es werden Ergebnisse in 5 Jahresschritten für den Zeitraum 2020 bis 2100 erzeugt.

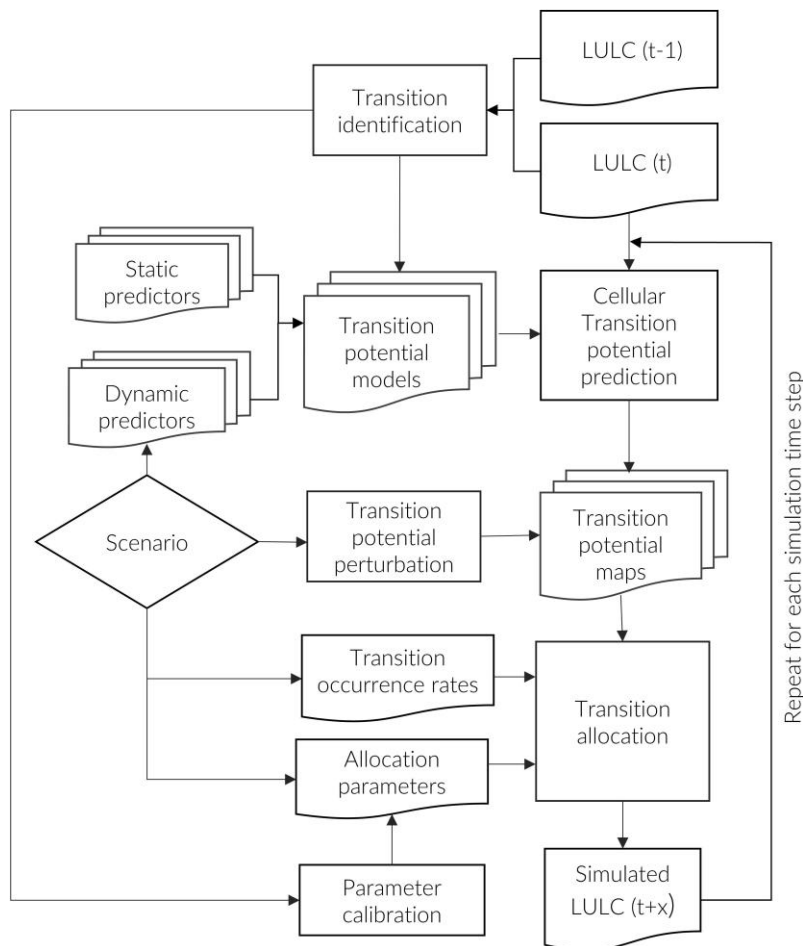
Für die Kalibrierung der Modellparameter wird im Modell Evoland eine Kombination aus zwei Algorithmen genutzt: Patcher und Expander. Mit diesen Parametern steuern wir, inwiefern die Flächenzunahme einer Landnutzungs-klasse über die Generierung neuer «Cluster» mit

⁹⁰ Der Entwickler des Modells Evoland, Benjamin Black, führte die Modellberechnungen im Rahmen des SSP-CH-Projekts zu den SSP-CH durch.

⁹¹ Ein zellulärer Automat (ZA) ist ein rechnerisches Modell, das aus einer regelmässigen Anordnung von Zellen besteht, die in einem Gitter angeordnet sind. Jede Zelle kann in einem bestimmten Zustand sein, und der Zustand einer Zelle zu einem bestimmten Zeitpunkt hängt von ihrem eigenen Zustand und den Zuständen der benachbarten Zellen in der vorherigen Zeit ab. Der nächste Zustand jeder Zelle wird durch eine Regel bestimmt, welche wiederum auf dem aktuellen Zustand der Zelle und der Zustände ihrer Nachbarn beruht.

dieser Landnutzungsklasse entstehen soll, oder ob bestehende Flächen mit dieser Landnutzungsklasse weiter ausgedehnt werden. Beispielsweise ob bei einer Zunahme der Siedlungsfläche bestehende Siedlungen wachsen oder neue Siedlungen entstehen. In der Modellierung der SSP-CH werden Interventionen in folgenden Bereichen vorgenommen: Raumplanung (spatial zoning), Urbanisierung, «Berg-Entwicklung», Schutzgebiete und Ackerland. Da die Interventionen teilweise die gleichen Landnutzungsklassen adressieren, dabei jedoch eine gegensätzliche Wirkung entfalten können, wird eine Priorisierung der Interventionen festgelegt. Diese gibt an, welche Intervention zuerst wirken soll und den Gesamteffekt dominiert.

Abbildung 52: Schematische Darstellung des Modells Evoland



Quelle: Black et al. 2024.

Die Standardnomenklatur NOAS04 der schweizerischen Arealstatistik umfasst 72 Grundkategorien, welche sich aus Kombinationen von Kategorien für die Bedeckung (Land Cover) und der

„reinen“ Nutzung (Land Use) ergeben.⁹² Um die Analyse zu vereinfachen, aggregieren wir die vorhandenen Landnutzungsflächen, die aus den 72 Klassen des NOAS04-Systems stammen, und fassen sie in 10 Klassen zusammen. Dies entspricht dem Vorgehen im Projekt ValPar, in dem ebenfalls das Modell Evoland eingesetzt wurde.⁹³ Konkret haben wir für die Modellierung der Landnutzung in den SSP-CH folgende 10 Landnutzungsklassen unterschieden (in Klammern jeweils die Flächenanteile im Jahr 2020):

- Alpwirtschaftsflächen («alpine pasture»: Alp- und Juraweiden, Schafalpen; 11.5 %)
- Dauerkulturen («permanent crops»: Obstanlagen, Feldobst, Rebbaufflächen, Gartenbauflächen; 1.2 %)
- Ackerland («agriculture»: Ackerland, intensiv und extensiv bewirtschaftet; 9.4 %)
- Siedlungsflächen («uban/amenities»: Industrie- und Gewerbebauten, Wohngebäude, öffentliche Gebäude, landwirtschaftliche Gebäude, Parkplätze, Baustellen, öffentlichen Parks, Sportanlagen, Golfplätze, Campingplätze, Friedhöfe; 5.5 %)
- Geschlossener Wald («closed forest»: dazu zählen Waldformationen, bei denen Bäume und das Unterholz einen hohen Anteil (> 40 %) des Bodens bedecken und keine durchgehende dichte Grasdecke vorhanden ist; 26.9 %)
- Offener Wald («open forest»: dazu zählen Waldformationen, bei denen Bäume und das Unterholz einen geringen Anteil (< 40 %) des Bodens bedecken und eine durchgehende dichte Grasdecke vorhanden sein kann. Hierzu zählen Waldflächen auf landwirtschaftlich genutzten und unproduktiven Flächen, Feldgehölze, Hecken, Baumgruppen auf landwirtschaftlich genutzten und unproduktiven Flächen; 4.9 %)
- Naturwiesen und Heimweiden («grassland or meadows»: Naturwiesen, verbuschte Wiesen, Heimweiden, Alpwiesen; 13.1 %)
- Gebüschflächen («overgrown/shrubland»: Gebüsch, Strauchvegetation unproduktive Gras- und Krautvegetation; 6.7 %)
- Gletscher («glacier»: Gletscher und Firnflächen; 2.1 %)
- Sonstige bzw. statische Flächen (Autobahnen, Strassen und Wege, versiegelte Bahnflächen, Flughäfen, dazugehörige Grünanlagen, Energieversorgungsanlagen, Abwasseraufbereitungsanlagen, sonstige Versorgungs- oder Abfallbehandlungsanlagen, Deponien, Lawinen- und Steinschlagverbauungen, Steinbrüche, Bergwerke, Fels, Geröll, Sand, Feuchtgebiete, Hochwasserschutzverbauungen sowie alpine Sportinfrastruktur; 14.5 %)

⁹² Quelle: BFS <https://www.bfs.admin.ch/bfs/de/home/statistiken/raum-umwelt/nomenklaturen/arealstatistik/noas2004.html> zuletzt abgerufen am 10.9.2025

⁹³ ValPar - Werte der Ökologischen Infrastruktur in Schweizer Pärken: <https://valpar.ch/land-use-change-scenarios/index-de.html>

Nicht explizit modelliert wurden die Gewässer (Seen, Flüsse). Deren Anteil lag im Jahr 2020 bei rund 4.3 %. In der Modellierung gehen wir davon aus, dass sich diese Flächen im Zeitverlauf nicht wesentlich verändern und in allen SSP-CH identisch sind. In den Ergebnissen werden die Flächen der Gewässer zusammen mit den sonstigen Flächen ausgewiesen (statische Flächen). Eine detaillierte Beschreibung des Modells Evoland findet sich in Github.⁹⁴

9.2. Bestehende Arbeiten und Daten

Nachfolgend sind relevante Datengrundlagen aufgelistet, welche wir als Inputs für die Modellierung verwendet haben.

- Schweizer Areal-Statistik
- Die Geodaten der Biodiversitätsförderflächen auf landwirtschaftlichen Flächen in der Schweiz, die von Geodienste.ch veröffentlicht werden: https://geodienste.ch/services/lwb_biodiversitaetsfoerderflaechen
- Geodaten zu kantonalen Schutzgebieten und Naturgebieten (BAFU)
- Das ValPar-Projekt (Werte der Ökologischen Infrastruktur in Schweizer Parks) bildet ein wichtiges Vorgängerprojekt. Auf die dort gewonnenen Erfahrungen bei der Methodik konnten wir zurückgreifen (u.a. das Vorgehen zur Bestimmung von Zielbildern) und gesammelte Datengrundlagen wurden für die SSP-CH-Szenarien nutzbar gemacht (<https://valpar.ch/land-use-change-scenarios/>).
- Geodaten zu Schutzgebieten, darunter zu
 - Biotop von Nationaler Bedeutung
 - Schweizerischer Nationalpark
 - Kantonale Schutzgebiete (Daten des BAFU)
 - Wasser- und Zugvogelreservate von internationaler und nationaler Bedeutung (JSG Art. 11)
 - Eidgenössische und kantonale Jagdbanngebiete sowie Waldreservate WaG Art. 20
 - Biodiversitätsförderflächen der Qualitätsstufe II
 - Unesco-Biosphärenreservat und Unesco-Naturschutzgebiete
 - Pro Natura-Schutzgebiete
- Datengrundlage zum Rückgang der Gletscherflächen (Zekollari, Huss, and Farinotti 2019)

9.3. Modellierung SSP

Die Entwicklung der Landnutzung nach den 10 unterschiedenen Landnutzungsklassen wird für jedes der fünf SSP-CH berechnet. Es werden jedoch keine zusätzlichen Politikinstrumente

⁹⁴ <https://github.com/blenback/LULCC-CH>

betrachtet und folglich werden im Gegensatz zur Modellierung der Treibhausgasemissionen in den verschiedenen Sektoren keine Kombinationen von SSP-CH mit SPA betrachtet.

Den Effekt der unterschiedenen sozioökonomischen Entwicklungen auf die Landnutzung bestimmen wir primär durch die Generierung SSP-CH spezifischer Zielbilder. Die Zielbilder geben die prozentualen Anteile der 10 genannten Landnutzungsklassen und die räumlichen Interventionen vor. Konkret wird für jedes SSP-CH ein Zielbild für das Jahr 2100 sowie ein Zwischenzielbild für das Jahr 2060 festgelegt. Ausgehend vom Zielbild berechnen wir anschliessend mit dem Modell Evoland die Übergangswahrscheinlichkeiten der einzelnen Landnutzungsklassen und die regionale Verteilung (vgl. Kapitel 9.1). Die Zielbilder der Jahre 2060 und 2100 je SSP-CH leiten wir in mehreren Schritten her:

- Identifikation der Szenarioparameter, welche die Landnutzung direkt beeinflussen, und qualitative Bewertung der Wirkung auf die Landnutzungsklassen.
- Erstellung einer Wirkmatrix und Berechnung der SSP-CH-spezifischen Anteile der Landnutzungsklassen in den Jahren 2060 und 2100 (Zielbilder).
- Validierung und Nachjustierung der Zielbilder durch Fachexperten und Fachexpertinnen an einem Workshop.
- Nachbearbeitung und Festlegung der finalen Zielbilder
- Bestimmung der räumlichen Interventionen («Patcher» und «Expander»)

Qualitative Bewertung der Flächenentwicklung

Verschiedene Szenarioparameter beeinflussen die Entwicklung der Landnutzung:

- Die Bevölkerung, der Wohnraum Pro-Kopf sowie der Grad der Urbanisierung und die Verdichtung wirken insbesondere auf die Siedlungsfläche.
- Der Grad der Selbstversorgung (bez. Energie und Nahrungsmittel), die Intensität der Landwirtschaft sowie die Tierbestände haben einen direkten Effekt auf die Entwicklung der Ackerfläche und der Naturwiesen.
- Die Szenarioparameter «Zustand der Natur» sowie «Wertschätzung der Natur» beeinflussen die Wald- und Gebüschrflächen
- Die sonstigen Flächen werden beeinflusst durch den Ausbau von Infrastrukturen (u.a. Verkehrs- und Energieflächen), aber auch durch das Abschmelzen der Gletscher und des Firns.
- Klimaerwärmung: In allen SSP-CH wird von einer identischen Erwärmung des Klimas ausgegangen, unterstellt wird der Erwärmungspfad RCP 4.5. Entsprechend ist der Rückgang der Gletscherflächen in allen SSP-CH identisch.

Zentrale Charakteristika der SSP-CH in Bezug auf die Landnutzung sind in der nachfolgenden Tabelle 29 zusammengefasst.

Tabelle 29: Qualitative Entwicklung von Szenarioparametern in den unterschiedenen SSP-CH

SSP-CH	Bevölkerung	Naturzustand	Ackerbau / Landwirtschaft	Tierbestände	Energie
SSP0-CH	tief	hohe Bedeutung, hohe Qualität in Landwirtschaftsgebiet und Siedlungen, aber wenig Schutzfläche und Wildnis	viel landwirtschaftliche Flächen, ökologisch; hoher Selbstversorgungsgrad	tief	hoher Selbstversorgungsgrad, stark reduzierter Verbrauch, Erneuerbare Energien
SSP1-CH	hoch	hohe Bedeutung, guter Zustand in bestehenden Naturflächen	hohe Effizienz, technologisiert und spezialisiert, geringer Selbstversorgungsgrad, hohe Importe	tief	mittlerer Selbstversorgungsgrad, hoher Energieverbrauch, Erneuerbare Energien
SSP3-CH	tief	geringe Bedeutung; viele naturnahe Flächen, aber auch viel Verwilderung, da kein Ökosystemmanagement	mittlere Bedeutung, hohe Selbstversorgung, wenig technologisiert	tief	fossile und erneuerbare Energien, geringe Importe und geringe Produktion, aufgrund geringer Nachfrage
SSP4-CH	tief	mittlerer Naturzustand, viele Naturparks, Naturschutz als Luxusgut	mittlere Bedeutung, geringer Selbstversorgungsgrad, hoch technologisiert	tief	mittlerer Selbstversorgungsgrad und hoher Energieverbrauch, aber nur wenig Erneuerbare (vermehrt fossile Energie)
SSP5-CH	hoch	geringe Bedeutung, stark degradiert, geringe Wertschätzung, hohe Ausbeutung der Naturflächen	hohe Bedeutung, energie- und ressourcenintensiv, hohe Selbstversorgung, wenig technologisiert	hoch, langfristig abnehmend	hohe Importe, geringer Selbstversorgungsgrad, fossile Energie

Ausgehend von der Beschreibung der SSP-CH und der qualitativen und teilweise auch quantitativen Entwicklung der Szenarioparameter haben wir für jedes SSP-CH die qualitative Veränderung der zehn Landnutzungsklassen eingeschätzt. Die qualitativen Veränderungen wurden für den Bereich stark abnehmend (--) bis stark zunehmend (++) festgelegt, wobei uns jeweils der Zustand im Jahr 2020 als Referenzwert diente. Abbildung 53 zeigt die resultierende qualitative Einschätzung.

Abbildung 53: Veränderung der Landnutzungsflächen nach SSP-CH – qualitative Einschätzung

	SSP0-CH		SSP1-CH		SSP3-CH		SSP4-CH		SSP5-CH	
	2060	2100	2060	2100	2060	2100	2060	2100	2060	2100
Landwirtschaft	+	+	-	-	○	+	○	○-	○-	+
Dauerkulturen	○+	○+	-	-	○+	+	-	-	○-	○-
Naturwiesen	○	○	+	+	-	-	-	-	+	+
Gebüsflächen	-	-	-	-	○+	○+	+	++	-	-
sonstige Flächen	○-	-	○	○	○	-	○+	○	+	++
Geschlossener Wald	○	○	○	+	+	+	○	○+	-	○-
Offener Wald	○	○-	○	○	○	+	○+	○+	○-	○-
Siedlungsflächen	-	-	+	+	○-	-	+	○+	+	+
Alpwirtschaft	○	○	-	-	○-	-	-	-	○	-
Gletscher	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

○+ stark zunehmend ○+ zunehmend ○ leicht zunehmend ○ gleichbleibend ○ leicht abnehmend - abnehmend - stark abnehmend

Grafik Prognos.

Wirkmatrix

Im nächsten Schritt haben wir die qualitative Veränderung der Fläche der Landnutzungsklassen in quantitative Flächenveränderungen übersetzt. Das gewählte Vorgehen ist abhängig von der Landnutzungs-kategorie.

Der Rückgang bei der Kategorie Gletscher fällt in allen SSP-CH identisch aus, ursächlich ist die Klimaerwärmung. Der angenommene Rückgang basiert auf Berechnungen der ETH Zürich (Zekollare et al. 2019). Aus ehemaligen Gletscher- und Firnflächen entstehen statische Flächen (Geröll, Fels).

Die Entwicklung der Siedlungsfläche haben wir an die Szenarioparameter Bevölkerungsentwicklung und Wohnfläche Pro-Kopf gekoppelt. Dabei haben wir angenommen, dass sich die Veränderung Siedlungsfläche unterproportional verändert. Unterstellt wurden Korrelationsfaktoren von rund 0.3 bis 0.5. Beispielweise ist im SSP5-CH im Jahr 2100 die Bevölkerung mit 10.9 Mio. rund 25 % höher als im Jahr 2020, gleichzeitig erhöht sich die Wohnfläche Pro-Kopf um rund 14 %. Dies entspricht einer Zunahme der Gesamtwohnfläche um mehr als 40 %. Mit einem Korrelationsfaktor (Elastizität) von 0.5 ergibt sich eine Zunahme der Siedlungsfläche von rund 20 %.

Bei Gewässern (Flüsse, Seen) haben wir unterstellt, dass diese Flächen unverändert zum Ausgangszustand 2020 bleiben. Für die übrigen Landnutzungsklassen werden die jährlichen Veränderungs-raten aus den in Abbildung 53 ausgewiesenen qualitativen Veränderungen berechnet. Dazu haben wir folgende vereinfachte Setzungen für die mittleren jährlichen Veränderungs-raten angenommen:

- 0+/- → +/-0.2% / Jahr

- +/- → +/-0.4% / Jahr
- ++/-- → +/- 0.8% / Jahr

Landnutzungsklassen mit kleineren Flächenanteilen weisen i.d.R. grössere prozentuale Veränderungen auf, während Klassen mit grösseren Flächenanteilen geringe prozentuale Änderungen aufweisen.⁹⁵ Berücksichtigt haben wir dies durch eine Gewichtung bzw. Skalierung der prozentualen Änderungen mit den Inversen des jeweiligen Anteils der Landnutzungsklasse an der Gesamtfläche. Für jeden Landnutzungstyp haben wir anhand des obenstehenden Ansatzes für die beiden Zeiträume 2020 – 2060 und 2060 – 2100 mittlere jährliche Veränderungsrate berechnet. Mit den jährlichen Veränderungsrate schreiben wir die absoluten Flächen jedes Landnutzungstyps ausgehend vom Jahr 2020 in einem ersten Schritt bis zum Jahr 2060 und anschliessend bis zum Jahr 2100 fort. Die einzelnen Flächen der Landnutzungsklassen werden anschliessend addiert und auf die vorgegebene Gesamtfläche der Schweiz kalibriert (Gesamtfläche bleibt unverändert).

Validierung durch Experten und Finale Zielbilder (und Zwischenziele)

An einem halbtägigen Workshop mit zehn Fachexperten und Fachexpertinnen aus den Bereichen Forschung (Universitäten, Fachhochschulen) und Verwaltung (Bund, Kantone) haben wir die entworfenen Zielbilder validiert und nachjustiert. Dazu wurden zuerst die Teilnehmer und Teilnehmerinnen mit den SSP-CH vertraut gemacht. Anschliessend wurden die Entwürfe der Zielbilder der einzelnen SSP-CH vorgestellt und diskutiert. Empfehlungen zur Modifikation der einzelnen SSP-CH wurden aufgenommen und im Nachgang in die Zielbilder eingearbeitet. Die finalen Zielbilder umfassen für jedes SSP-CH die Flächenanteile der zehn unterschiedenen Landnutzungsklassen in den Jahren 2060 und 2100.

Räumliche Interventionen

Ergänzend zum Zielbild mit den Angaben zu den Flächenanteilen der Landnutzungsklassen werden aus den Storylines der SSP-CH räumliche Interventionen hergeleitet («Patcher» und «Expander»). In der nachfolgenden Tabelle 30 sind die Priorisierung der Interventionen (Reihenfolge der Wirkung) und die Narrative bzw. Begründungen für die getroffenen Einstellungen beschrieben. Die Intervention «Urbanisierung» umfasst sowohl ein verstärktes (oder alternativ abgeschwächtes) Bevölkerungswachstum in städtischen Zentren (Urbanisierung vs. Landflucht),

⁹⁵ Eine Zunahme um 5 % bedeutet bei einer Nutzungsklasse mit einem hohen Flächenanteil, wie beispielsweise dem «Geschlossenen Wald» mit einem Flächenanteil von über 25 %, eine viel grössere absolute Flächenzunahme als bei der Klasse «Dauerkulturen», mit einem Anteil von lediglich rund 1 %. Dies ist unsere Motivation für die Skalierung der direkt aus der qualitativen Einschätzung abgeleiteten Veränderungsrate.

als auch die Art, wie die städtischen Zentren wachsen (Innenverdichtung oder Wachstum an den Rändern).

Tabelle 30: Räumliche Interventionen in den SSP-CH

Policy	SSP0-CH		SSP1-CH		SSP3-CH		SSP4-CH		SSP5-CH	
	Rang	Narrativ	Rang	Narrativ	Rang	Narrativ	Rang	Narrativ	Rang	Narrativ
Urbanisierung- (Verdichtung und Migration)	3	Ausweitung bestehender Zentren, aber keine neuen Gebiete, und keine Verdichtung der Siedlungsgebiete	1	starke Verdichtung, schnelle und effiziente Verkehrsverbindungen zwischen den Zentren	1	zuerst zunehmende Urbanisierung, gegen 2100 vermehrte Rückkehr in ländliche Gebiete, wenig Verdichtung, abgelegene Gebiete werden vermehrt zu Buschland	3	einkommensschwache Gruppen siedeln sich in der Umgebung von Stadtzentren an, Verdichtung in Vororten, keine Verdichtung in Gemeinden der Elite	1	wenig urbane Verdichtung und starke Zersiedelung
Raumplanung	2	keine neuen Siedlungen ausserhalb der Siedlungszone	2	strenge Raumplanerische Auflagen mit dem Ziel der Verdichtung von Wohn- und Arbeitsraum	5	keine Beschränkung der Bauzonen, aufgrund abnehmender Bevölkerung ist Bevölkerungsdruck gering	1	wenig Einschränkungen, neue Siedlungen werden wahrscheinlicher, auch ausserhalb der Bauzonen	3	erhöhte Wahrscheinlichkeit für neue Siedlungen
Ackerbau / Landwirtschaft	1	weite Teile des Landes sind landwirtschaftlich extensiv bewirtschaftet: (kleine) abgelegene städtische Gebiete werden in landwirtschaftliche Flächen umgewandelt, während ländliche Zentren zunehmen	3	hohe Importe an Nahrungsmittel bei geringer Selbstversorgung, Bedarf an LWT-Flächen nimmt ab, teilweise zur Energieerzeugung genutzt	2	Selbstversorgung sowohl in städtischen als auch in ländlichen Gebieten weit verbreitet, Landwirtschaft kleinteilig und extensiv	2	vermehrt hoch-technisierte Grossbetriebe, die Produktion ist großflächig und kosteneffizient	2	bis 2060 intensive Landwirtschaft auf heutigem Niveau plus hohe landwirtschaftliche Importe, nach 2060 nimmt Bedeutung von Selbstversorgung zu: Intensivierung verstärkt sich, damit einhergehend verstärkte landw. Nutzung von Randgebieten
Berg- Entwicklung	5	Stärkung regionaler Zentren, auch in Bergregionen	5	starke Zentralisierung, keine Zunahme in Berggebieten	3	Abnahme städtischer Gebiete in den Bergen bis etwa 2080	5	keine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Siedlungen in Bergregionen	5	auch in Bergregionen sind neue Siedlungen wahrscheinlich
Schutzgebiete	4	der Schutz ist hoch, aber kein Bedarf an mehr Schutzgebieten (integrativer Naturschutz: genutzte Fläche ist ökologisch wertvoll)	4	starker separativer Schutz, Ausweitung der Schutzgebiete	4	schwacher Schutz, hohe Wahrscheinlichkeit einer Umwandlung	4	geringer Schutz – private Naturparks (ohne staatliche Schutzziele und Vorschriften)	4	schwacher Schutz, erhöhte Wahrscheinlichkeit zur Umwandlung von Schutzgebieten

Modell-Inputs

Die finalen Zielbilder der fünf SSP-CH fliessen als zentraler Input in die Modellierung der Landnutzung mit Evoland ein (Abbildung 54 und Abbildung 55, linke Spalten). Weitere wichtige Inputs für die Modellierung sind ausserdem SSP-CH-spezifische Angaben zur Entwicklung der Bevölkerung und der Erwerbstätigen (letzteres unterschieden nach den Wirtschaftssektoren Landwirtschaft, Industrie und Dienstleistungen). Grundlage für diese Grössen sind die Szenario-parameter Bevölkerung und BIP pro Kopf (siehe Kapitel 3.3). Die Entwicklung der Bevölkerung und der Erwerbstätigen wurden regional aufgelöst (kantonale Daten). Als Vereinfachung wurde in allen SSP-CH die identische regionale Struktur angesetzt. Grundlage für die Regionalisierung der Bevölkerung und der Erwerbstätigen — die SSP-CH geben nur landesweite Zahlen vor — sind die Bevölkerungsszenarien des BFS sowie die Branchenszenarien des SECO, welche in den Energieperspektiven 2050+ genutzt wurden. Ausserdem werden die Angaben zu den räumlichen Interventionen genutzt, um die Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen den Landnutzungsklassen zu modulieren und an die Storylines der SSP-CH anzupassen (siehe Tabelle 30).

Eine detaillierte Darstellung aller genutzter Inputs sowie des Modell-Codes findet sich auf der Projektseite.

- <https://zenodo.org/records/17108008>
- doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17108008>

9.4. Ergebnisse und Diskussion

9.4.1. Zielbilder und Ergebnisse der Modellierung

Abbildung 54 und Abbildung 55 zeigen die Zwischenzielbilder für das Jahr 2060, die Zielbilder für das Jahr 2100 sowie die Modellierungsergebnisse aus Evoland (Jahr 2100) für die SPP-CH. Mit der Modellierung konnten die Zielbilder in der Regel gut nachgebildet werden, die Abweichungen zwischen den Vorgaben (Zielbilder) und Modellergebnissen für die einzelnen Landnutzungsklassen liegen in der Regel unter einem Prozentpunkt (PP). Ausnahme bildet die Entwicklung in SSP0-CH, bei der die Anteile für die Landnutzungsklasse Ackerland und den geschlossenen Wald mit der Modellierung nicht erreicht werden konnten (siehe Box im nachfolgenden Abschnitt zu SSP0-CH). Die nachfolgenden Ergebnisdarstellungen zu den einzelnen SSP-CH beziehen sich ausschliesslich auf die Modellergebnisse. Dies gilt es bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Abbildung 54: Anteile der Landnutzungsklassen im Jahr 2020 (Status Quo), die Anteile in den SSP0-CH und SSP1-CH in den Jahren 2060 und 2100 (Zielbilder - Modellinput) sowie Modellierungsergebnisse in Evoland (rechte Spalte)

Status Quo



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

Abbildung 55: Anteile der Landnutzungsklassen in SSP3-CH, SSP4-CH und SSP5-CH in den Jahren 2060 und 2100 (Zielbilder - Modellinput) sowie Modellierungsergebnisse in Evoland (rechte Spalte)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik Prognos.

9.4.2. Entwicklung in den einzelnen SSP-CH

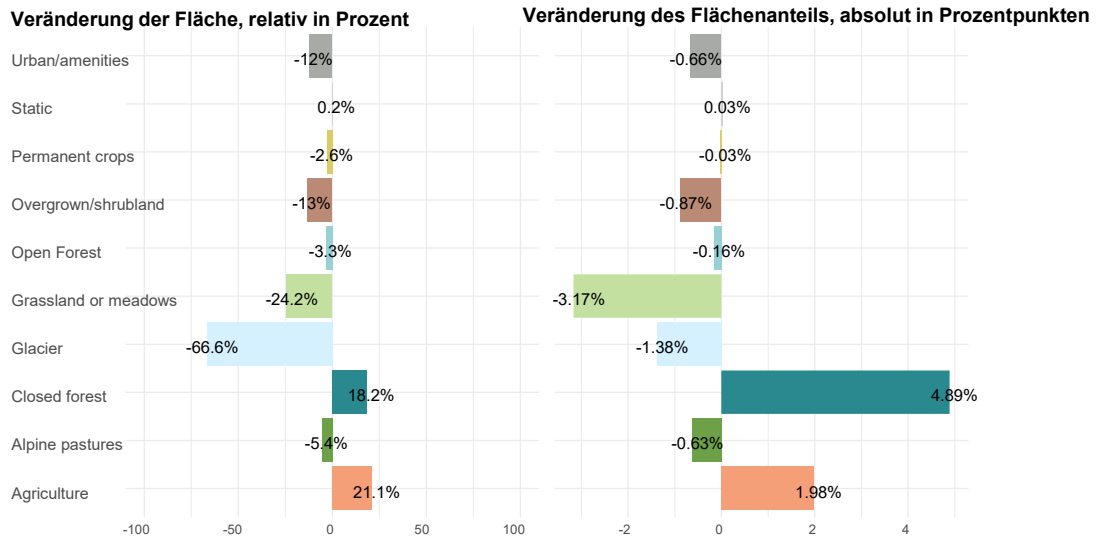
SSP0-CH

In SSP0-CH nimmt die Bevölkerung leicht ab, im Jahr 2100 liegt sie rund 1 % unter dem Niveau des Jahres 2020. Selbstversorgung gewinnt in SSP0-CH an Bedeutung und die Ackerfläche wächst, bis zum Jahr 2100 um rund 20 % ggü. dem Jahr 2020. Dadurch erhöht sich der Anteil der Ackerfläche an der Gesamtfläche um 2 PP (Abbildung 56). Dieser Anstieg kommt auch daher, dass die landwirtschaftliche Produktion extensiv ist und vergleichsweise viel Fläche in Anspruch nimmt (dies im Gegensatz zu SSP5-CH, wo überwiegend intensive Landwirtschaft betrieben wird). Im vorab bestimmten Zielbild fällt die Zunahme der Ackerfläche mit 6 PP (+65 %) höher aus (vgl. Diskussion in untenstehender Box). Im Zielbild nimmt auch die Fläche mit Dauerkulturen zu (+17 %, respektive +0.2 PP), in der Modellierung verändert sich die Fläche dieser Landnutzungsklasse nicht wesentlich. Bei der Landnutzungsklasse Geschlossener Wald zeigt sich ebenfalls eine Differenz zwischen Zielbild (Abnahme) und Modellierung (Zunahme). Die Flächen der übrigen Landnutzungsklassen sind abnehmend, sowohl in der Modellierung als auch im Zielbild. Am stärksten nimmt die Fläche mit Naturwiesen ab (ca. -24 %; respektive -3.2 PP). Aufgrund der Klimaerwärmung verringert sich die Fläche der Gletscher bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum Jahr 2020 um annähernd 70 %, was einer Reduktion des Flächenanteils von 1.4 PP entspricht.

Eine grosse Verschiebung zeigt sich zwischen den Landnutzungsklassen Naturwiesen und Ackerflächen: Zusätzliche Ackerflächen werden vor allem aus der Umwandlung von Naturwiesen gewonnen. In der Modellierung wächst der geschlossene Wald insbesondere auf Kosten des offenen Waldes und der Gebüschflächen. Nur geringe Waldflächen werden in Ackerflächen umgewandelt (auch weil diese oft nicht zu landwirtschaftlichen Nutzung geeignet sind).

Die resultierende geografische Verteilung der Landnutzungsklassen im Jahr 2100 ist in Abbildung 57 dargestellt.

Abbildung 56: SSP0-CH – Veränderung der Flächen (linke Seite) und des Flächenanteils der Landnutzungs-klassen, Jahr 2100 im Vergleich zu 2020 (Modellergebnis)



Grafik Ben Black.

Abbildung 57: SSP0-CH – Verteilung der Landnutzungs-klassen in der Schweiz im Jahr 2100



Grafik Ben Black.

Differenzen zwischen Zielbild und Modellergebnis

Bei der Modellierung von SSP0-CH konnten die Zielvorgaben für die Landnutzungsklassen Ackerland und geschlossener Wald nicht erreicht werden. Der Anteil des Ackerlands liegt im Modellergebnisse im Jahr 2100 rund 4 Prozentpunkte unter der Vorgabe (11.4 % anstatt 15.6 %), während der Anteil des geschlossenen Waldes fast 6 Prozentpunkte über der Vorgabe liegt (31.8 % anstatt 26.0 %). Trotz dem Hinzufügen aller im Modell möglicher indirekter Nutzungsübergänge konnte keine ausreichende Übertragung von geschlossenem Wald zu intensiver Ackerfläche erreicht werden. Ein Problem bei der Modellierung besteht darin, dass es in den historischen Landnutzungsdaten nur sehr wenige Zellen gibt, die diesen Übergang zuvor durchlaufen haben. Auf dieser Datenbasis war es nicht möglich ein statistisches Modell zu trainieren, um diesen Übergang abzubilden.

Die Tatsache, dass die vorgegebene Veränderung im Modell nicht aufgelöst werden konnte, während ähnlich grosse Veränderungen bei Landnutzungsklassen in anderen SSP-CH aufgelöst werden konnten, veranlasst die Frage, wie realistisch bzw. plausibel die vorgegebenen Zielwerte sind. In abstrakter Hinsicht ermöglicht das Modell eine realistische Darstellung des Landnutzungssystems. Das Modell versucht, Nutzungsänderungen Standorten zuzuordnen, die (aus physikalischer/klimatischer Sicht) geeignet sind, und von denen bekannt ist, dass sie in der Realität auftreten. Wenn wir eine spezifische Veränderung selbst unter Einbeziehung von Klassenübergängen, die aufgrund sehr geringer Häufigkeiten in den historischen Daten höchst unwahrscheinlich sind, nicht erreichen können, deutet dies darauf hin, dass das System selbst gegenüber dem gegenwärtigen Zustand stark verändert werden müsste, damit dieses Szenario eintreten kann. Die Vorgabe des Zielbilds ist also nicht per se unrealistisch, die Transformation ist jedoch nicht mit den beobachteten Landnutzungsveränderungen der letzten Jahrzehnte erklärbar. Die Veränderung in SSP0-CH kann nur durch einen sehr starken Bruch in der Entwicklung des Systems erreicht werden.

SSP1-CH

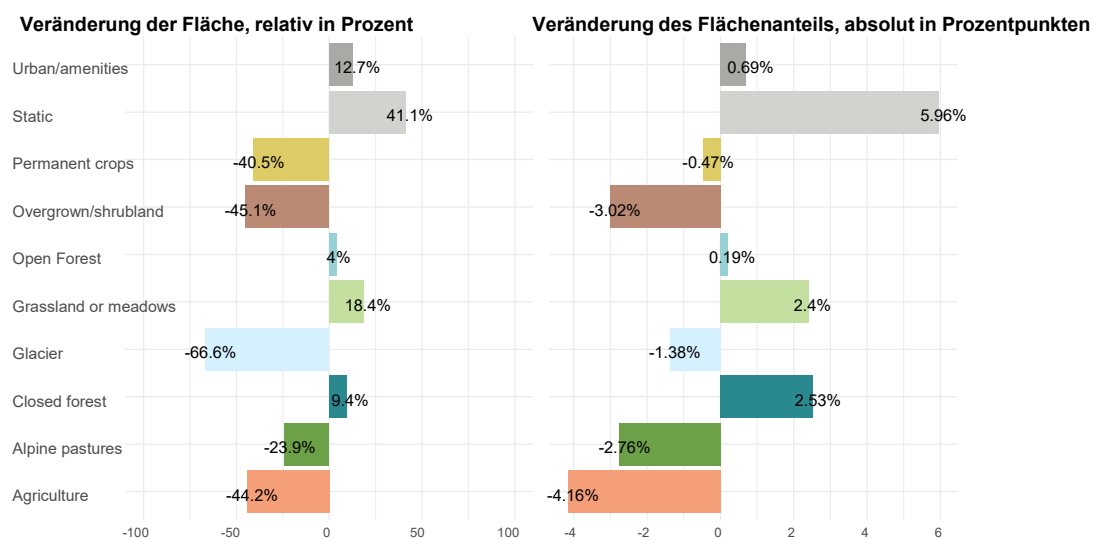
Im Gegensatz zu SSP0-CH nimmt in SSP1-CH die Ackerfläche (-44 %; -4.2 PP) und die Fläche mit Alpwirtschaft (-24 %; -2.8 PP) deutlich ab (Abbildung 58). Die landwirtschaftliche Produktion ist in SSP1-CH hoch spezialisiert und technologisiert, die Bedeutung von Fleisch nimmt hingegen ab (weniger Tierproduktion). Zudem werden im Szenario viele Nahrungsmittel importiert, wodurch die Ackerfläche trotz starkem Bevölkerungsanstieg bis 2100 (+ 28% im Vergleich zum Jahr 2020) nicht in gleichem Masse ansteigt wie im SSP0-CH. Wie in allen SSP-CH verringert sich die Fläche der Gletscher bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum Jahr 2020 um annähernd 70 %

(Anteil -1.4 PP). Demgegenüber steigt der Anteil der sonstigen Flächen deutlich an (+6 PP; +41 %). Zurückzuführen ist dies unter anderem auf die Zunahme von Flächen für technische Infrastrukturen (Verkehr, Energiegewinnung). Deutlich grösser werden auch die Flächen der Nutzungsklassen Naturwiesen und Heimweiden (+18 %, u.a. aufgrund von Naturschutz und pflegender Landwirtschaft) und geschlossener Wald (+9 %). Die Bevölkerung nimmt zwar stark zu, bis zum Jahr 2100 um annähernd 30 i% im Vergleich zum Jahr 2020, die Siedlungen werden jedoch stark verdichtet, so dass die Zunahme der Siedlungsfläche begrenzt bleibt (ca. +13 %).

Aufgegebene Ackerflächen werden überwiegend in Naturwiesen und Weiden umgenutzt (Abbildung 59). Die Fläche an geschlossenen Wald wächst auf Kosten des offenen Waldes und von Gebüschflächen. Gleichzeitig werden grössere Waldflächen in Naturwiesen und Heimweiden umgenutzt oder für Infrastrukturen benötigt. Bei der Darstellung in Abbildung 59 gilt es zu berücksichtigen, dass beim Vergleich der Jahre 2020 und 2100 einige Zwischenumwandlungen in den dazwischen liegenden Zeitschritten ausgeblendet sind. Die Abbildung gibt jedoch einen Gesamtüberblick über die Übergänge zwischen den Klassen – dies gilt es auch für die vergleichbaren Darstellungen der übrigen SSP-CH im Datenanhang zu beachten.

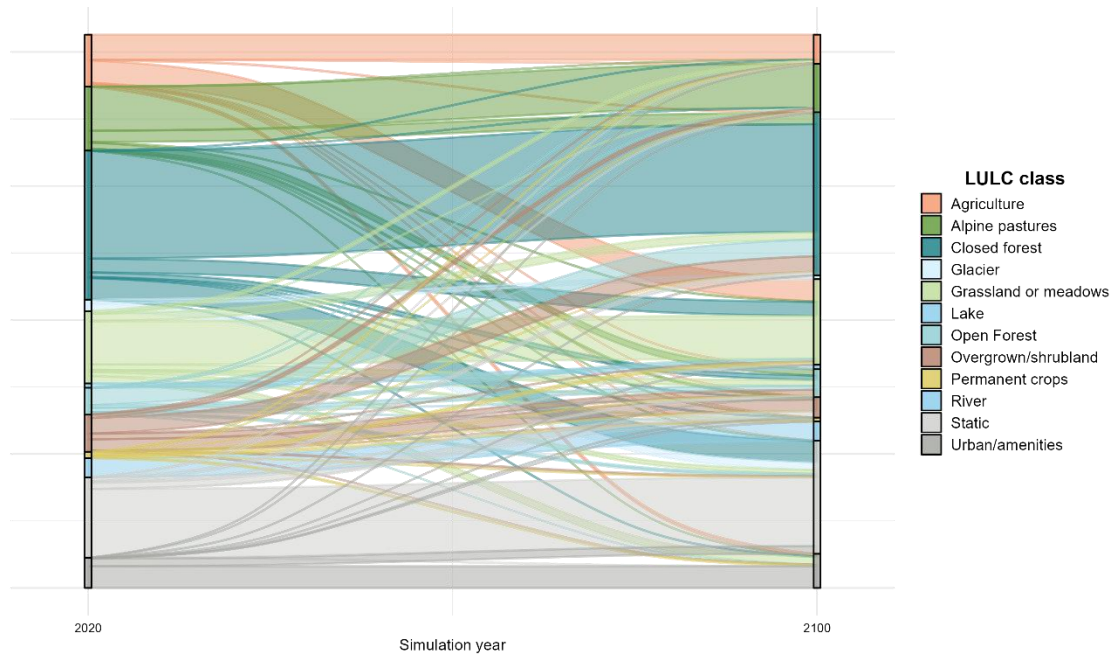
Die resultierende geografische Verteilung der Landnutzungsklassen im Jahr 2100 ist in Abbildung 60 dargestellt.

Abbildung 58: SSP1-CH – Veränderung der Flächen (linke Seite) und des Flächenanteils der Landnutzungsklassen, Jahr 2100 im Vergleich zu 2020 (Modellergebnis)



Grafik Ben Black.

Abbildung 59: SSP1-CH – Wechsel der Landnutzungsklassen, Jahr 2100 im Vergleich zu 2020



Grafik Ben Black.

Abbildung 60: SSP1-CH – Verteilung der Landnutzungsklassen in der Schweiz im Jahr 2100



Grafik Ben Black.

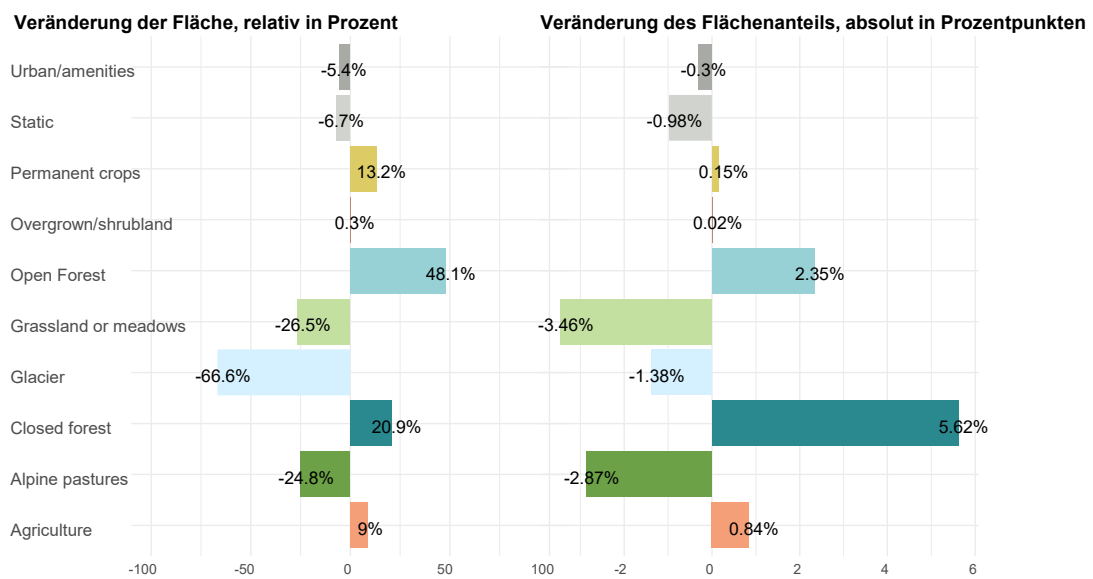
SSP3-CH

Die Landnutzung in SSP3-CH ist charakterisiert durch eine stark wachsende Waldfläche: geschlossener Wald (ca. +5.5 PP; +21 %), offener Wald +2.4 PP; +48 %; Abbildung 61). In SSP-CH3 nimmt die Bevölkerung deutlich ab, bis 2100 um 14 % im Vergleich zu 2020. Entsprechend nimmt auch die Siedlungsfläche leicht ab (ca. -5 %). Die Bedeutung von Nahrungsmittelimporten ist vergleichsweise gering, die Selbstversorgung hoch. Die Landwirtschaft ist jedoch wenig technologisiert (viel Subsistenzwirtschaft) und die Tierbestände sind tief. Die Ackerfläche nimmt zu (+9 %), während die Alpwirtschaftsflächen abnehmen (-25 %). Deutlich grösser wird auch die Fläche der Nutzungsklasse Heimweiden (+27 %). Wie in den anderen SSP-CH verringert sich die Fläche der Gletscher (inkl. Firn) bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum Jahr 2020 um rund 70 % (Anteil -1.4 PP).

Grössere Verschiebungen zeigen sich zwischen den Landnutzungsklassen Gebüschflächen, offenen Wald und geschlossenen Wald, wobei erstere in zusätzliche Fläche mit geschlossenem Wald umgenutzt werden. Abgehende Alpweiden werden überwiegend in offenen und geschlossenen Wald umgewandelt. Zusätzliche Ackerflächen werden aus der Umwandlung von Naturwiesen gewonnen.

Die resultierende geografische Verteilung der Landnutzungsklassen im Jahr 2100 ist in Abbildung 62 dargestellt. Beispielhaft ist für SSP3-CH in Abbildung 63 auch eine Karte mit den Flächen mit veränderter Nutzung der Klasse geschlossener Wald abgebildet. Vergleichbare Karten wurden auch für die übrigen Landnutzungsklassen und SSP-CH erstellt. Diese Karten haben wir über die Zenodo-Projektseite verfügbar gemacht.

Abbildung 61: SSP3-CH – Veränderung der Flächen (linke Seite) und des Flächenanteils der Landnutzungsklassen, Jahr 2100 im Vergleich zu 2020 (Modellergebnis)



Grafik Ben Black.

Abbildung 62: SSP3-CH – Verteilung der Landnutzungsklassen in der Schweiz im Jahr 2100



Grafik Ben Black.

Abbildung 63: Change-Map des SSP3-CH – Veränderung in der Landnutzungs-kategorie geschlossener Wald, Jahr 2100 im Vergleich zu 2020 (Zunahmen in grün und Abgänge in rot). Vergleichbare Karten wurden auch für die übrigen Landnutzungs-kategorien und SSP-CH erstellt. Sie stehen auf Zenodo-Projektseite zur Verfügung.⁹⁶



Grafik Ben Black.

SSP4-CH

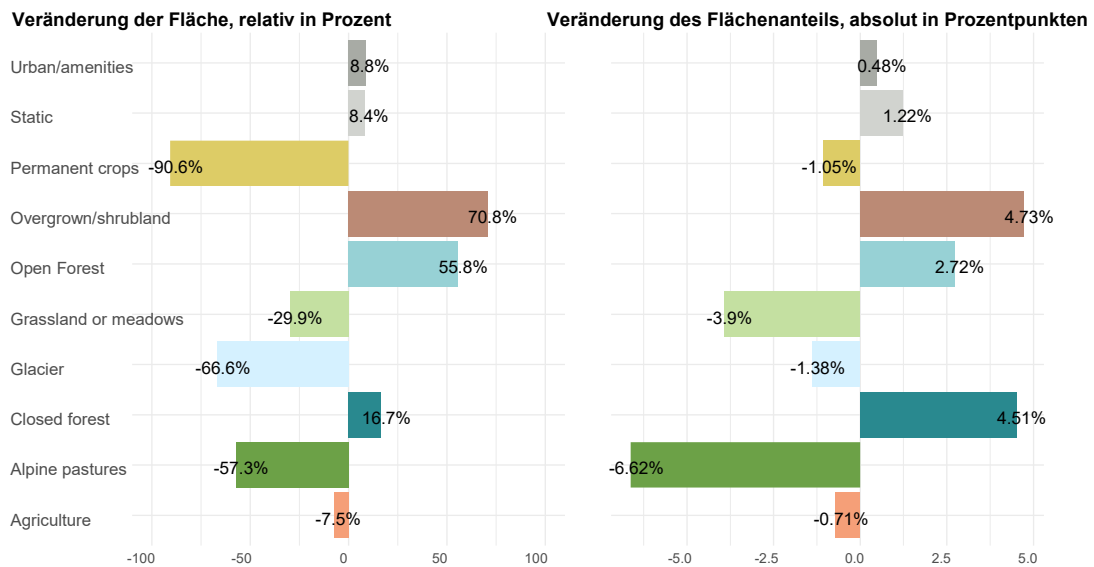
In SSP4-CH nimmt die Bevölkerung bis zum Jahr 2060 stark zu und wird dann wieder leicht rückläufig. Im Jahr 2100 liegt sie rund 10 % höher als im Jahr 2020. Damit verbunden ist eine Zunahme der Siedlungsfläche, bis 2100 um beinahe 10 %. Der Ackerbau ist gekennzeichnet durch wenige, aber sehr grosse, automatisierte Betriebe. Die Selbstversorgung ist gering, viele Nahrungsmittel werden importiert, insbesondere Fleisch. Die Ackerfläche nimmt leicht ab (-7.5 %; Abbildung 64). Naturwiesen und Weiden (-30 %) sowie auch die Alpwirtschaftsflächen (annähernd -60 %) sind sehr deutlich rückläufig. Wie in den anderen SSP-CH verringert sich die Fläche der Gletscher (inkl. Firn) bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum Jahr 2020 um annähernd 70 % (Anteil -1.4 PP).

⁹⁶ <https://zenodo.org/records/17108008> (Version v2)

Demgegenüber nehmen die nicht produktiv genutzten Flächen deutlich zu, darunter die Gebüschflächen (+71 %), geschlossener Wald (+17 %) und offener Wald (+56 %).

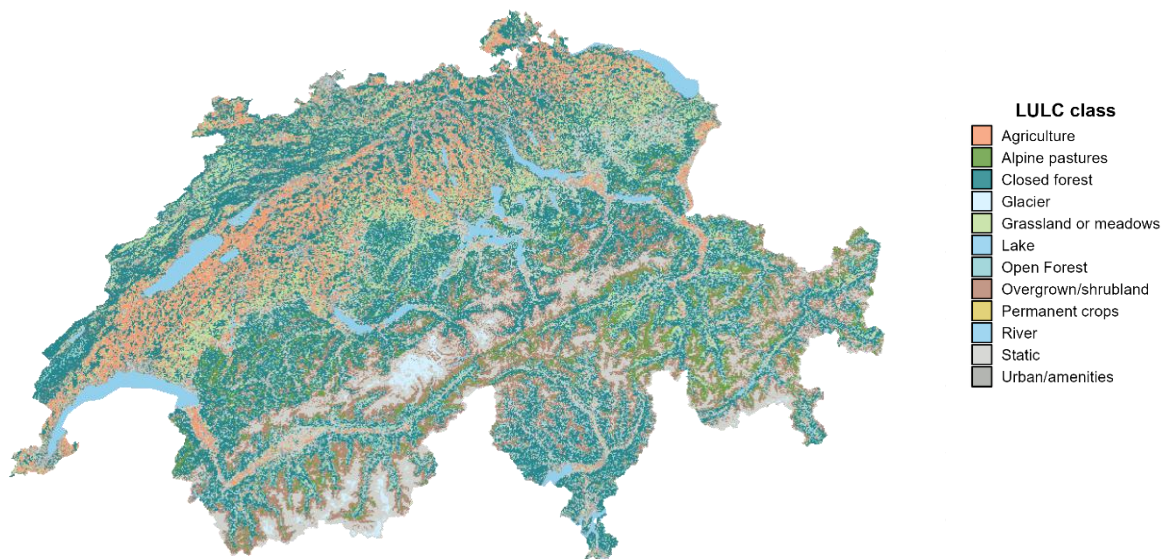
In SSP4-CH zeigen sich bei den meisten Nutzungsklassen deutliche zu, aber auch Abgänge. Bei einigen Nutzungsklassen kompensieren sich die Zu- und Abgänge, so dass sich die Gesamtflächen dieser Nutzungsklassen nur wenig ändern (z.B. bei den sonstigen bzw. statischen Flächen). Die deutliche Abnahme der alpinen Wirtschaftsflächen führt insbesondere beim offenen Wald und der Gebüschvegetation zu steigenden Flächen. Abgehende Naturwiesen und Heimweiden werden langfristig überwiegend in Ackerflächen und geschlossenen Wald umgenutzt. Die resultierende geografische Verteilung der Landnutzungsklassen im Jahr 2100 ist in Abbildung 65 dargestellt.

Abbildung 64: SSP4-CH – Veränderung der Flächen (linke Seite) und des Flächenanteils der Landnutzungsklassen, Jahr 2100 im Vergleich zu 2020 (Modellergebnis)



Grafik Ben Black.

Abbildung 65: SSP4-CH – Verteilung der Landnutzungsklassen in der Schweiz im Jahr 2100



Grafik Ben Black.

SSP5-CH

In SSP5-CH nimmt die Bevölkerung stark zu. Bis zum Jahr 2060 wächst sie im Vergleich zum Jahr 2020 um 37%. Danach nimmt sie wieder ab und liegt im Jahr 2100 noch 19% über dem Ausgangsniveau von 2020. Zudem ist das Szenario charakterisiert durch einen hohen Pro-Kopf-Flächenverbrauch und schwacher raumplanerischer Regulierung (Zersiedelung und wenig urbane Verdichtung). Die Siedlungsfläche nimmt dadurch bis zum Jahr 2100 deutlich zu (gemäss Zielbild um rund 25 %; Modellierung +6 %). Insbesondere aufgrund des sehr starken Mobilitätswachstums nehmen auch die sonstigen Flächen sehr stark zu (+49 %; +7.2 PP; Abbildung 66).

Der Ackerbau hat hohe Bedeutung, wobei nach 2060 die Selbstversorgung an Bedeutung gewinnt. Die Ackerfläche steigt bis 2100 um 15 %. Der Fleischkonsum und auch die Tierbestände sind in SSP5-CH hoch. Die Tiererhaltung erfolgt überwiegend auf Wiesen und Weiden im Mittelland, während die Alpwirtschaft an Bedeutung verliert: Naturwiesen und Weiden +33 %, Alpwirtschaft -28 % (Veränderung der Flächen im Zeitraum 2020 – 2100).

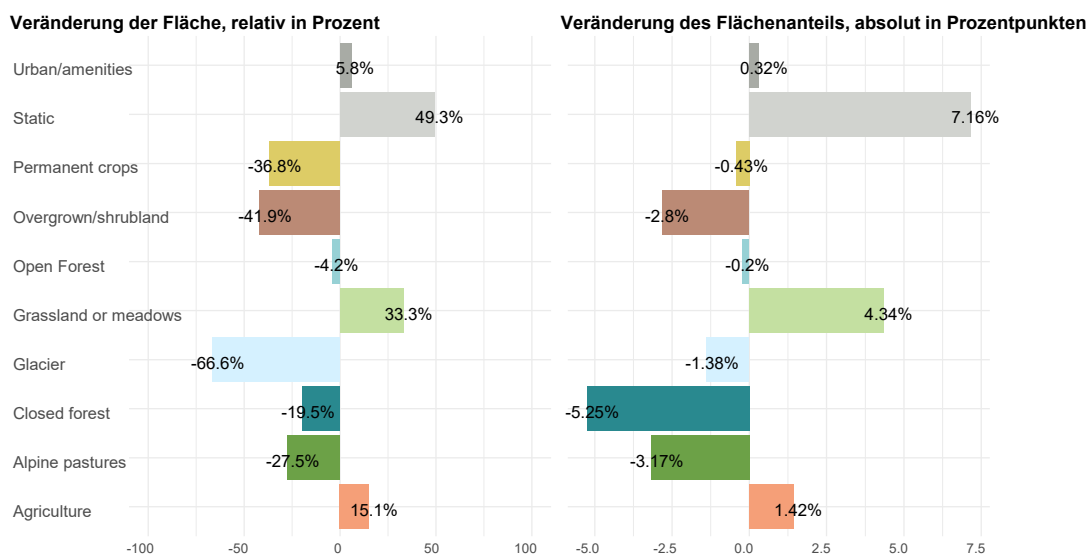
Aufgrund des Drucks durch die wachsenden Siedlungen, Verkehrsflächen und auch der Ackerflächen, verringert sich die Waldfläche. Im Zielbild nimmt die Fläche an geschlossenem Wald bis zum Jahr 2100 um 30 % (Modellierung -20 %). Die Veränderung beim offenen Wald ist

vergleichsweise gering (Fläche -4 %). Einerseits wird der offene Wald verstärkt genutzt, andererseits ergeben sich durch die Aufgabe von Alpwirtschaften neue Flächen mit offenem Wald. Wie in den anderen SSP-CH verringert sich die Fläche der Gletscher (inkl. Firn) bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum Jahr 2020 um rund 70 % (Anteil -1.4 PP).

Naturwiesen und Weiden werden in Ackerflächen umgenutzt, während gleichzeitig an anderer Stelle Ackerflächen in Wiesen und Weiden umgewandelt werden. Insgesamt nimmt die Fläche an Wiesen und Weiden deutlich zu, was auf die Umnutzung von Wald in Wiesen zurückzuführen ist. Das Wachstum der statischen Flächen erfolgt ebenfalls hauptsächlich zu Lasten der Waldfläche. Insgesamt ergibt sich so beim geschlossenen Wald ein deutlicher Rückgang der Flächen. Der Rückgang bei den Alpwirtschaftsflächen führt vor allem beim offenen Wald zu zusätzlichen Flächen.

Die resultierende geografische Verteilung der Landnutzungsklassen in SSP5-CH im Jahr 2100 ist in Abbildung 67 dargestellt.

Abbildung 66: SSP5-CH – Veränderung der Flächen (linke Seite) und des Flächenanteils der Landnutzungsklassen, Jahr 2100 im Vergleich zu 2020 (Modellergebnis)



Grafik Ben Black.

Abbildung 67: SSP5-CH – Verteilung der Landnutzungsklassen in der Schweiz im Jahr 2100



Grafik Ben Black.

Weitere Ergebnisse (u.a. Karten und Abbildungen) finden sich auf der Zenodo-Projektseite:

<https://zenodo.org/records/17108008> (Version v2)

10. Importe und Exporte

10.1. Modellbeschreibung

Die bisher beschriebenen Modelle einzelner Sektoren konzentrieren sich auf die Treibhausgasemissionen, die durch Produktion und Betrieb innerhalb der Schweizer Landesgrenzen entstehen (Territorialprinzip). Um eine umfassendere Sichtweise zu erhalten, betrachten wir in diesem Kapitel zusätzlich die Emissionen, die durch den Import und Export von Gütern verursacht werden (Verursacherprinzip). Diese Betrachtungsweise zeigt, dass durch den Güterimport ein Grossteil der Emissionen, der durch Schweizer Konsum verursacht wird, im Ausland entsteht und nicht durch die inländische Produktion.⁹⁷ Umgekehrt führt der Export von Schweizer Produkten dazu, dass deren Konsum im Ausland verrechnet werden muss.

Für die Modellierung der Emissionen aus Importen und Exporten berücksichtigen wir den gesamten Lebenszyklus eines Produkts. Das umfasst neben der Produktion und dem Betrieb auch vorgelagerte und nachgelagerte Prozesse wie Verkehr und Entsorgung entlang der gesamten Lieferkette. Die Methodik zur Ermittlung der Importemissionen und der Exportemissionen ist allerdings deutlich gröber als in den anderen Sektoren und die Datenbasis ist schlechter. Für jede Produktkategorie (SITC, zweites Level, siehe Tabelle 35) berechnen sich die importierten Emissionen aus der importierten Menge und dem Emissionsfaktor eines Produkts:

$$E_{Import} = \sum_P E_{Import,P} = \sum_P M_{Import,P} * EF_P$$

Variable	Erklärung	Beispiel (für das Jahr 2023)
E_{Import}	Total importierte THG-Emissionen	77.9 Mio. tCO ₂ eq ⁹⁸
$E_{Import,P}$	THG-Emissionen durch Import des Produkts P	5.47 Mio. tCO ₂ eq
$M_{Import,P}$	Importierte Menge des Produkts P	2.37 Mio. t Eisen und Stahl
EF_P	Emissionsfaktor des Produkts P	2.31 kg CO ₂ eq/[kg Eisen und Stahl]

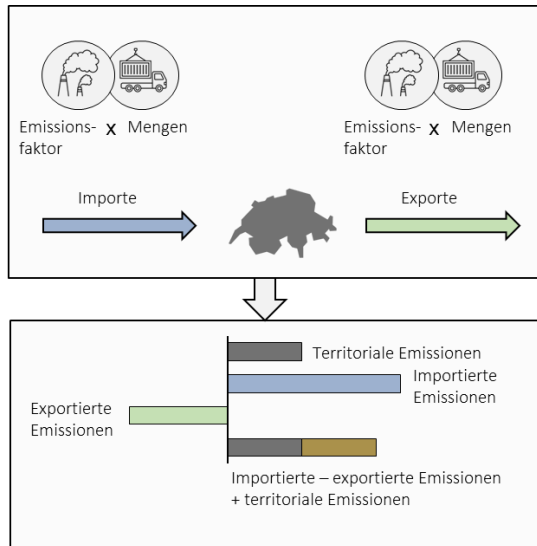
Die exportierten Emissionen errechnen sich analog mit denselben Emissionsfaktoren, d.h. unter der Annahme, dass die Emissionsfaktoren im Ausland so sind wie in der Schweiz⁹⁹, allerdings in der Entwicklung zeitversetzt um 5 Jahre im Vergleich zur Schweiz (wie unten näher diskutiert).

Wir modellieren nur Emission im Zusammenhang mit dem Handel von Gütern. Emissionen durch den Import und Export von Dienstleistungen sind nicht Teil des Modells.

⁹⁷ <https://www.srf.ch/news/schweiz/importierte-emissionen-die-verborgene-klimasuende-der-schweiz>

⁹⁸ Exklusive der Emissionen durch den Import von Strom, Energieträgern und Fahrzeugen.

⁹⁹ Die Entwicklung der Import- und Export-Emissionsfaktoren wird pro SSP-CH allerdings unabhängig voneinander modelliert (siehe Kapitel 10.4).

Abbildung 68: Vorgehen importierte und exportierte Emissionen

Grafik INFRAS.

Abbildung 68 illustriert schematisch das Vorgehen der Modellierung von Importströmen und Exportströmen sowie von territorialen Emissionen. Der obere Teil der Grafik zeigt, dass die Emissionen aus Importen und Exporten sich jeweils aus der Multiplikation von Produktionsmengen mit den entsprechenden Emissionsfaktoren der Herkunftsregionen bzw. der Zielregionen ergeben (auf Basis von EBP 2022, siehe Diskussion in Kapitel 10.4). Der untere Teil der Grafik zeigt, wie die Emissionen bilanziert werden.

10.2. Bestehende Arbeiten und Daten

Die Zollstatistik des Bundesamts für Zoll und Grenzsicherheit (BAZG)¹⁰⁰ liefert die Ausgangswerte der importierten und exportierten Produktmengen im Jahr 2023. Für die darin enthaltenen Produktkategorien (aufgeschlüsselt nach 93 SITC-Gruppen¹⁰¹) beziehen wir die Emissionsfaktoren aus EBP 2022; siehe Tabelle 35 im Anhang A2. Zur Herleitung dieser Emissionsfaktoren wurden in EBP 2022 drei Einflussgrößen berücksichtigt: erstens die Emissionen aus Umwelt-Fussabdrücken der Produktion der jeweiligen Produkte, zweitens die Emissionen durch den Verkehr in die Schweiz sowie drittens die Herkunftsregion der Produkte, um Unterschiede in den Emissionsfaktoren zwischen Ländern abzubilden. Wir verwenden zur Vereinfachung für Importe und Exporte derselben Produktkategorie dieselben Emissionsfaktoren (für die Importe in der zeitlichen Entwicklung aber zeitversetzt um 5 Jahre, siehe Diskussion in Kapitel 10.4).

¹⁰⁰ <https://www.bazg.admin.ch/bazg/de/home/themen/schweizerische-aussenhandelsstatistik/daten/waren.html>

¹⁰¹ SITC-Warengruppen (Standard International Trade Classification) sind eine internationale Klassifikation, die Waren nach ihrem Material, Verwendungszweck oder Produktionsprozess in vergleichbare Gruppen für den Aussenhandel einteilt.

Dieser Ansatz führt tendenziell zu einer Überschätzung der Emissionen aus dem Export, da die Produktion in der Schweiz im Vergleich zum Ausland mit einem Energiemix erfolgt, in dem der Strom vor allem aus Wasserkraft und Kernenergie – und damit fast emissionsfrei - erzeugt wird. Daraus resultieren geringere Emissionen im gesamten Energiemix.

Für die Produktkategorien Fahrzeuge (Strasse und Schiene), Strom und flüssige/gasförmige Energieträger haben wir nicht die obigen Quellen für die Emissionsfaktoren genutzt, sondern direkt die Ergebnisse aus unseren Sektor-Modellen verwendet:

10.3. Beschreibung Szenarien für Sektor Import und Exporte

10.3.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

SSP0-CH: Die genügsame Schweiz

Die internationale Gemeinschaft hat Organisationen wie die Weltbank und den IWF reformiert, um den globalen Finanzausgleich zu organisieren. Neutrale internationale Organisationen wie die UNO und WTO haben an Bedeutung gewonnen und fördern Stabilität und Austausch. Die politische Stabilität hat zu einer regional verflochtenen Wirtschaft geführt, während das globale Handelsvolumen aufgrund von Autarkiebestrebungen und Konsumrückgang abgenommen hat.

SSP1-CH: Die effiziente Schweiz

Die Welt ist in verschiedene grössere Regionalmächte gegliedert, die den politischen und ökonomischen Zusammenschlüssen aus dem Jahr 2000 ähneln. Neue neutrale internationale Organisationen wurden geschaffen und gestärkt. Diese sind zentral für den globalen politischen Austausch und den Handel. Der politische Austausch und die ökonomische Integration zwischen den Regionalmächten sind intensiv. Ambitionierte globale Umweltziele fördern kurze Kreisläufe und Verkehrswege. Die guten Beziehungen und starken internationalen Organisationen haben global zu langanhaltender Stabilität und starker ökonomischer Verflechtung geführt.

SSP3-CH: Die konfliktreiche Schweiz

Die Welt ist krisengebeutel und die Staaten konzentrieren sich auf ihre eigenen Probleme. Es herrscht eine stark nationalistische Stimmung. Die UNO und andere neutrale internationale Organisationen wurden bedeutungslos, alternative Organisationen wurden nicht geschaffen. Dies verstärkte das Misstrauen zwischen den Regionalmächten. Die globale Spezialisierung nahm ab, der Lebensstandard sank weltweit, was Nationalismus und Autarkiebestrebungen weiter förderte. Freihandel nahm stark ab, Grenzkontrollen wurden wieder eingeführt.

SSP4-CH: Die ungleiche Schweiz

Die Welt ist in zwei Blöcke aufgeteilt. Neutrale internationale Organisationen haben an Bedeutung verloren, während Sicherheitsallianzen innerhalb der Blöcke dominieren. Europa hat sich den USA angenähert, kann jedoch die von den USA verhängten Wirtschaftssanktionen gegen China nicht vollständig übernehmen. Handelsbeziehungen innerhalb der Blöcke sind ausgebaut und werden rege genutzt. Auch Handelsbeziehungen zwischen den Blöcken werden von einer vernetzten globalen Wirtschaftselite aufrechterhalten. Politische Beziehungen sind kaum vorhanden. Die Mobilität von Waren und Personen ist stark reguliert.

SSP5-CH: Die ressourcenintensive Schweiz

Während die Wirtschaft bis Mitte des Jahrhunderts global noch stark verflochten war, nahmen Handelsströme und globale Spezialisierung danach stark ab. Die Welt hat sich in zwei Blöcke aufgeteilt. Beide Blöcke sind sehr stark voneinander isoliert, sowohl politisch als auch wirtschaftlich, was für den Westen eine bedeutende Verknappung von Ressourcen (v.a. fossiler Energie) bedeutete. Sicherheitsallianzen spielen eine sehr wichtige Rolle. Auch innerhalb der Blöcke haben sich zwischen verschiedenen Regionen kulturelle und systembedingte Gräben vertieft – jedes Land ist sich selbst am nächsten und versucht, die eigene Autarkie zu stärken.

10.3.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Die SSP-CH beschreiben, wie die Schweiz in regionale und globale Netzwerke eingebettet ist und wie sich sozioökonomische Faktoren in den wichtigsten Handelspartnerländern entwickeln. Die SSP-CH zeichnen ein divergierendes Bild der Schweizer Handelsverflechtung:

- SSP0-CH geht von regionaler Kooperation und generell geringeren Handelsvolumina aus.
- SSP1-CH nimmt starke Handelsbeziehungen und hohe Handelsvolumina ohne grosse Handelshemmnisse an.
- SSP3-CH beschreibt ein Szenario mit niedrigen Handelsvolumina und minimaler internationaler Zusammenarbeit.
- SSP4-CH geht zwar davon aus, dass Handel stattfindet, allerdings nur für eine kleine vermögens- oder einkommensstarke Bevölkerungsschicht. Die Mehrzahl der Konsumenten ist einkommensschwach und handelt kaum. Daher sind auch die Handelsvolumina in der Summe nur mässig.
- SSP5-CH unterstellt hohe Handelsvolumina aufgrund grosser Ströme fossiler Energieträger, bis gegen Ende des Jahrhunderts protektionistische Massnahmen das Handelsvolumen reduzieren.

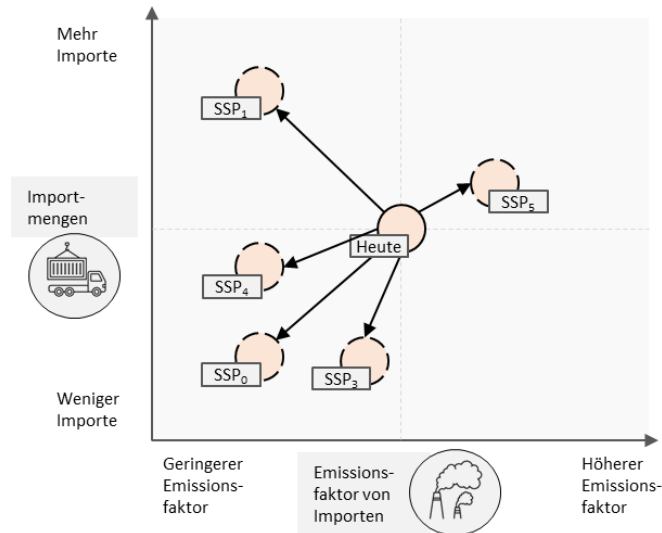
Die Quadranten in Abbildung 69 zeigen, wie sich diese Entwicklungen auf die importierten Mengen und Emissionsfaktoren der Produkte auswirken, die zusammengenommen die importierten Emissionen bestimmen:

- Quadrant links unten: Emissionen aus Importen sinken in SSP0-CH (weniger Menge, geringere Emissionsfaktoren), SSP3-CH (weniger Menge, leicht geringere Emissionsfaktoren) und SSP4-CH (weniger Menge, geringere Emissionsfaktoren).
- Quadrant rechts oben: Emissionen aus Importen steigen in SSP5-CH (höhere Emissionsfaktoren durch mehr Importe aus Herstellungsprozessen auf Basis von fossiler Energie).
- Quadrant links oben: In SSP1-CH sinken die Emissionen (höhere Importmengen, aber sinkende Emissionsfaktoren).

Daraus ergeben sich folgende Szenarien für das Import/Export-Modell (siehe Abbildung 69):

- Heute: Globalisierter Handel mit hohen Volumenen. Die Schweiz hat hohe importierte Emissionen und ist stark in den globalen Handel mit Waren und Dienstleistungen eingebunden.
- SSP0: Regionale Zusammenarbeit mit geringem Handel. Die globale wirtschaftliche Verflechtung ist aufgrund sinkender Wirtschaftsleistung und reduzierten Konsums nicht sehr ausgeprägt. Handelsbeziehungen mit Regionen ausserhalb der EU sind eher selten, unter anderem wegen der hohen Verkehrskosten.
- SSP1: Starke Handelsbeziehungen in einer multipolaren Welt. Die Schweiz pflegt enge wirtschaftliche und politische Beziehungen, insbesondere mit der EU. Auf globaler Ebene haben Konflikte abgenommen, und Länder setzen die vereinbarten Klima- und Umweltziele um.
- SSP3: Schwache Handelsbeziehungen in einer multipolaren, abgeschotteten Welt. Die EU existiert weiterhin, hat aber Mitgliedstaaten verloren. Der int. Handel und Zusammenarbeit befinden sich auf einem niedrigen Niveau. Int. Handelsabkommen wurden aufgekündigt, und int. Organisationen haben an Bedeutung verloren.
- SSP4: Handel zum Vorteil globaler Eliten in einer bipolaren Welt. Die Schweiz ist ein starkes Wirtschafts- und Finanzzentrum, Handelsbarrieren in westlichen Ländern wurden weitgehend abgebaut. Massive Zunahmen bei der Automatisierung haben zu hoher Arbeitslosigkeit geführt, die Schweizer Mittelschicht ist geschrumpft.
- SSP5: Hohe Handelsvolumen in einer bipolaren Welt. Die lokale Produktion gewährleistet ein höheres Mass an Selbstversorgung, doch die Schweiz weist aufgrund von Energieimporten ein Handelsdefizit auf. Obwohl der Wohlstand in der Schweiz zurückgegangen ist, hat sich die Präferenz für hohen Konsum nicht verändert.

Abbildung 69: Szenarien für Änderungen von Importmengen und Emissionsfaktoren pro SSP



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

10.4. Modellierung

Die Produktmengen der Zollstatistik und die Emissionsfaktoren pro Produktkategorie legen die Höhe der importierten und exportierten Emissionen der Schweiz für das Jahr 2023 fest. Die Entwicklung bis 2100 wird für jedes SSP-CH über eine Wirkungsmatrix modelliert, welche die Szenarioparameter der SSP-CH und die Modellparameter (Produktmengen und Emissionsfaktoren) miteinander koppelt (für eine allgemeine Beschreibung der SSP-CH-Wirkungsmatrix siehe Kapitel 3.2). Das folgende Kapitel erläutert die Wirkungspfade dieser SSP-CH-Wirkungsmatrix für die importierten und exportierten Emissionen. Die Emissionsentwicklungen der SSP-CH werden in einem zweiten Schritt durch die Instrumente der SPA beeinflusst.

Da der globale Kontext in diesem Sektor mit besonders hohen Unsicherheiten einhergeht, verfolgen wir einen reduzierten Modellierungsansatz. Im Unterschied zu anderen Bereichen werden hier bewusst weniger Einflussfaktoren berücksichtigt.

10.4.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Die Szenarioparameter der SSP-CH beeinflussen über die folgenden Wirkungspfade die importierten und exportierten Mengen sowie die Emissionsfaktoren der Produktkategorien (siehe Tabelle 31).

Importierte und exportierte Produktmengen

Erster Wirkungspfad: Die Szenarioparameter «Wohnbevölkerung» und «Individuelles Konsumniveau» bestimmen die generelle inländische Nachfrage an Gütern (d.h. wie viele Personen wie viele Güter nachfragen). Da wir die Annahme treffen, dass sich die Nachfrage im In- und Ausland gleich entwickelt, sind diese beiden Szenarioparameter sowohl mit den Importmengen als auch mit den Exportmengen gekoppelt.

Zweiter Wirkungspfad: Die Szenarioparameter «Importanteil» und «Exportanteil» beschreiben pro SSP-CH, ob die inländische Nachfrage durch inländische Produktion oder durch Importe gedeckt wird, respektive ob sich die inländische Produktion auf Export ausrichtet. Ihre Entwicklung ist ein Mass für den Selbstversorgungsgrad der Schweiz. Entwickeln sich die Trends dieser Szenarioparameter in einem SSP-CH unterschiedlich, verschiebt sich das derzeitige Verhältnis der Importmengen zu den Exportmengen.

Bei der Entwicklung der Produktmengen differenzieren wir die Wirkungspfade nicht zwischen einzelnen Produktkategorien. Erhöht sich beispielsweise die Wohnbevölkerung um 10%, erhöhen sich die Importmengen aller Produktkategorien um 10%. Wir treffen also zur Vereinfachung die Annahme, dass es keine Änderungen der Anteile der Produktkategorien gibt, die importiert bzw. exportiert werden.

Emissionsfaktoren

Dritter und vierter Wirkungspfad: Die relative Entwicklung der Emissionsfaktoren von 2023 bis 2100 pro SSP-CH übernehmen wir aus dem Modell des Industriesektors (siehe Kapitel 6). Das heisst, wir übernehmen nicht die absoluten Emissionsfaktoren des Industriemodells, sondern nur ihre Veränderungen gegenüber heute. Für die Exporte haben wir die Entwicklung der Emissionsfaktoren aus dem Industriemodell direkt übernommen. Für die Importe nehmen wir an, dass sich die Emissionsfaktoren im Ausland langsamer reduzieren als in der Schweiz und modellieren deren Entwicklung daher mit einer Verzögerung von fünf Jahren gegenüber der Schweizer Entwicklung. Der Grund für diese Annahme ist, dass wir davon ausgehen, dass die Produktion in der Schweiz treibhausgas-effizienter bleibt als im globalen Mittel.

Die Ausgangswerte der Emissionsfaktoren der Importe und Exporte stammen aus EBP 2022. Der Industriesektor hat Trends für die Emissionsfaktoren der drei Branchen «Grundstoffe/Baustoffe», «Weiterverarbeitete Güter» und «Konsumgüter». Um diese Entwicklung auf die Emissionsfaktoren der Importe und Exporte zu übertragen, haben wir jede Produktkategorie aus der Zollstatistik einer dieser drei Branchen zugeordnet:

- Der Branche «Grundstoffe/Baustoffe»: Grundstoffchemikalien, Metalle (u.a. Stahl) und Mineralien,

- der Branche «Weiterverarbeitete Güter»: Chemie- und Pharmaprodukte, Maschinen und Geräte und
- der Branche «Konsumgütern» Nahrungsmittel und Textilien

Für Details siehe Tabelle 36 im Anhang A2

Tabelle 31: Qualitative Übersicht SSP-Wirkungspfade der Importe und Exporte

Modellparameter	Importmenge	Exportmenge	Emissionsfaktoren Importe	Emissionsfaktoren Exporte
Szenarioparameter				
Wohnbevölkerung		+		
Individuelles Konsumniveau		+		
Importanteil	+			
Exportanteil		+		
Modellparameter aus Industriemodell: Emissionsfaktoren*			+	+

Ein «+» bedeutet eine positive Elastizität zwischen Szenario- und Modellparameter.

*Die Emissionsfaktoren sind ein Modellparameter aus dem Industriesektor und werden von dort als Input in das Import- und Export-Modell übernommen.

Die Entwicklung der Emissionsfaktoren für das Ausland haben wir im Vergleich zur Schweiz mit einer fünfjährigen Verzögerung versehen, unter der Annahme, dass sich Emissionsfaktoren in der Schweiz im Vergleich zum durchschnittlichen Ausland schneller ändern.

Tabelle INFRAS.

10.4.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Die in Kapitel 2.2 eingeführten Shared Policy Assumptions (SPA) ergänzen die Entwicklungspfade der SSP-CH um politische Instrumente, welche die Entwicklung der importierten und exportierten Emissionen beeinflussen. Folgende Instrumente im Bereich Handel, Konsumverhalten und Kreislaufwirtschaft beeinflussen die Höhe der Importmengen und der Exportmengen:

- Handelspolitik (z.B. Handelsabkommen, Zölle, Importverbote): Eine protektionistische Handelspolitik kann Importe einschränken und die Produktion im Inland fördern, wodurch sich die Importmengen verringern und Exportmengen – je nach Zugang zu Auslandsmärkten – ebenfalls beeinflusst werden können.
- Förderung regionaler Produktion / Selbstversorgung: Instrumente zur Stärkung lokaler Wertschöpfungsketten verringern die Abhängigkeit von Importen.

- Instrumente zur Reduktion des Konsums (z.B. Umweltabgaben, Verhaltensanreize): Durch eine gezielte Reduktion des individuellen Konsumniveaus kann die Gesamtnachfrage nach Gütern gesenkt werden, was sich gleichermaßen auf inländische Produktion, Importe und Exporte auswirkt.

Die Emissionsfaktoren der importierten und exportierten Produkte werden durch Politikinstrumente beeinflusst, die auf die Produktionsbedingungen im Inland und Ausland abzielen:

- Nachhaltigkeitsstandards, Produktnormen, CO₂-Zollaufschläge: Die Einführung von Emissionsgrenzwerten für importierte Produkte oder CO₂-Grenzausgleichsmechanismen kann dazu führen, dass der Emissionsfaktor importierter Produkte im Schnitt sinkt.
- Exportförderung emissionsarmer Technologien: Instrumente, welche die Produktion und den Export klimafreundlicher Produkte begünstigen, senken die Emissionsfaktoren der Exporte.
- Technologiekoooperation und Entwicklungshilfe: Instrumente zur Unterstützung emissionsarmer Produktionsweisen in Exportländern (z.B. durch Technologietransfer) können mittelfristig auch die Emissionsfaktoren von Importprodukten senken – abhängig von der Ambition und Umsetzungszeit.

Neben den vier inländischen SPA führen wir auch noch zwei ausländische SPA ein (SPA Ausland). Diese verändern die Emissionsfaktoren der Importe. Aus der Perspektive der Schweiz bedeutet dies, dass die Emissionsfaktoren der Importe zusätzlich zu den Schweizer Klimainstrumenten auch durch die Rahmenbedingungen und Umweltstandards der Exportländer bestimmt werden. Die Menge an Importen und Exporten wird hingegen nicht durch die beiden SPA Ausland beeinflusst, sondern ausschliesslich durch die schweizerische Handelspolitik.

Tabelle 32: SPA Importe und Exporte: Instrumente und Wirkungen

Instrumente	Einführung ab	Instrumententyp	Wirkung	Gesamtwirkung SPA
SPA0: Status Quo				
Primär Instrumente, welche auf Nachfrage im Inland abzielen: Produktstandards	-	Autorität	Import-/Exportmengen: tief Emissionsfaktoren: Mittel	
SPA1: Grüner Staat				
Einführung nachhaltiger Produktnormen	2023	Autorität	Abnahme Emissionsfaktoren Importe und Exporte	Import-/Exportmengen: sehr hoch Emissionsfaktoren: sehr hoch
Einführung eines CO ₂ -Grenzausgleichs (CBAM)	2023	Autorität	Abnahme Importmengen Abnahme Emissionsfaktoren Importe	
Förderung regionaler Produkte	2023	Finanzen	Abnahme Importmengen	
SPA2: Ökologische Republik				
Anreize für Kreislaufwirtschaft	2023	Information	Abnahme Import- und Exportmengen	Import-/Exportmengen: mittel Emissionsfaktoren: mittel
Einführung eines CO ₂ -Grenzausgleichs	2023	Autorität	Abnahme Emissionsfaktoren Importe	
Anreize für suffizienten Konsum	2023	Information	Abnahme Importmengen Konsumgüter	
SPA3: Ordoliberaler Staat				
Ökologische Konditionalität in Handelsabkommen abschaffen	2023	Autorität	Zunahme Emissionsfaktoren	Import-/Exportmengen: tief Emissionsfaktoren: tief
Neue Freihandelsabkommen	2023	Autorität	Zunahme Import- und Exportmengen	
SPA4: Kompensierender Staat				
Neue Freihandelsabkommen	2023	Autorität	Import-/Exportmengen: tief Emissionsfaktoren: keine	
SPA1 Ausland: Grüner Staat im Ausland				
Einführung nachhaltiger Produktnormen	2023	Autorität	Import-/Exportmengen: keine Emissionsfaktoren: hoch	
SPA4 Ausland: Kompensierender Staat im Ausland				
Abschaffung nachhaltiger Produktnormen	2023	Autorität	Import-/Exportmengen: keine Emissionsfaktoren: hoch	

Tabelle INFRAS.

10.5. Ergebnisse und Diskussion

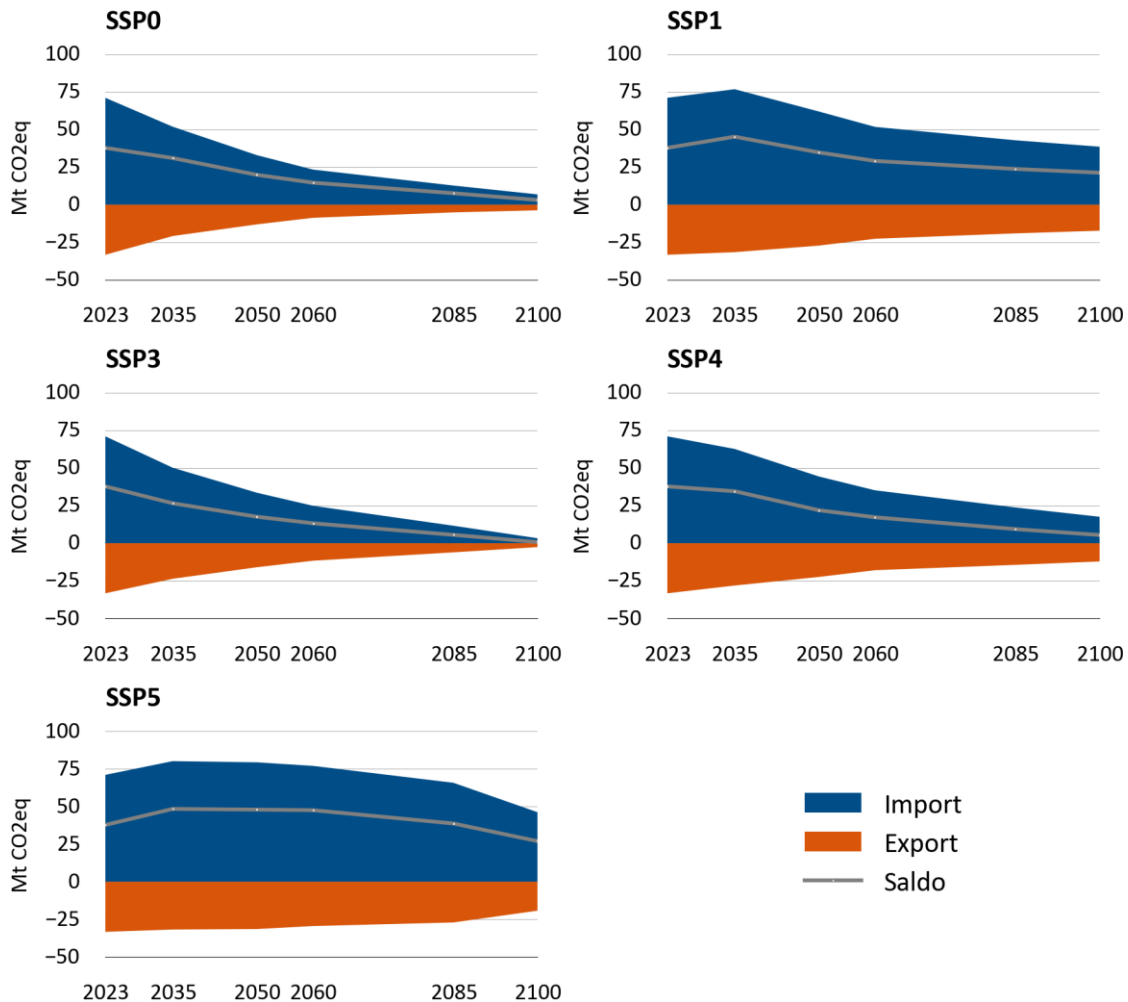
10.5.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Abbildung 71 zeigt die Entwicklung der Emissionen aus dem Import und Export von 2023 bis 2100 für die fünf SSP-CH. Alle zeigen bis zum Ende des Jahrhunderts eine abnehmende Tendenz bei den importbedingten Emissionen. In vier Szenarien ist dieser Rückgang deutlich (SSP0-CH, SSP1-CH, SSP3-CH, SSP4-CH), während SSP5-CH ein teils stagnierendes Niveau aufweist. Die Exporte zeigen — gespiegelt — einen ähnlichen Verlauf auf kleinerem Niveau. Der Emissionsaldo bleibt daher in allen Szenarien bis etwa zur Mitte des Jahrhunderts positiv, d.h. die Schweiz verursacht durch Importe tendenziell mehr Emissionen im Ausland, als exportiert werden.

Konkret haben die Szenarien folgende Eigenschaften:

- SSP0-CH: Dieses Szenario zeigt den deutlichsten Rückgang der importbedingten Emissionen. Bereits ab 2035 sinken die Nettoimporte von Emissionen signifikant, dank geringerem Importvolumen und sinkendem Emissionsfaktor. Im Jahr 2100 liegen die Nettoimportemissionen nahe null.
- SSP1-CH: Auch dieses Szenario weist nach einem Anstieg bis 2035 einen kontinuierlichen Rückgang der Importemissionen auf, jedoch auf einem hohen Niveau. Die Schweiz konsumiert weiterhin importierte Güter – allerdings mit sinkenden Emissionsfaktoren.
- SSP3-CH: Trotz insgesamt geringem Umweltbewusstsein und schwacher globaler Kooperation sinken die importbedingten Emissionen langfristig ebenfalls, vor allem aufgrund eines geringeren Importvolumens.
- SSP4-CH: Die Entwicklung ähnelt jener von SSP1-CH. Auch hier kommt es zu einer signifikanten Reduktion der importbedingten Emissionen, getragen durch technologische Innovation und zunehmende Elektrifizierung in den Produktionsketten, aber auch durch eine Reduktion des Konsums, da eine breite Bevölkerungsschicht in diesem Szenario Einkommensverluste zu verzeichnen hat.
- SSP5-CH: Dieses Szenario zeigt im Vergleich zu allen anderen eine gegenläufige Entwicklung: Die importbedingten Emissionen bleiben hoch und nehmen über weite Strecken sogar leicht zu. Der Rückgang zum Ende des Jahrhunderts liegt primär am Rückgang der Wirtschaftsleistung in diesem Szenario. Die importierten Emissionen bleiben bis 2100 deutlich positiv.

Abbildung 70: Emissionen Importe und Exporte



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Im Vergleich zum durch das BAFU errechneten Treibhausgasfussabdruck (THGF) sind diese Werte leicht geringer (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2025b). Verschiedene Unterschiede können diese leichten Unterschiede erklären. So nutzt das BAFU die Methode der Environmentally Extended Input Output Analyse, nicht den hier genutzten Ansatz der Ökobilanzkoeffizienten. In einem Vergleich verschiedener Methoden kommt der Ansatz der Ökobilanzkoeffizienten auf einen leicht tieferen Wert für THGF (siehe Methodenbericht des BFS¹⁰²). Ausserdem berücksichtigt unser Ansatz im Vergleich zum THGF Dienstleistungen und Tourismus im Ausland (Dienstleistung, Verpflegung) nicht.

¹⁰² Siehe <https://www.bfs.admin.ch/bfsstatic/dam/assets/4322942/master>

Diskussion der Einflussfaktoren

Die dargestellte Abnahme der importbedingten Emissionen in den meisten SSP-CH lässt sich durch zwei zentrale Annahmen in den Wirkmechanismen erklären: (1) die Entwicklung der Emissionsfaktoren der importierten Güter, und (2) die Entwicklung der Importmenge und Exportmengen.

Zur Einordnung der Emissionsfaktoren ist zu beachten, dass sich deren Entwicklung aus der Modellierung des Industriesektors ergibt (siehe Annahmen zur Entwicklung der Emissionsfaktoren im Industriemodell, Kapitel 6) und sich auf drei Produktgruppen bezieht: Grundstoffe/Baustoffe, weiterverarbeitete Güter und Konsumgüter.

Grundstoffe/Baustoffe: In dieser Produktgruppe bleiben die Emissionsfaktoren auf einem hohen Niveau. In einzelnen Szenarien, wie etwa SSP5-CH, ist bis etwa 2040 sogar ein Anstieg zu beobachten. Erst ab der Mitte des Jahrhunderts setzen allmählich Reduktionen ein, wobei insbesondere SSP0-CH und SSP1-CH die deutlichsten Rückgänge verzeichnen. Diese Entwicklung ist auf die schleppende technologische Transformation in der energieintensiven Grundstoffproduktion und auf begrenzte Möglichkeiten zur Dekarbonisierung zurückzuführen.

Weiterverarbeitete Güter: Hier ist ein deutlich stärkerer Rückgang der Emissionsfaktoren zu verzeichnen. In mehreren Szenarien – vor allem SSP0-CH, SSP1-CH und SSP3-CH – halbieren oder dritteln sich die Emissionsfaktoren zwischen 2040 und 2100. Diese Entwicklung spiegelt die Fortschritte wider, die in der Modellierung des Industriesektors hinsichtlich Effizienz und technologischem Wandel angenommen wurden.

Konsumgüter: Alle SSP-CH-Szenarien weisen in dieser Produktgruppe eine ausgeprägte Abnahme der Emissionsfaktoren auf. Bis zum Jahr 2100 sinkt die CO₂-Intensität auf unter 20 % des Ausgangsniveaus. Besonders ausgeprägt ist dieser Rückgang in den Szenarien SSP0-CH, SSP1-CH und SSP4-CH, wo frühzeitig auf emissionsarme Produktions- und Konsummuster gesetzt wird.

Abbildung 71 zeigt die normierte Entwicklung der Exportmengen und Importmengen der SSP-CH, welche sich beide in den Szenarien stark unterscheiden. Die Entwicklung der Importmengen ist wie folgt:

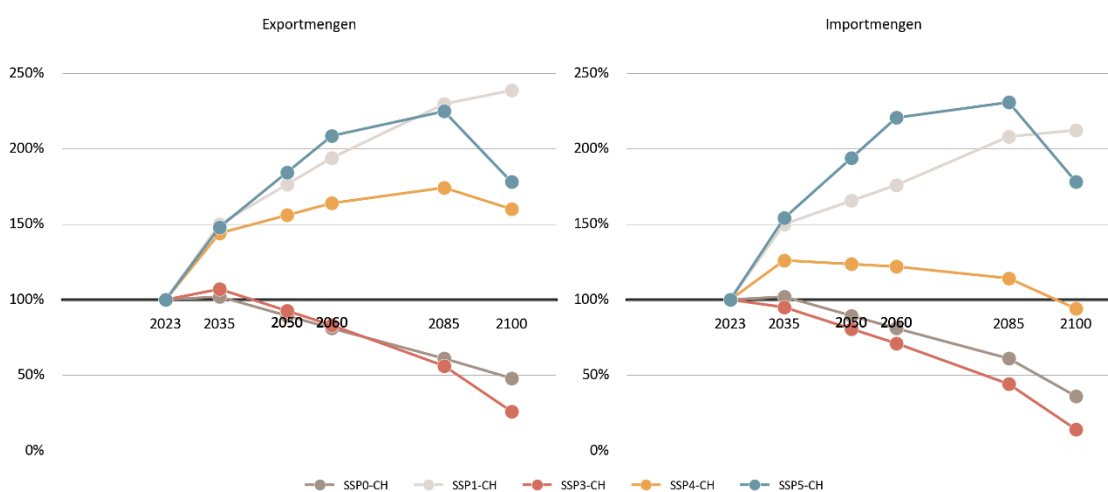
- In SSP0-CH und SSP3-CH sinken die Importmengen deutlich (bis zu -60 % im Jahr 2100). Ursache sind eine genügsame Lebensweise (SSP0-CH) bzw. Abnahme der Kaufkraft weiter Teile der Bevölkerung (SSP3-CH).
- In SSP1-CH steigen die Importe bis 2085 um über 200 % und stabilisieren sich auf hohem Niveau. Die Schweiz bleibt wirtschaftlich stark eingebunden.
- SSP4-CH steigen die Importmengen nur leicht (um ca. 25%), das Wachstum bleibt dann konstant auf tiefem Niveau.

- SSP5-CH zeigt ein langfristig stark wachsendes Importvolumen mit einem Wachstum um knapp 240%, welches gegen 2100 wieder sinkt. Gleichzeitig bleiben die Emissionsfaktoren höher als in den anderen SSP-CH.

Die Entwicklung der Exportmengen ist wie folgt:

- SSP0-CH und SSP3-CH zeigen langfristig sinkende Exporte aufgrund schwacher wirtschaftlicher Dynamik.
- SSP1-CH und SSP5-CH verzeichnen eine starke Zunahme der Exporte bis zur Jahrhundertmitte, was auf technologische Stärke und Wettbewerbsfähigkeit des Schweizer Standorts bzw. globalisierte Nachfrage zurückzuführen ist.
- In SSP4-CH steigen die Exporte moderat, wobei der Effekt globaler Ungleichheiten für ein asymmetrisches Wachstum sorgt.

Abbildung 71: Relative Entwicklung der Import- und Exportmengen (Startpunkt: 2023)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Die Abnahme der importbedingten Emissionen ist somit in SSP0-CH und SSP1-CH primär durch schnell sinkende Emissionsfaktoren und in SSP0-CH zusätzlich durch reduziertes Importvolumen getrieben. In SSP3-CH dominiert der Rückgang des Handelsvolumens, während die Emissionsfaktoren weniger stark sinken. SSP4-CH vereint moderate Beiträge beider Faktoren. Im Gegensatz dazu kombiniert sich in SSP5-CH das stark steigende Handelsvolumen mit (nur teilweise) sinkenden Emissionsfaktoren – was zu einem konstanten Emissionsniveau führt.

10.5.2. Klimapolitische Instrumente (SPA) in Kombination mit SSP-CH

Die Berücksichtigung klimapolitischer Handelsinstrumente (SPA) führt zu einer sichtbaren Veränderung der importierten Emissionen in den oben betrachteten SSP-CH. Abbildung 10 zeigt den Einfluss der SPA in Kombination mit den SSP-CH. Die Einfärbung erlaubt eine Differenzierung zwischen den Szenarien ohne SPA (hellere Farben) und mit SPA (dunklere Farben). Die Darstellung der Wirkung der SPA ist daher anders gewählt als in den anderen Sektoren. Die Ergebnisse zeigen Folgendes:

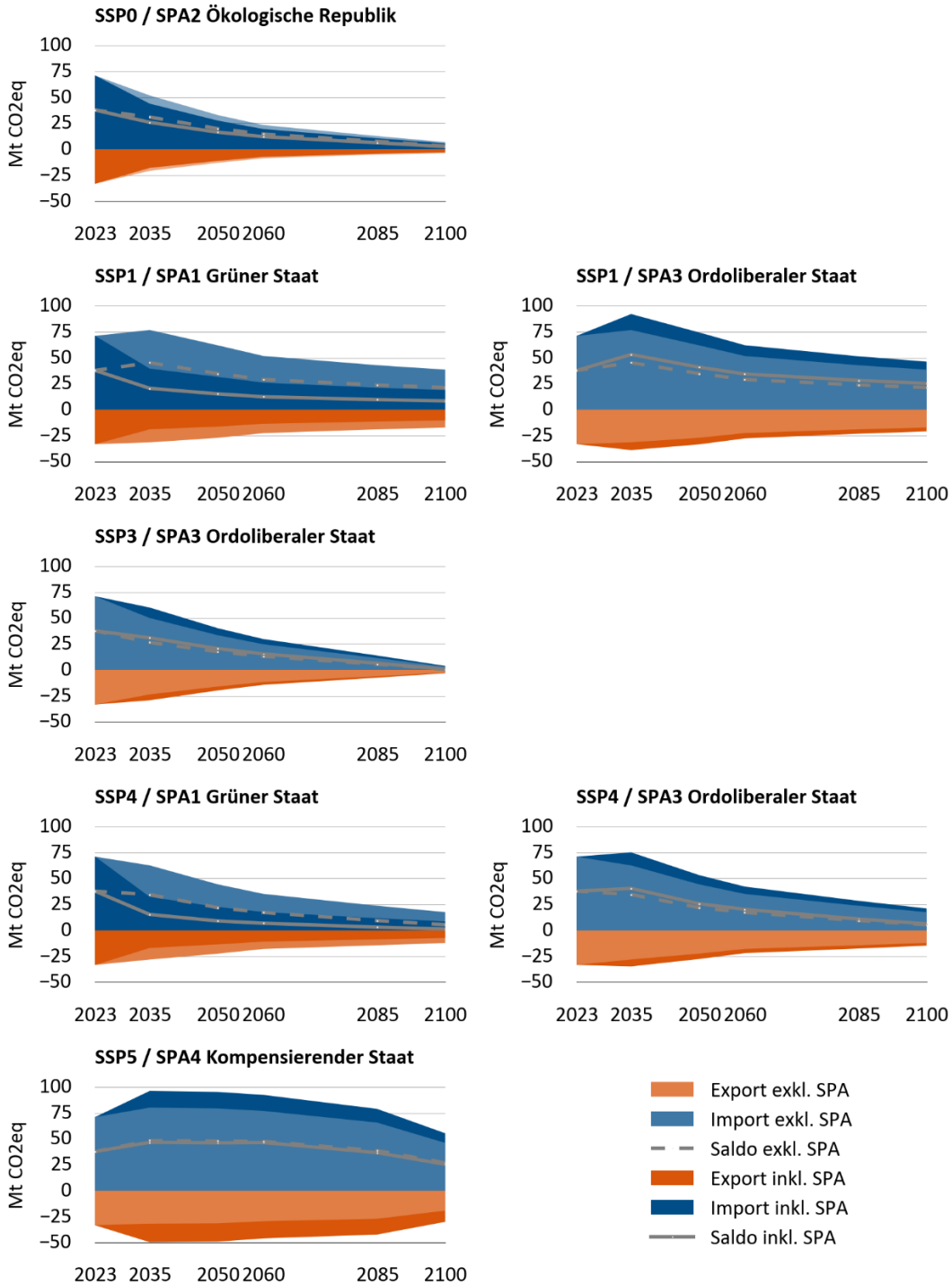
- SSP0-CH / SPA2 (Ökologische Republik): Die importbedingten Emissionen sinken bereits im SSP0-CH stark, werden aber durch SPA2 weiter reduziert, u. a. durch strenge Importregulierungen und ambitionierte CO₂-Grenzwerte für importierte Güter.
- SSP1-CH / SPA1 und SSP4-CH / SPA1 (Grüner Staat): Der zusätzliche Effekt durch SPA1 ist im Vergleich zu SSP0-CH / SPA2 geringer, da bereits im SSP-CH kaum noch CO₂-intensive Produkte importiert werden. SPA1 wirkt hauptsächlich zeitlich beschleunigend.
- SSP1-CH / SPA3 und SSP4-CH / SPA3 (Ordoliberaler Staat): In diesen Kombinationen führen marktorientierte Instrumente (z. B. Liberalisierung des Handels) zu einer Abschwächung der Reduktion importierter Emissionen. In SSP1-CH / SPA3 steigt das Importvolumen sogar kurzfristig an, was sich in stagnierenden oder nur langsam sinkenden Emissionen zeigt.
- SSP3-CH / SPA3 (Ordoliberaler Staat): Dieses Szenario zeigt die geringste Veränderung gegenüber der reinen SSP3-CH Modellierung. Sowohl das SSP3-CH als auch das SPA3 fördern keinen strukturellen Wandel im Handel, wodurch die Emissionen nur moderat abnehmen.
- SSP5-CH / SPA4 (Kompensierender Staat): Die Kombination führt zu einem der höchsten Emissionsniveaus über den betrachteten Zeitraum. Die kompensierende Politik erlaubt hohe Emissionswerte bei gleichzeitigem Wachstum des Konsums. Trotz Effizienzsteigerungen in Produktionsländern steigen die absoluten Importemissionen.

Die SPA können importbedingte Emissionen substantiell beeinflussen – insbesondere über Regulierungen der Emissionsfaktoren der Importe (z.B. Verbot CO₂-intensiver Produkte), aber auch durch Effekte auf die Handelsvolumina CO₂-intensiver Produkte. In Szenarien mit hoher ökologischer Ambition (SSP0-CH, SSP1-CH) wirken die SPA v. a. beschleunigend oder stabilisierend. In weniger ambitionierten Szenarien (SSP3-CH, SSP5-CH) führen die SPA zu einer Verstärkung oder gar Zunahme der importbedingten Emissionen. Damit zeigen sich die SPA als entscheidender Hebel zur Steuerung von Emissionen, welche die Schweiz durch internationalen Handel in das Ausland verlagert.

Die Ergebnisse der SPA Ausland sind kein Fokus dieser Studie. Grob lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen. SPA1 Ausland (Grüner Staat) führt durch die Einführung nachhaltiger Produktnormen zu einer deutlichen Reduktion der Emissionsfaktoren der in die

Schweiz importierten Güter. Dies kann die importbedingten Emissionen der Schweiz indirekt senken – selbst in Abwesenheit eigener Regulierungen auf Schweizer Seite. Im Gegensatz dazu bewirkt SPA4 Ausland (Kompensierender Staat) durch die Abschaffung solcher Normen oder anderer Massnahmen eine Stagnation oder nur geringe Reduktion der Emissionsfaktoren, was den Effekt nationaler Schweizer Massnahmen abschwächen oder verzögern kann. Somit ist auch die internationale Klimapolitik ein relevanter Faktor für die Wirksamkeit nationaler Strategien zur Reduktion von importierten Emissionen.

Abbildung 72: Emissionen Importe und Exporte pro SSP-CH inklusive SPA



Hinweis: Die Flächen sind überlappend zu interpretieren. Beispielsweise demonstriert die dunkelblaue Fläche bei der Grafik zu SSP5 / SPA4, welche Emissionen durch Berücksichtigung von SPA4 zu denen von SSP5 (hellblau) hinzukommen. Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

11. CCS und Negativemissionstechnologien

11.1. Begriffserklärung

Der Bereich CCS («Carbon Capture and Storage») und Negativemissionstechnologien (NET) bildet keinen eigenständigen Sektor wie beispielsweise die Sektoren Gebäude oder Industrie. Es handelt sich um Verfahren, bzw. Prozesse, bei denen CO₂ aus der Atmosphäre entfernt oder mit denen verhindert wird, dass erzeugtes CO₂ in die Atmosphäre entweicht. Aus heutiger Sicht ist in der Schweiz zur Erreichung von ambitionierten THG-Reduktionszielen (v.a. Netto-Null) neben anderer inländischer Emissionsvermeidung auch der Einsatz von Kohlenstoffdioxidabscheidung und -Speicherung (Carbon Capture and Storage, CCS) und Negativemissionstechnologien (NET) notwendig.

Als NET werden Aktivitäten zusammengefasst, die CO₂ aus der Atmosphäre entfernen und es dauerhaft in geologischen, terrestrischen oder ozeanischen Reservoirs speichern.¹⁰³ Dies beinhaltet die Verbesserung von biologischen oder geochemischen Senken und die direkte Abscheidung aus der Luft, verbunden mit permanenter Speicherung (Direct Air Carbon Capture and Storage DACCS). NET schliesst die natürliche CO₂-Aufnahme aus, die nicht direkt durch menschliche Eingriffe verursacht wird (Prognos 2021, ETH 2022).¹⁰⁴

CCS ist ein technischer Prozess, bei dem ein CO₂-Abgasstrom aus industriellen und energiebezogenen Quellen abgeschieden, komprimiert und zu einem Speicherort transportiert wird, um ihn langfristig von der Atmosphäre zu isolieren. CCS ist in erster Linie eine Option zur Vermeidung von CO₂-Emissionen.¹⁰⁵ Stammt der Kohlenstoff im Abgasstrom aus geeigneten biogenen Quellen, können bei einer permanenten Speicherung aber auch negative CO₂-Emissionen erzeugt werden (Bio Energy Carbon Capture and Storage BECCS).

Wird das abgeschiedene CO₂ nicht geologisch gespeichert, sondern zur Herstellung von Produkten oder Energieträgern verwendet, wird von Carbon Capture and Utilization (CCU) gesprochen. CCU führt nicht zu negativen CO₂-Emissionen, da das abgeschiedene und in den kurzlebigen Produkten oder Energieträgern gespeicherte CO₂ bei der Nutzung wieder in die Atmosphäre gelangt. Ein Beispiel für CCU sind synthetische Kraftstoffe.

11.2. Modellbeschreibung

In diesem Projekt betrachten wir zur Vereinfachung im Inland lediglich die Abscheidung von CO₂ durch CCS. Dabei unterscheiden wir zwischen biogenem CO₂ und fossilem CO₂. Die

¹⁰³ Manche Akteure definieren auch die Speicherung in langfristigen Produkten als NET.

¹⁰⁴ Ausgeschlossen sind z.B. die Erhöhung von Kohlenstoffsinken der Biosphäre, beispielsweise die Aufnahme von CO₂ durch die Gewässer.

¹⁰⁵ CCS ist eine sogenannte End-of-Pipe-Lösung. Dies sind Klimaschutzmassnahmen, die den Produktionsprozess selbst nicht verändern, sondern im Nachgang die Umweltbelastung verringern.

Abscheidung von biogenem CO₂ wird als negative Treibhausgasemission angerechnet und ist somit eine NET. Die Abscheidung von fossilem CO₂ führt hingegen nicht zu negativen Emissionen, sondern reduziert die Emissionen. Weitere (technische) NET-Massnahmen, wie beispielsweise Aufforstung oder die Herstellung von Pflanzenkohle, werden nicht betrachtet. Diese Massnahmen dürften in der Schweiz von untergeordneter Bedeutung bleiben (u.a. aufgrund der begrenzten Flächen für Aufforstung, sowie begrenzter geeigneter Biomassepotenziale für Pflanzenkohle).¹⁰⁶

Abscheidung von CO₂ ist dort am wahrscheinlichsten, wo sich konzentrierte CO₂-Ströme finden und wo sich die Treibhausgasemissionen nur schwer vermeiden lassen. Dies betrifft einerseits den Sektor Energiewirtschaft. Hier sind sowohl Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) als auch reine Biomasse-Kraftwerke mit CCS (BECCS) relevant. Andererseits betrifft es den Sektor Industrie. Dort ist vor allem die Zementherstellung relevant, aber in geringem Umfang auch andere Industrien (siehe Kapitel 6.2). Ein Teil der Emissionen aus diesen grossen Punktquellen ist fossilen bzw. geogenen Ursprungs. Der biogene Anteil im Kehrlicht sowie biogene Energieträger in der Industrie sind jedoch biogen Ursprungs, so dass deren Abscheidung eine NET darstellt.¹⁰⁷ In diesem Kapitel berücksichtigen wir daher Industrie (fossil) und Energiewirtschaft (fossil) als CCS-Optionen, sowie Industrie (biogen) und Energiewirtschaft (biogen) als NET im Inland. Wir gehen nicht davon aus, dass DACCS¹⁰⁸ im Inland stattfindet.

Auch nach dem Einsatz von CCS und NET im Inland verbleiben in jedem Szenario Netto-Restemissionen. Wir berücksichtigen daher NET im Ausland, wobei wir weder die Technik noch das Herkunftsland näher spezifizieren. Dieses NET im Ausland wird in der THG-Bilanz erfasst und ausgewiesen. Der Betrieb der ausländischen NET-Anlagen hat aber keinen Effekt auf den Energieverbrauch in der Schweiz und beeinflusst somit nicht die Modellierung des Sektors Energiewirtschaft. Auch die Kosten für den Kauf von negativen Emissionen aus dem NET-Anlagen im Ausland (z.B. via Zertifikate) fliessen nicht in unser Modell ein, da wir keine Kosten modellieren.

¹⁰⁶ Denkbar wäre die Umnutzung von Flächen zu Nahrungsmittelproduktion (Weiden, Ackerbau) zur Vergrösserung der Waldflächen. Diese Effekte konnten im Rahmen dieser Arbeit nicht abgeschätzt werden und sind hier unberücksichtigt.

¹⁰⁷ Inwiefern das Abscheiden des biogenen Anteils von Abfällen tatsächlich zu zeitnahen negativen Emissionen führt (so wie hier ausgewiesen), hängt unter anderem davon ab, wann die Biomasse das CO₂ ursprünglich aus der Atmosphäre aufgenommen hat. Solche Aspekte vertiefen wir hier allerdings nicht weiter.

¹⁰⁸ Da DAC sehr viel Energie benötigt, sind Standorte mit günstigen Bedingungen für erneuerbare Stromproduktion vorteilhaft. Vorteilhaft ist auch eine Nähe zu geologischen Speicherstätten, da dies die Transportkosten verringert. Beides ist in der Schweiz nicht gegeben. Die ersten Pilotprojekte finden daher im Ausland statt (z.B. auf Island durch Climeworks).

Box: Methanemissionen und Netto-Null

Im Sektor Landwirtschaft — im Gegensatz zu den anderen Sektoren — ist nicht CO₂ sondern Methan das dominierende Treibhausgas. Gemäss der gängigen Praxis rechnen wir diese Emissionen mittels eines fixen Faktors (GWP-Wert) in CO₂ Äquivalente (CO₂eq) um, sodass die positiven Emissionen mit den negativen CO₂-Emissionen verrechnet werden können. Diese Methode zur Berechnung der Netto-Emissionen inklusive der Methanemission ist klimawissenschaftlich inkorrekt, weil das Netto-Null-Konzept nur für langlebiges CO₂ konzipiert wurde, aber nicht für das in der Atmosphäre kurzlebige Methan (Allen et al. 2021; Neu 2022). Da diese Methode gängig ist, verwenden wir sie trotzdem. Besser wäre es allerdings, die Emissionen von Methan separat zu behandeln und auszuweisen.

11.3. Bestehende Arbeit und Daten

Annahmen zu Abscheideraten (Abscheideeffizienz) und Energieaufwand je abgeschiedener Einheit CO₂ für CCS und NET basieren auf dem technischen Bericht zu den Szenarien der Energieperspektiven 2050+ und dem Exkurs «Negativemissionstechnologien und CCS – Potenziale, Kosten und Einsatz» (Prognos, 2021). Wir berücksichtigen zudem die Studie «Carbon capture, transport and storage».¹⁰⁹

11.4. Beschreibung Szenarien für CCS und NET

11.4.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Aktuell gibt es in der Schweiz Machbarkeitsstudien sowie Planungen für Pilotprojekte von CCS-Anlagen, beispielsweise für die ARA in Zürich, für ein Holzkraftwerk in Basel oder die KVA in Linth.¹¹⁰ Es besteht auch eine Zielvereinbarung mit dem Verband der Abfallverwertungsanlagen (KVA) in Bezug auf die Einführung von CCS. Inwieweit diese Ansätze und Absichten zu einem signifikanten Einsatz von CCS führen, ist unsicher.

Da der Einsatz von CCS zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen oder der Erzeugung von Negativemissionen mit Mehrkosten verbunden ist, gehen wir nicht davon aus, dass diese Technologien autonom, respektive nicht ohne Anreize in grösserem Umfang zum Einsatz kommen. Bei der Modellierung der SSP-CH in Kombination mit SPA0 gehen wir daher davon aus, dass CCS nicht eingesetzt wird. Daher spielen weder CCS noch NET in den SSPs-CH eine Rolle,

¹⁰⁹ Carbon capture, transport and storage - Technology descriptions and projections for long-term energy system planning. [technology data for carbon capture transport and storage 0.pdf](#)

¹¹⁰ <https://netto-null-cockpit.stadt-zuerich.ch/bereiche/entsorgung/co2-entnahme-und-speicherung>
<https://www.datocms-assets.com/134367/1740644442-cst218-abschlussbericht-ccs-pilotprojekt-basel-100.pdf>
<https://www.kva-linth.ch/energie-umwelt/ccs>

weder im Inland noch im Ausland.¹¹¹ CCS und NET sind daher ausschliesslich in den SPA abgedeckt.

11.4.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Im Folgenden sind die SPA hinsichtlich des Einsatzes von CCS und NET beschrieben. Nur in SPA1 und SPA2 werden diese in grösserem Umfang eingesetzt.

SPA 0 – Status Quo

Aktuell wird in der Schweiz mit Ausnahme erster Demonstrationsanlagen noch kein CO₂ mittels CCS abgetrennt und gespeichert. Es werden daher auch keine negativen Emissionen erzeugt. Die schweizerische Klimapolitik diskutiert und anerkennt unter dem Status Quo aber grundsätzlich die Notwendigkeit von CCS und NET für die Erreichung des Klimaziels netto null.¹¹² Die Technologien finden Eingang in Klimastrategien. Machbarkeitsstudien und Pilotprojekte werden teilweise gefördert. Es besteht auch eine Zielvereinbarung mit dem Verband der Abfallverwertungsanlagen (KVA) in Bezug auf die Einführung von CCS. Es bestehen Absichtserklärungen, aber noch keine konkreten politischen Instrumente mit grosser Wirkung oder finanziellen Verpflichtungen. Lediglich erste kleine Pilotprojekte werden finanziert. Daher beinhaltet SPA0 keine Verpflichtung zur Einführung von CCS oder NET und es gibt auch keine verbindlichen Beschlüsse für den Aufbau einer CO₂-Infrastruktur.

SPA1 – Grüner Staat

Die schweizerische Klimapolitik verfolgt eine konsequente Erreichung des Netto-Null-Ziels. Es wird ein rechtlicher Rahmen für den sicheren Verkehr und die geologische Speicherung von Kohlendioxid erlassen und eine grossflächige CO₂-Transportinfrastruktur aufgebaut (Pipeline). Die Finanzierung der Infrastruktur erfolgt durch eine Teilzweckbindung von Einnahmen aus der Kohlenstoff-Bepreisung. Industrielle Anlagen mit schwer vermeidbaren Treibhausgasemissionen sowie KVA werden zum Einbau von Carbon-Capture-Anlagen verpflichtet. Die Reduktionsziele des Emissionshandelssystems werden konsequent umgesetzt.

Bis 2050 muss das Netto-Null-Ziel erreicht werden – verbleibende inländische Restemissionen müssen über Negativemissionen kompensiert werden (ohne Berücksichtigung des internationalen Flugverkehrs). Nach 2050 werden die Reduktionsziele weiter verschärft und ab 2060 werden insgesamt bzw. bilanziell negative Treibhausgasemissionen erzeugt (Netto-Negativ). Bis zum Jahr 2085 steigen die netto-negativen Treibhausgasemissionen auf 10 Mio. tCO₂. Die NET

¹¹¹ Das Schweizer Emissionshandelssystem für Grosse mittlere wie Zement und Stahl sieht einen Zielpfad vor, der langfristig (d.h. ab 2040) wohl nur mit dem Einsatz von CCS erreicht werden kann, wenn die jetzigen Ziele beibehalten werden. Wir haben diese langfristigen Ziele allerdings nicht in das SPA0 übernommen (siehe Beschreibung in Kapitel 11.4)

¹¹² <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/71551.pdf>

zur Erzeugung dieser negativen Treibhausgasemissionen werden prioritär im Inland und (aufgrund begrenzter Potenziale im Inland) ergänzend im Ausland eingesetzt.

SPA2 – Ökologische Republik

Die schweizerische Klimapolitik verfolgt die Erreichung des Netto-Null-Ziels. Es wird ein rechtlicher Rahmen für den sicheren Verkehr und die geologische Speicherung von Kohlendioxid erlassen und eine CO₂-Transportinfrastruktur aufgebaut (Pipeline). Die Finanzierung der Infrastruktur erfolgt durch eine Teilzweckbindung von Einnahmen aus der Kohlenstoff-Bepreisung.

Grundsätzlich werden industrielle Anlagen mit schwer vermeidbaren Treibhausgasemissionen sowie KVA zum Einbau von Carbon-Capture-Anlagen verpflichtet, sofern der Anschluss an die CO₂-Transportinfrastruktur gegeben bzw. zumutbar ist. Die Reduktionsziele des Emissionshandelssystems werden weitestgehend umgesetzt. Alternativ können die Treibhausgasemissionen über NET-Projekte kompensiert werden. Bis 2050 soll grundsätzlich das Netto-Null-Reduktionsziel erreicht werden – verbleibende inländische Residualemissionen können über Negativemissionen im Ausland kompensiert werden. Da ein starker Staat fehlt, ist die Zielerreichung bis 2050 jedoch nicht garantiert. Die Treibhausgasemissionen des internationalen Flugverkehrs werden dabei nicht berücksichtigt.

SPA3 – Ordoliberaler Staat

Die schweizerische Klimapolitik hat keine Ambitionen im Bereich CCS und NET. Die Zielvereinbarung mit dem Verband der KVA zur Verpflichtung zur Installation von CCS wird aufgehoben. Die Reduktionsziele des Emissionshandelssystems werden nicht umgesetzt. Die Finanzierung von F&E sowie der Entwicklung für NET-(Demonstrations-)Projekte wird ebenfalls ausgesetzt bzw. nicht fortgesetzt. Es wird keine CO₂-Transportinfrastruktur aufgebaut.

Auf freiwilliger Basis scheiden einzelne Akteure der Wirtschaft (v.a. KVA) geringe Mengen an CO₂ ab und transportieren diese Mengen individuell. Zudem führen manche Akteure die Kennzeichnung von Netto-Null bzw. Netto-Negativ Produkten ein. Die Kennzeichnung basiert auf einem staatlich zertifizierten Label.

SPA4 – Kompensierender Staat

Die schweizerische Klimapolitik hat keine die Ambitionen im Bereich CCS und NET. Die Zielvereinbarung mit dem Verband der KVA zur Verpflichtung zur Installation von CCS wird aufgehoben. Die Reduktionsziele des Emissionshandelssystems werden nicht umgesetzt. Die Finanzierung von F&E sowie der Entwicklung für NET-(Demonstrations-)Projekte wird ausgesetzt bzw. nicht fortgesetzt. Es wird keine CO₂-Transportinfrastruktur aufgebaut.

11.5. Modellierung

11.5.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Für die SSP-CH modellieren wir weder CCS noch NET (siehe Kapitel 11.4.1).

11.5.2. Klimapolitische Instrumente (SPA)

Für SPA1 bis SPA4 haben wir eine Auswahl von Instrumenten getroffen (siehe Kapitel 11.4). In Tabelle 33 ist die Umsetzung der jeweiligen Instrumente je SPA zusammengefasst. Dabei haben wir den Fokus auf die folgenden Bereiche gelegt:

- Industrie und industrielle Prozesse (Branchen: Zement, Chemie, Stahl)
- Energiewirtschaft: Kehrrichtverwertungsanlagen
- Energiewirtschaft: Biomassekraftwerke (BECCS)
- Massnahmen im Ausland (nicht näher definiert, z.B. DACCS oder BECCS)

Im Industriesektor ist in keinem SPA ein flächendeckender Einsatz von CCS vorgesehen. Der Einsatz erfolgt prioritär bei der Zementherstellung und in geringerem Umfang in den Branchen Chemie und Stahl. Nur in diesen Branchen fallen grosse Mengen an CO₂-Emissionen an, was die Investitionskosten von CCS-Anlagen rechtfertigt. Die CO₂-Emissionen fallen einerseits als Prozessemissionen an (v.a. geogene Emissionen bei der Zementherstellung). Ausserdem werden (fossile) Abfälle oder fossile Energieträger zur Erzeugung von Prozesswärme eingesetzt. Da ein Teil der Abfälle bzw. der eingesetzten Brennstoffe biogenen Ursprungs ist, können durch das CCS auch negative Emissionen generiert werden.

Da ausser ersten Pilotprojekten noch keine CCS-Anlagen in Betrieb sind, können wir für die Wirkungsabschätzung der Instrumente nicht auf bestehende Evaluationen oder Erfahrungswerte zurückgreifen. Die unterstellte Wirkung und der Technologiehochlauf basieren ausschliesslich auf Annahmen, welche passend zum jeweiligen SPA festgelegt werden. Die Wirkung eines SPA in Bezug auf die abgeschiedenen CO₂-Mengen variiert in Abhängigkeit des unterlegten SSP-CH:

- Zum einen variiert zwischen den SSPs-CH der Energieverbrauch und der eingesetzte Energieträgermix bei den Anlagen mit CCS, z.B. der Energieträgermix zur Erzeugung der Prozesswärme bei der Zementherstellung. Dadurch unterscheidet sich die Menge an abgeschiedenem CO₂, aber auch das Verhältnis von fossilem zu biogenem CO₂.
- Die SSPs-CH unterscheiden sich in der Höhe der verbleibenden inländischen Residualemissionen. Entsprechend unterscheiden sich die SSP-CH in der Notwendigkeit, im In- und Ausland Negativemissionen zu erzeugen, um Netto-Null- oder Netto-Negativ-Emissionen zu erreichen (gilt für SPA1 und SPA2).

Für die Darstellung der Gesamtergebnisse haben wir die Treibhausgasemissionen auf Ebene der unterschiedlichen Sektoren bzw. Anwendungen nach Energieträgern zusammengeführt. Wird CCS/NET in einem SPA eingesetzt, werden die abgeschiedenen Mengen auf dieser Ebene berechnet und angerechnet (z.B. werden negative Emissionen aus Zementwerken direkt im Sektor Industrie angerechnet). In den SPA mit CCS/NET beginnt der Technologie-Hochlauf ab dem Jahr 2035 und steigt dann unterschiedlich stark an (Tabelle 33).

Bei der Berechnung der abgeschiedenen CO₂-Mengen wird berücksichtigt, dass die Abscheiderate nicht bei 100% liegt, d.h. ein geringer Teil des CO₂ wird nicht aus dem Abgasstrom abgeschieden und entweicht in die Atmosphäre. Die angenommenen Technologien zur Abscheidung bei Punktquellen verfügen über eine Abscheiderate von 90%-95%. Aufgrund der erwarteten technologischen Entwicklung steigen die Abscheideraten in den Szenarien an, so dass ab 2050 bei Neuanlagen höhere Abscheideraten erreicht werden (in 2100 bis 98 %).

Der Betrieb der CCS und NET-Anlagen erfordert den Einsatz von Energie. Die Umrechnung der abgeschiedenen CO₂-Mengen in aufgewendete Energie erfolgt basierend auf Kennwerten aus den Energieperspektiven 2050+, in Abhängigkeit des Abscheideverfahrens. Analog zu den Arbeiten in den Energieperspektiven 2050+ gehen wir davon aus, dass im Industriesektor und bei BECCS-Anlagen zur CO₂-Abscheidung das Oxyfuel-Verfahren eingesetzt wird und bei KVA das Post-Combustion-Verfahren. Beim Oxyfuel-Verfahren wird ausschliesslich Strom benötigt, bei Post-Combustion Strom und Wärme. Den abgeschätzten Energieverbrauch (Strom und Wärme) für CCS und NET speisen wir als Input ins Modell zur Energiewirtschaft ein.

Für alle SPA gehen wir von einer geologischen Speicherung des CO₂ überwiegend im Ausland aus. Die Abscheidung grösserer CO₂-Mengen setzt daher CO₂-Pipelines als Transportinfrastruktur voraus, welche in SPA1 und SPA2 bereitgestellt wird. In SPA3 wird im Inland hingegen keine Pipeline erstellt, was die Mengen an transportierbarem CO₂ begrenzt. Deshalb nehmen wir an, dass über freiwillige Massnahmen in SPA3 maximal 0.5-1 Mio. tCO₂ abgeschieden werden und, dass die Abscheidung in KVA erfolgt. Es werden jedoch in SPA3 nicht alle KVA mit CCS ausgerüstet, sondern lediglich Anlagen, mit einer vergleichsweise guten Transportanbindung für die Weiterleitung zu den Speicherstätten im Ausland.

In SPA1 und SPA2 werden die Netto-Restemissionen durch die — nicht näher spezifizierten — NET im Ausland kompensiert. In den Szenarien mit SPA1 (SSP1-SPA1 und SSP4-SPA1) werden zudem nach 2050 in Summe negative Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von NET im Ausland erzeugt.

Tabelle 33: SPA CCS und NET: Instrumente und Wirkung

Instrumente	Wirkung	Hochlauf: Anteil betroffener Anlagen bzw. Mengen
SPA 0 – Status Quo		
1. Industrie / Industrielle Prozesse	keine	kein Hochlauf
2. Energiewirtschaft: KVA	vernachlässigbar	kein Hochlauf
3. Energiewirtschaft: Biomassekraftwerke	keine	kein Hochlauf
4) Massnahmen im Ausland (z.B. DACCS)	keine	kein Hochlauf
SPA 1 – Grüner Staat		
1. Industrie / Industrielle Prozesse (Branchen: Zement, Chemie, Stahl)	Vermeidung fossiler THG-Emissionen und partiell Erzeugung von negativen Emissionen (bei biogenen Energieträgern)	Start in 2035; ab 2050 100% der Anlagen
2. Energiewirtschaft: KVA	Vermeidung fossiler THG-Emissionen und Erzeugung von negativen Emissionen durch biogene Abfälle	Start in 2035; ab 2050 100% der KVA ausgerüstet
3. Energiewirtschaft: Biomassekraftwerke	Erzeugung von negativen Emissionen durch biogene Brennstoffe	Start in 2035; ab 2050 25% der Anlagen, ab 2085 50 % der Anlagen mit CC ausgerüstet
4) Massnahmen im Ausland (z.B. DACCS)	Erzeugung negativer Emissionen	ab 2050 Kompensation der inländischen Restemissionen; ab 2060 bilanziell negative Emissionen (Netto-Negativ): 2060: -2 Mt CO ₂ pro Jahr 2085: -10 Mt CO ₂ pro Jahr 2100: -10 Mt CO ₂ pro Jahr (linearer Hochlauf zwischen 2060 und 2085)
SPA2 – Grüne Republik		
1. Industrie / Industrielle Prozesse (Branchen: Zement, Chemie, Stahl)	Vermeidung fossiler THG-Emissionen und partiell Erzeugung von negativen Emissionen (bei biogenen Energieträgern)	Start in 2035; ab 2050 60% der Anlagen ab 2085 80% der Anlagen
2. Energiewirtschaft: KVA	Vermeidung fossiler THG-Emissionen und Erzeugung von negativen Emissionen durch biogene Abfälle	Start in 2035; ab 2050 60% der KVA ausgerüstet ab 2085 80% der KVA ausgerüstet
3. Energiewirtschaft: Biomassekraftwerke	Erzeugung von negativen Emissionen durch biogene	Start in 2035; ab 2050 25% der Anlagen, ab 2085

Instrumente	Wirkung	Hochlauf: Anteil betroffener Anlagen bzw. Mengen
	Brennstoffe	50 % der Anlagen mit CC ausgerüstet
4) Massnahmen im Ausland (z.B. DACCS)	Erzeugung negativer Emissionen	ab 2050 Kompensation der inländischen Residualmengen (ohne Emissionen des internationalen Flugverkehrs)
SPA3 – Ordoliberaler Staat		
1. Industrie / Industrielle Prozesse	keine	kein Hochlauf
2. Energiewirtschaft: KVA	Vermeidung fossiler THG-Emissionen und Erzeugung von negativen Emissionen durch biogene Abfälle	Hochlauf durch freiwillige Massnahmen und Zertifikate: Start nach 2035; ab 2050 -0.5 Mio. tCO2 ab 2085 -1.0 Mio. tCO2
3. Energiewirtschaft: Biomassekraftwerke	keine	kein Hochlauf
4) Massnahmen im Ausland (z.B. DACCS)	keine	kein Hochlauf
SPA4 - Kompensierender Staat		
1. Industrie / Industrielle Prozesse	keine	kein Hochlauf
2. Energiewirtschaft: KVA	keine	kein Hochlauf
3. Energiewirtschaft: Biomassekraftwerke	keine	kein Hochlauf von BECCS
4) Massnahmen im Ausland (z.B. DACCS)	keine	kein Hochlauf

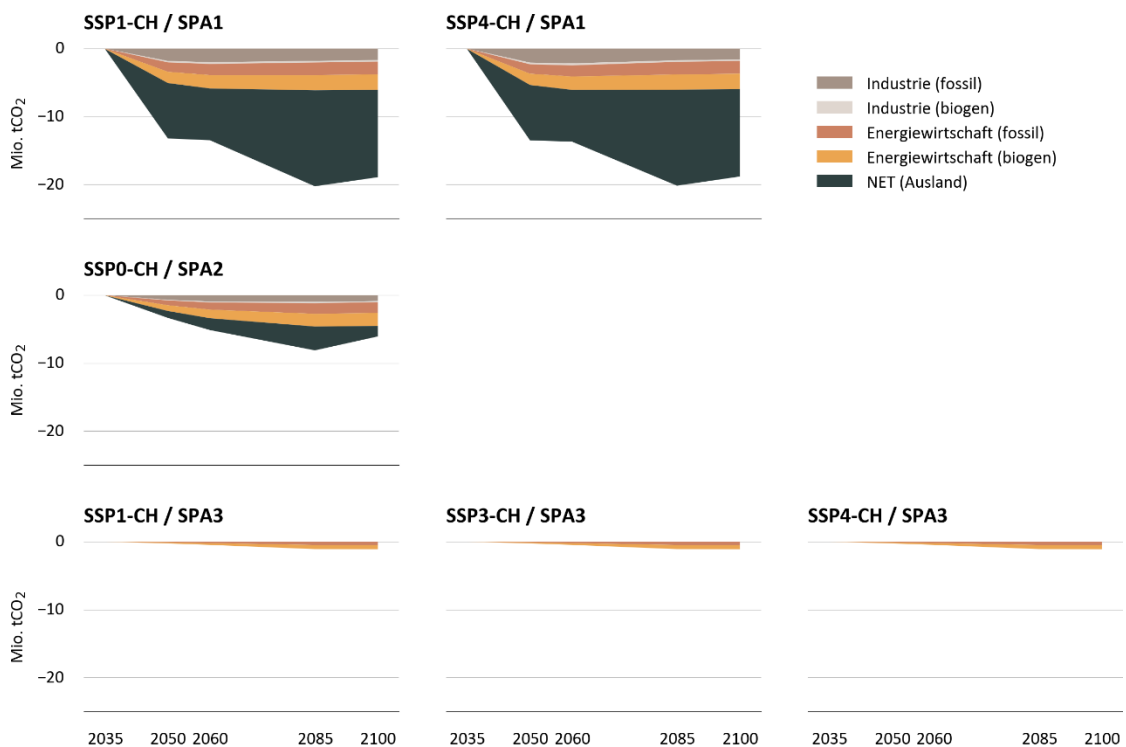
11.6. Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 73 unterscheidet die in den Szenarien abgeschiedenen CO₂-Mengen nach den oben eingeführten Bereichen Industrie und Energiewirtschaft. Dabei unterscheiden wir zwischen abgeschiedenem biogenem CO₂ und fossilem CO₂. Nur die Abscheidung von biogenem CO₂ wird als negative Treibhausgasemission angerechnet. Die Abscheidung des fossilen CO₂ führt hingegen nicht zu negativen Emissionen. Ergänzend ist in der Abbildung anhand der Kategorie «NET (Ausland)» dargestellt, welche Mengen an negativen CO₂-Emissionen im Ausland erzeugt werden müssen, um das Netto-Null-Ziel zu erreichen (für SPA1 und SPA2). SPA1 beinhaltet nach 2050 zusätzliche Negativemissionen, um insgesamt netto-negativ zu werden (vgl. Kapitel 11.4). Im Folgenden beschreiben wir die Ergebnisse für die unterschiedlichen Szenarien.

SPA1 verfolgt einen ambitionierten Einsatz von CCS. Bis zum Jahr 2050 sollen alle grösseren, verbleibenden THG-Emissionsquellen mit CCS ausgestattet werden. Das sind unter

anderem die KVA und Anlagen bei den Grundstoffen im Industriesektor (Zement, Chemie, Stahl). In der Kombination aus SSP1-CH und SPA1 werden so bis zum Jahr 2050 im Inland jährlich rund 5 Mio. tCO₂ abgeschieden, davon sind rund 2 Mio. t biogenes CO₂ (v.a. aus KVA). Diese Mengen steigen nach 2050 bis zum Jahr 2100 noch leicht an (6 Mio. tCO₂ respektive 2.5 Mio. t biogenes CO₂). In der Kombination SSP4-SPA1 wird etwas mehr CO₂ abgeschieden als in der Kombination SSP1-CH und SPA1. Die Unterschiede sind jedoch gering und hauptsächlich auf den Sektor Industrie zurückzuführen. In der Kombination aus SSP4-CH mit SPA1 werden ab dem Jahr 2050 jährlich knapp 5.5 Mio. tCO₂ abgeschieden, davon rund 2 Mio. t biogenes CO₂. Im Jahr 2100 liegt die Mengen an biogenem CO₂ bei knapp 2.5 Mio. t. In beiden SPA1-Kombinationen werden ausserdem zunehmend im Ausland negative Emissionen für die Schweiz erzeugt. Im Jahr 2050 liegt die Menge bei rund 8-10 Mio. tCO₂, bis zum Jahr 2100 steigt die Menge auf 12-13 Mio. tCO₂ (Abbildung 73).

Abbildung 73: CCS und NET: Abgeschiedene CO₂-Mengen nach Sektoren, unterschieden nach biogenem und fossilem CO₂ (in Mio. tCO₂)



Die Kehrlichtverwertungsanlagen (KVA) sind gemäss gängiger Konventionen dem Sektor Energiewirtschaft zugerechnet. In SPA4 findet kein CCS oder NET statt. Es ist daher nicht abgebildet. Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos/INFRAS.

SPA2 wird mit SSP0-CH kombiniert. Die abgeschiedenen Mengen sind geringer als in den Kombinationen mit SPA1, was auf den etwas langsameren Hochlauf und auf die tiefere Umsetzungsrate von CCS zurückzuführen ist, aber auch auf die weniger ambitionierte Zielvorgabe (Netto-Null, aber nicht Netto-Negativ). In der Kombination SSP0-CH mit SPA2 werden nicht alle grossen Punktquellen mit CCS ausgestattet. Im Jahr 2050 werden im Inland knapp 2.5 Mio. tCO₂ abgeschieden, bis zum Jahr 2100 sind es 4,5 Mio. tCO₂, davon 2 Mio. t biogenes CO₂. Zusätzlich werden NET im Ausland erzeugt (im Jahr 2050 knapp 1 Mio. tCO₂). Damit wird nur ein Teil der zur Emissionsreduktion auf Netto-Null notwendigen Restemissionen kompensiert. Bis zum Jahr 2085 steigt die Menge an NET auf rund 3 Mio. tCO₂ und Netto-Null wird erreicht. Aufgrund der sehr starken inländischen Reduktion der Treibhausgasemissionen, müssen zunehmend geringere Mengen im Ausland kompensiert werden. Entsprechend nimmt nach 2085 NET (Ausland) wieder ab (im Jahr 2100 rund 1 Mio. tCO₂).

Die Entwicklung in den Kombinationen mit SPA3 verläuft entsprechend den gesetzten Vorgaben. Bis zum Jahr 2060 werden rund 0.5 Mio. tCO₂ abgeschieden, langfristig rund 1 Mio. t. Die Abscheidung erfolgt im Sektor Energiewirtschaft (KVA oder Biomassekraftwerken), wodurch auch geringe Mengen an negativen Treibhausgasemissionen erzeugt werden (<1 Mio. tCO₂).

In SPA4 wird weder CCS noch NET eingesetzt.

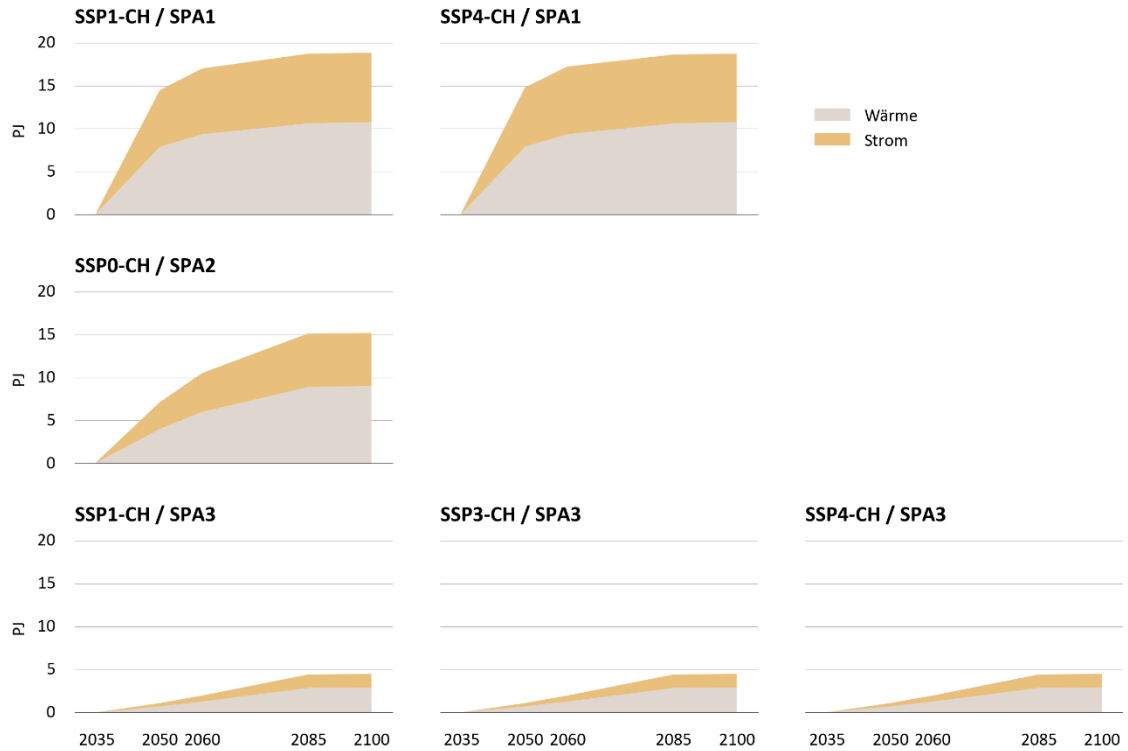
Der für den Betrieb der inländischen Anlagen zur CO₂-Abscheidung notwendige Energieverbrauch ist in Abbildung 74 ausgewiesen (Summe aller Anwendungen). Der Energieverbrauch im Inland hängt direkt von der Menge an abgeschiedenem CO₂ ab. Beim Post-Combustion-Verfahren, welches bei KVA zum Einsatz kommt, wird nebst Strom auch Wärme benötigt. Diese Wärme wird durch die KVA selbst gedeckt. Die genutzte Wärme fehlt dann jedoch für die Wärmeversorgung in Gebäuden.

Am höchsten fällt der inländische Energiebedarf in der Kombination SSP4-CH und SPA1 sowie der Kombination SSP1-CH mit SPA1 an. In diesen Kombinationen werden langfristig (2100) knapp 11 PJ Wärme und rund 6 PJ Strom benötigt. Letzteres entspricht in diesen Szenarien rund 3 % des inländischen Strombedarfs im Jahr 2100. In der Kombination SSP0-CH und SPA2 werden langfristig rund 9 PJ Wärme und 5 PJ Strom für den Betrieb der CCS-Anlagen aufgewendet. In den Szenarien, in welchen CCS nur auf freiwilliger Basis eingesetzt wird (Kombinationen mit SPA3) ergibt sich ein Wärmeverbrauch von etwa 3 PJ und ein Stromverbrauch von rund 1.5 PJ. Da in SPA4 weder CCS noch NET eingesetzt wird, fällt bei Kombinationen mit SPA4 kein Energieverbrauch für CCS oder NET an.

Nicht dargestellt ist der Energieverbrauch für den Betrieb von Anlagen im Ausland. Würde beispielsweise die Menge an NET (Ausland) aus SPA1 (12-13 Mio. tCO₂) vollständig mit DACCS

erzeugt, ergäbe sich im Ausland ein Stromverbrauch von rund 28 PJ (ca. 8 TWh) sowie ein Wärmeverbrauch von ca. 70 PJ.

Abbildung 74: Energieverbrauch für den Einsatz von CCS und NET im Inland nach Strom und Wärme (in PJ)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik Prognos.

12. Gesamtergebnisse

Dieses Kapitel zeigt die über die Sektoren summierten Gesamtergebnisse der analysierten Kombinationen aus sozioökonomischen Szenarien für die Schweiz (SSP-CH) und Szenarien politischer Instrumente für die Schweiz (SPA). Die SSP-CH beinhalten jeweils bereits die derzeit implementierten politischen Instrumente.¹¹³ Diese Instrumente sind in SPA0 berücksichtigt. Die Kombination aus SSP-CH und SPA0 stellt somit die Situation ohne Veränderungen der Instrumente dar und wird jeweils in den ersten Unterkapiteln beschrieben. Im Anschluss daran beschreiben wir die Wirkung von geänderten politischen Instrumenten als Kombinationen aus den SSP-CH und den SPA1 bis SPA4.

Kapitel 12.1 beschreibt den Endenergieverbrauch in den Nachfragesektoren Industrie, Verkehr und Gebäude. In Kapitel 12.2 folgt eine Darstellung und Diskussion der Treibhausgasemissionen. Dabei verwenden wir unterschiedliche Abgrenzungen. Zum einen sind die Treibhausgasemissionen entsprechend der Abgrenzung der aktuell geltenden Klimaschutzziele gemäss der Systemgrenze des Treibhausgasinventars ausgewiesen. In einer erweiterten Systemgrenze zeigen wir die Emissionen inkl. der Emissionen des internationalen Flugverkehrs, der Nicht-CO₂-Wirkung des Flugverkehrs sowie der Emissionen der Importe und Exporte, wobei die Emissionen der Exporte als negative Werte in die Bilanz einfließen. Nicht ausgewiesen und auch nicht berechnet haben wir die Treibhausgasemissionen des Sektors Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (CRF 4: LULUCF).¹¹⁴

12.1. Endenergieverbrauch

12.1.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Der Endenergieverbrauch (EEV) bezeichnet die Energiemenge, die in den Endverbrauchssektoren Industrie, Gebäude (Haushalte, Dienstleistungen) und Verkehr unmittelbar zum Einsatz kommt und den Letztverbrauchern des Energiesystems zur Verfügung gestellt wird. Abbildung 75 zeigt den EEV für alle SSPs-CH in Kombination mit SPA0.

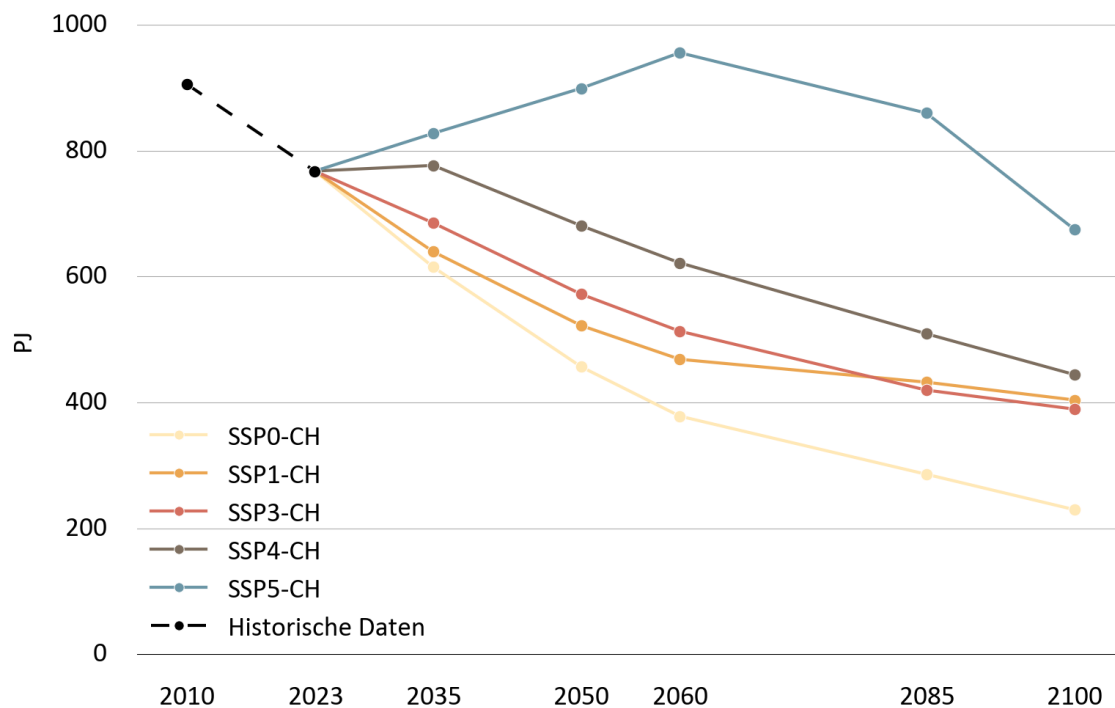
Für den Zeitraum 2010 bis 2023 zeigen die historischen Daten eine Abnahme (-15 %). Die einzelnen Energieträger entwickelten sich allerdings unterschiedlich (Abbildung 76): Abgenommen haben in diesem Zeitraum die Verbräuche für Mineralöle und fossile Gase, und auch der Verbrauch für Strom war leicht rückläufig. Zugenommen haben die Verbräuche an Fernwärme und erneuerbaren Energien.

¹¹³ Die SSP-CH beinhalten zudem den Einfluss von Instrumenten, die nicht primär klima- und energiepolitisch motiviert sind, aber dennoch einen entsprechenden Einfluss haben.

¹¹⁴ Im Mittel der Jahre 2014 -2023 bildete der LULUCF-Sektor eine CO₂-Senke (rund 1 Mio. tCO₂eq/Jahr). Dabei wiesen die Emissionen des LULUCF-Sektors im Zeitverlauf eine steigende Tendenz auf (Abnahme der Senkenwirkung). Während der Wald insgesamt bisher eine Senke bildet (im Wald wurde bilanziell mehr Kohlenstoff gebunden als emittiert), waren andere Landnutzungen Emissionsquellen (insbesondere Grünland und Ackerland).

Diese grundlegenden Trends der jüngeren Vergangenheit setzen sich in den meisten SSP-CH ab 2023 fort. Einzig in SSP5-CH steigt der Endenergieverbrauch bis zum Jahr 2060 vorerst wieder an und nimmt erst gegen Ende des Jahrhunderts aufgrund des wirtschaftlichen Rückgangs und der abnehmenden Bevölkerung ab. In allen anderen SSP-CH nimmt der Endenergieverbrauch kontinuierlich ab, wobei der Rückgang in SSP0-CH mit 70 % im Zeitraum 2023 bis 2100 am grössten ausfällt. In den Szenarien SSP1-CH (-47%), SSP3-CH (-49 %) und SSP4-CH (-42 %) fällt der Rückgang in etwa gleich hoch aus und der zeitliche Verlauf des Rückgangs unterscheidet sich nicht wesentlich. Der Verbrauchsrückgang in diesen drei SSP-CH ist jedoch auf unterschiedliche Ursachen zurückzuführen. In SSP1-CH ist der Rückgang getrieben durch die Technikentwicklung und die gesteigerte Energieeffizienz. In SSP3-CH sind die rückläufige Bevölkerung und die abnehmende Wirtschaftsentwicklung wichtige Treiber. Auch in SSP4-CH nehmen nach 2060 sowohl die Bevölkerung als auch die Wirtschaftsleistung ab.

Abbildung 75: Gesamter Endenergieverbrauch pro SSP-CH (SPA0), (in PJ)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS/Prognos.

Der Verbrauch fossiler Energieträger nimmt mit Ausnahme von SSP5-CH bis Ende des Jahrhunderts stark ab. Bei SSP0-CH bis SSP4-CH liegt der Rückgang bei den Mineralölen im Bereich von -75 % bis -98 %, bei den fossilen Gasen beträgt der Rückgang -87 % bis -100 %. Aber auch in SSP5-CH sinkt langfristig der Verbrauch an fossilen Energieträgern und der Anteil der fossilen

Energieträger am gesamten Endenergieverbrauch verringert sich von knapp 60 % im Jahr 2023 auf 46 % im Jahr 2100 (Rückgang 2100 ggü. 2023: Mineralöle: -47 %; fossile Gase: -39 %). Dass auch in SSP5-CH der Anteil der fossilen Energieträger zurückgeht, liegt daran, dass sich auch hier die in der Vergangenheit beobachteten technologischen Trends fortsetzen, wenn auch weniger ausgeprägt als in den anderen Pfaden (z.B. Rückgang von Öl- und Gasheizungen, Zunahme von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen).

Trotz des verbreiteten Trends in Richtung Elektrifizierung (u.a. Wärmepumpen, E-Fahrzeuge, Elektrowärme bei industriellen und gewerblichen Prozessen) nimmt der Stromverbrauch in einigen SSP-CH langfristig ab. Ausgeprägt ist der Rückgang in SSP0-CH. In diesem Szenario werden im Jahr 2100 in den Endverbrauchssektoren Gebäude, Industrie und Verkehr noch 120 PJ (rund 33 TWh) Strom benötigt; das sind rund 40 % weniger als im Jahr 2023. In SSP3-CH verringert sich der Stromverbrauch bis zum Jahr 2100 um über 20 %. In SSP1-CH und SSP4-CH steigt der Stromverbrauch bis zur Mitte des Jahrhunderts an, auf rund 250 PJ in SSP1-CH, bzw. 290 PJ in SSP4-CH. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts nimmt der Stromverbrauch in diesen Pfaden wieder ab und liegt 2100 noch rund 10 % über dem Niveau des Jahres 2023 (jeweils rund 225 PJ; respektive 63 TWh). SSP5-CH verzeichnet einen Anstieg des Stromverbrauchs bis zum Jahr 2060 auf ca. 340 PJ (95 TWh). Nach 2085 nimmt der Stromverbrauch zwar auch in SSP5-CH ab, verbleibt jedoch bis zum Jahr 2100 über 300 PJ.

Ursächlich für diese Entwicklungen des Stromverbrauchs in den Endverbrauchssektoren sind mehrere Faktoren. Zentral ist die weiter steigende Energieeffizienz, insbesondere bei Elektrogeräten, Beleuchtung und Motoren in den Sektoren Gebäude und Industrie. Im Gebäudesektor steigt zwar in den meisten Szenarien der Stromverbrauch für Wärmepumpen zumindest zwischenzeitlich an, weil diese einen immer grösseren Anteil der Wohnfläche beheizen. Gleichzeitig werden jedoch weniger effiziente, konventionelle Elektroheizungen und Warmwassererhitzer ersetzt und die Effizienz der Wärmepumpen steigt im Zeitverlauf an. Ausserdem tragen auch das wärmer werdende Klima und der damit verbundene Rückgang der Wärmenachfrage zur Verbrauchsreduktion bei. In einzelnen Szenarien trägt zudem die rückläufige Bevölkerung zur Abnahme des Verbrauchs bei (SSP0-CH, SSP3-CH). Im Gegensatz zu den Sektoren Gebäude und Industrie nimmt der Stromverbrauch im Verkehrssektor in den meisten Szenarien (deutlich) zu. Ausnahme bildet SSP3-CH, bei welchem der Stromverbrauch im Verkehrssektor in etwa auf dem aktuellen Niveau stagniert. Ein zunehmend wichtiger Einflussfaktor für den Stromverbrauch werden die Rechen- bzw. Datenzentren. Dies trifft insbesondere auf SSP1-CH und SSP5-CH zu, in denen der Stromverbrauch für Rechenzentren auf rund 55 PJ (15 TWh) ansteigt. Bilanziell wird dieser Verbrauch dem Dienstleistungs- bzw. dem Gebäudesektor zugeschlagen.

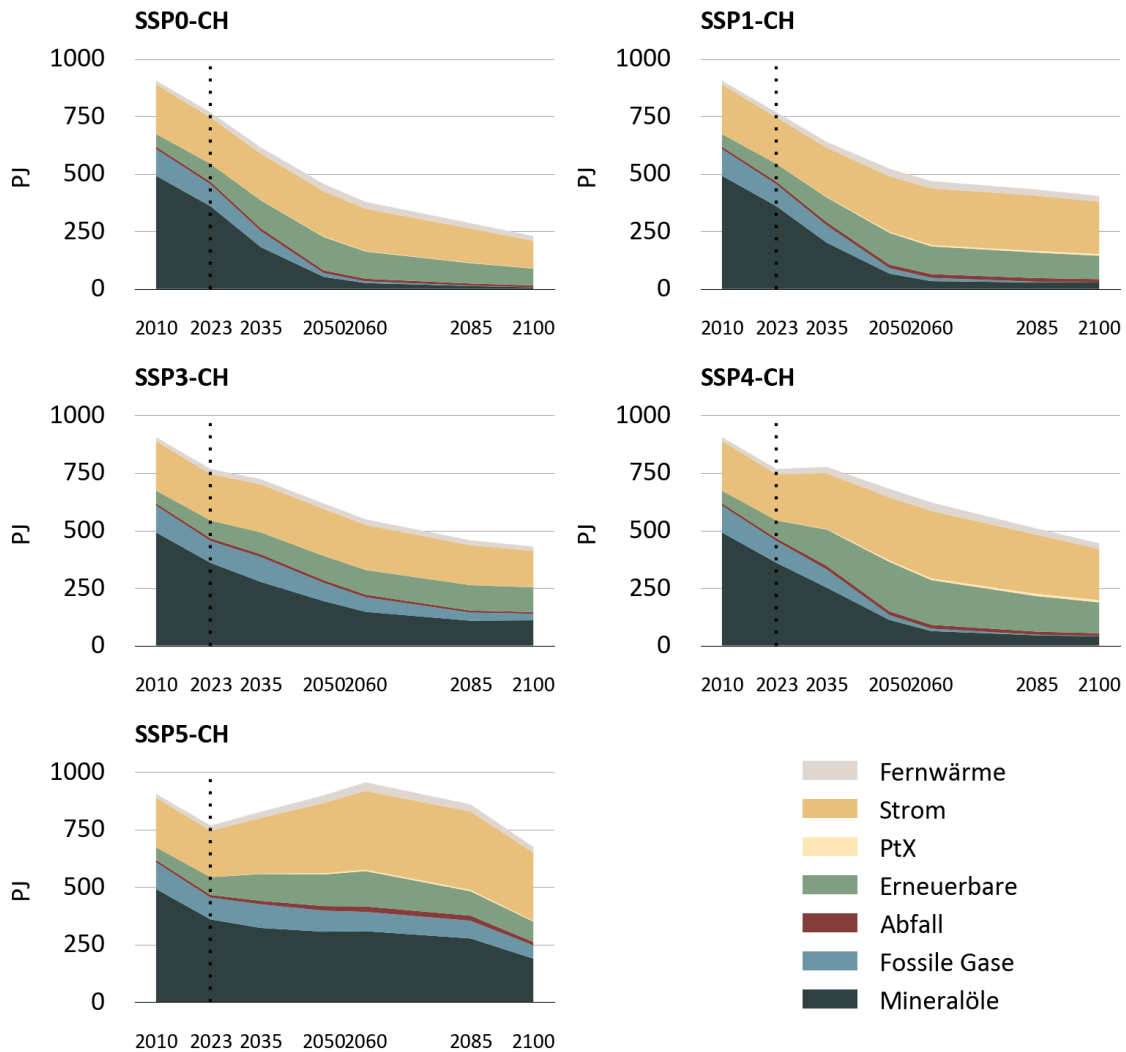
Bei der Betrachtung der Endverbrauchssektoren nicht berücksichtigt ist der Stromverbrauch im Umwandlungssektor (Energiewirtschaft), beispielsweise für die Erzeugung von Fernwärme (z.B. durch Elektro-Wärme, Grosswärmepumpen) oder die Herstellung von Wasserstoff. Den Gesamtstromverbrauch inkl. Verbrauch im Sektor Energiewirtschaft haben wir in Kapitel 7.4.4 ausgewiesen (Abbildung 35).¹¹⁵

Der Verbrauch an Fernwärme nimmt in allen SSP-CH mittelfristig (2060) deutlich zu und steigt auf 28-37 PJ. Die zunehmende Gebäudeeffizienz und das wärmer werdende Klima führen langfristig wieder zu einer Abnahme des Fernwärmebedarfs. Bei der Betrachtung des Zeitraums 2023 bis 2100 fällt der Verbrauchsanstieg in SSP1-CH (+12 %) und SSP5-CH (+14 %) am grössten aus. In SSP0-CH und SSP3-CH liegt der Verbrauch an Fernwärme im Jahr 2100 leicht unter dem Niveau des Jahres 2023.

Strombasierte Energieträger (PtX; u.a. Wasserstoff und SAF beim Flugverkehr) haben in den SSP-CH lediglich eine untergeordnete Bedeutung. Zwar werden in allen SSPs-CH PtX eingesetzt, die Mengen sind jedoch gering. Im Jahr 2050 liegen sie im Bereich von 2-6 PJ, im Jahr 2100 bei weniger als 1-10 PJ. Der Einsatz erfolgt ausschliesslich im Verkehrssektor (Nutzfahrzeuge und Beimischung bei Flugtreibstoffen).

¹¹⁵ Bei der Modellierung der Stromerzeugung wird der Stromverbrauch im Umwandlungssektor mitberücksichtigt.

Abbildung 76: Gesamter Endenergieverbrauch der Schweiz nach Energieträger pro SSP-CH (in PJ)



Erneuerbare inkl. Umweltwärme
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS/Prognos.

In Abbildung 77 ist der Endenergieverbrauch für die Endverbrauchssektoren Industrie, Verkehr und Gebäude (private Haushalte und Dienstleistungssektor) dargestellt. In allen SSP-CH nimmt der Energieverbrauch in allen Sektoren im Zeitraum 2023 bis 2100 ab, mit Ausnahme des Gebäudesektors in SSP5-CH. In SSP0-CH und SSP1-CH fällt der prozentuale Rückgang im Industriesektor geringer aus als in den Sektoren Verkehr und Gebäude. Der stärkere Rückgang in den Sektoren Gebäude und Verkehr ist auf die Elektrifizierung zurückzuführen, bei der sich durch den Einsatz von Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen gegenüber konventionellen

Ölheizungen und Gasheizungen bzw. Verbrennungsmotoren hohe Effizienzsteigerungen bei der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie erzielen lassen.¹¹⁶

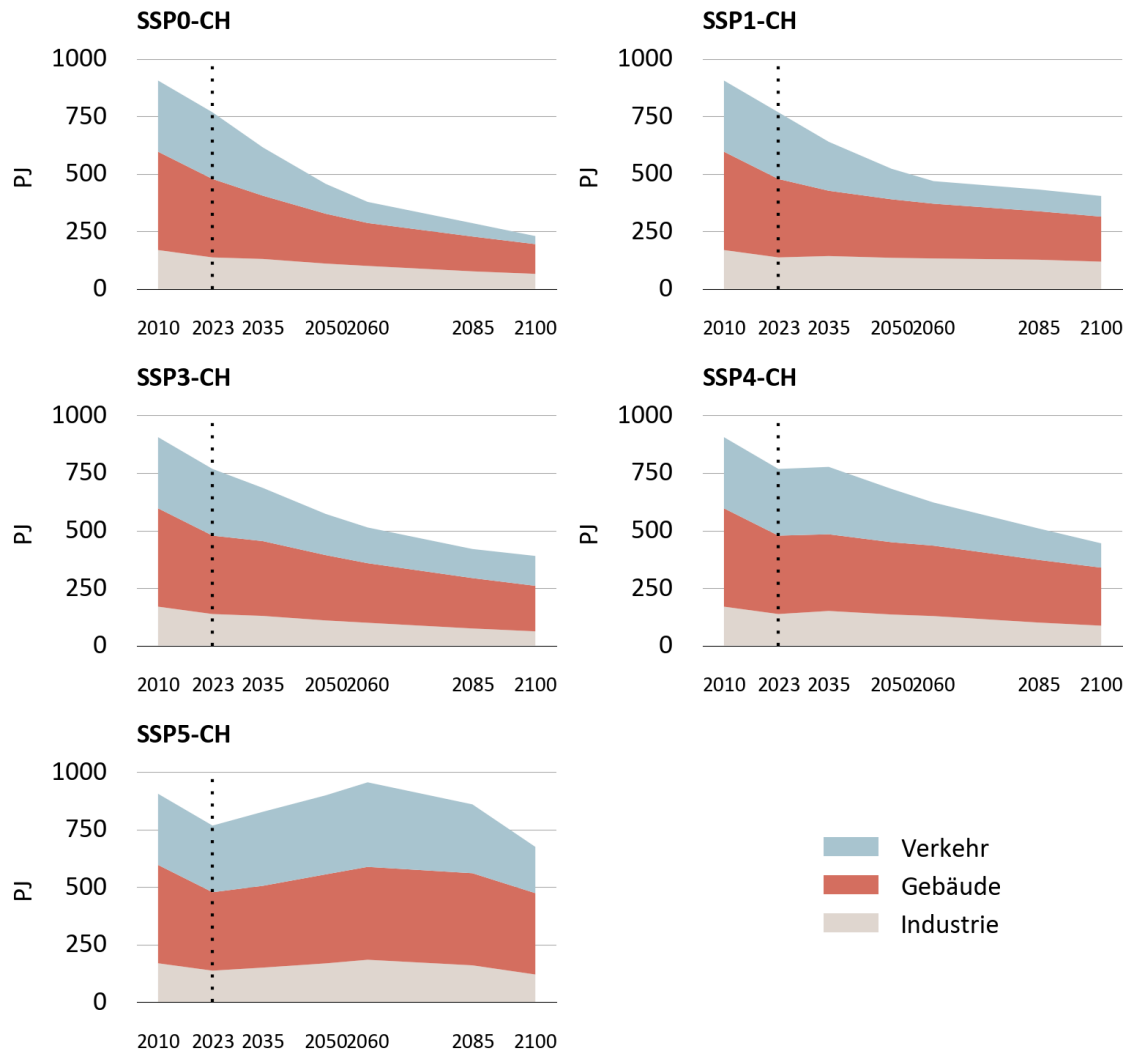
In SSP3-CH fällt der prozentuale Verbrauchsrückgang in allen Sektoren ähnlich aus (rund -50 % im Zeitraum 2023-2100). In SSP4-CH und SSP5-CH zeigt sich im Gebäudesektor der geringste Verbrauchsrückgang, bzw. in SSP5-CH nimmt der Verbrauch sogar leicht zu (+4 %). Die Zunahme in SSP5-CH hängt eng zusammen mit dem Verbrauchsanstieg für Rechenzentren (2100 rund 55 PJ), der vergleichsweise geringen Elektrifizierung sowie der verlangsamten Steigerung der Energieeffizienz.

Im Sektor Verkehr liegt der Rückgang des Energieverbrauchs im Zeitraum 2023 bis 2100 in den SSP0-CH bis SSP4-CH zwischen -55 % bis knapp -90 %. Geringer fällt der Rückgang in SSP5-CH aus (-30 %). Der Verbrauchsrückgang im Verkehrssektor ist begründet durch die Elektrifizierung der Antriebe, teilweise auch durch die abnehmenden Verkehrsleistungen, insbesondere in SSP0-CH und SSP3-CH. In SSP5-CH steigt der Energieverbrauch im Verkehrssektor bis Mitte des Jahrhunderts vorerst an (u. a. aufgrund der weiter steigenden Verkehrsleistung) und beginnt erst dann abzunehmen. Ursachen für den Rückgang in SSP5-CH nach 2060 sind die sinkende Bevölkerung, der Rückgang der Verkehrsleistung pro Kopf, aber auch der gestiegene Anteil der BEV am Flottenmix.

Der Rückgang im Gebäudesektor hängt zusammen mit der Elektrifizierung der Gebäudewärme mittels Wärmepumpen. Ausserdem tragen energetische Sanierungen, effizientere Neubauten, effizientere Elektrogeräte und teilweise auch der Rückgang der Gebäudefläche (u. a. SSP0-CH und SSP3-CH) zum Rückgang des Verbrauchs bei. Gebremst wird der Rückgang durch zunehmend neue Verbraucher (z.B. Rechenzentren), insbesondere in SSP1-CH und SSP5-CH. Im Industriesektor fallen die Effizienzsteigerungen geringer aus als in den Sektoren Gebäude und Verkehr, und teilweise dämpfen die steigenden Produktionsmengen den Verbrauchsrückgang (Abbildung 25).

¹¹⁶ Beispielsweise ist in einem Auto eine kWh entweder in einer Batterie (BEV) oder in Form von Kraftstoff (Verbrenner) gespeichert. Für BEVs kann ein wesentlich höherer Anteil dieser kWh in Bewegungsenergie umgewandelt werden (bis zu Faktor 3 Unterschied).

Abbildung 77: Gesamter Endenergieverbrauch der Schweiz nach Sektor pro SSP-CH (in PJ)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

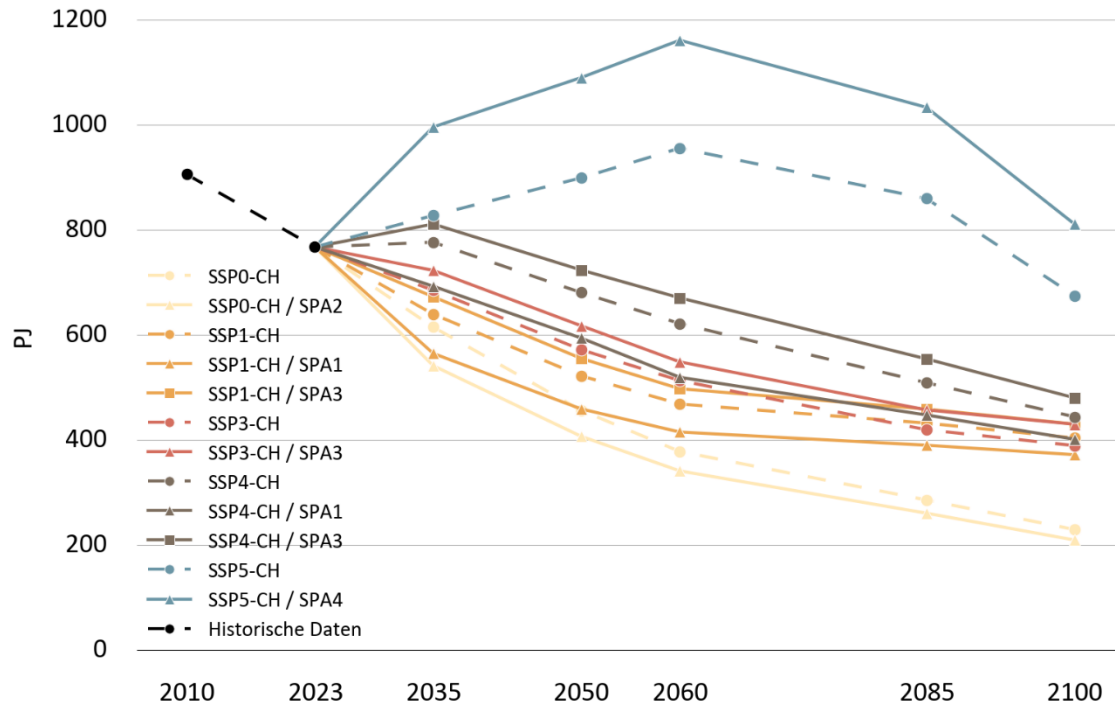
Grafik INFRAS/Prognos.

12.1.2. Klimapolitische Instrumente (SPA) in Kombination mit SSP-CH

Das letzte Kapitel hat Ergebnisse der SSP-CH nur in Kombination mit dem SPA0, welches lediglich bestehende Energieinstrumente und Klimaschutzinstrumente beinhaltet. In diesem Kapitel zeigen wir nun, wie die Politikszenerarien SPA1 bis SPA4 die Höhe des Endenergieverbrauchs der Sektoren beeinflussen (Abbildung 78). Dabei ist zu berücksichtigen, dass wir nur solche Kombinationen aus SPA und SSP-CH modellieren, die auch plausibel sind. Die SPA beinhalten ausschliesslich

Instrumente, aber keine Ziele (z.B. Netto-Null Ziel bis zum Jahr 2050), um auf die Wirkung von Instrumenten zu fokussieren.¹¹⁷

Abbildung 78: Gesamter Endenergieverbrauch pro SSP-CH in Kombination mit den jeweiligen SPA (in PJ)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS/Prognos.

SPA1 und SPA2 senken den Energieverbrauch, während SPA3 und SPA4 diesen erhöhen (Abbildung 78 und Abbildung 79). Im Jahr 2060 ergeben sich folgende Veränderungen gegenüber SPA0:

- SPA1: -11 % bis -16 %
- SPA2: -10 %
- SPA3: +7 %-bis +8 %
- SPA4: +22%

Wir modellieren keine Unsicherheiten. Die Bandbreiten stammen daher, dass wir SPA1 und SPA3 mit mehreren SSP-CH kombiniert haben, und sich dabei jeweils andere Wirkungen ergeben haben.

¹¹⁷ Unser Vorgehen ist also explorativ und nicht normativ. Würden die SPA Ziele enthalten (normativ) und würde man davon ausgehen, dass diese erreicht werden, wäre das Resultat auf die Emissionsentwicklung schon vorab definiert.

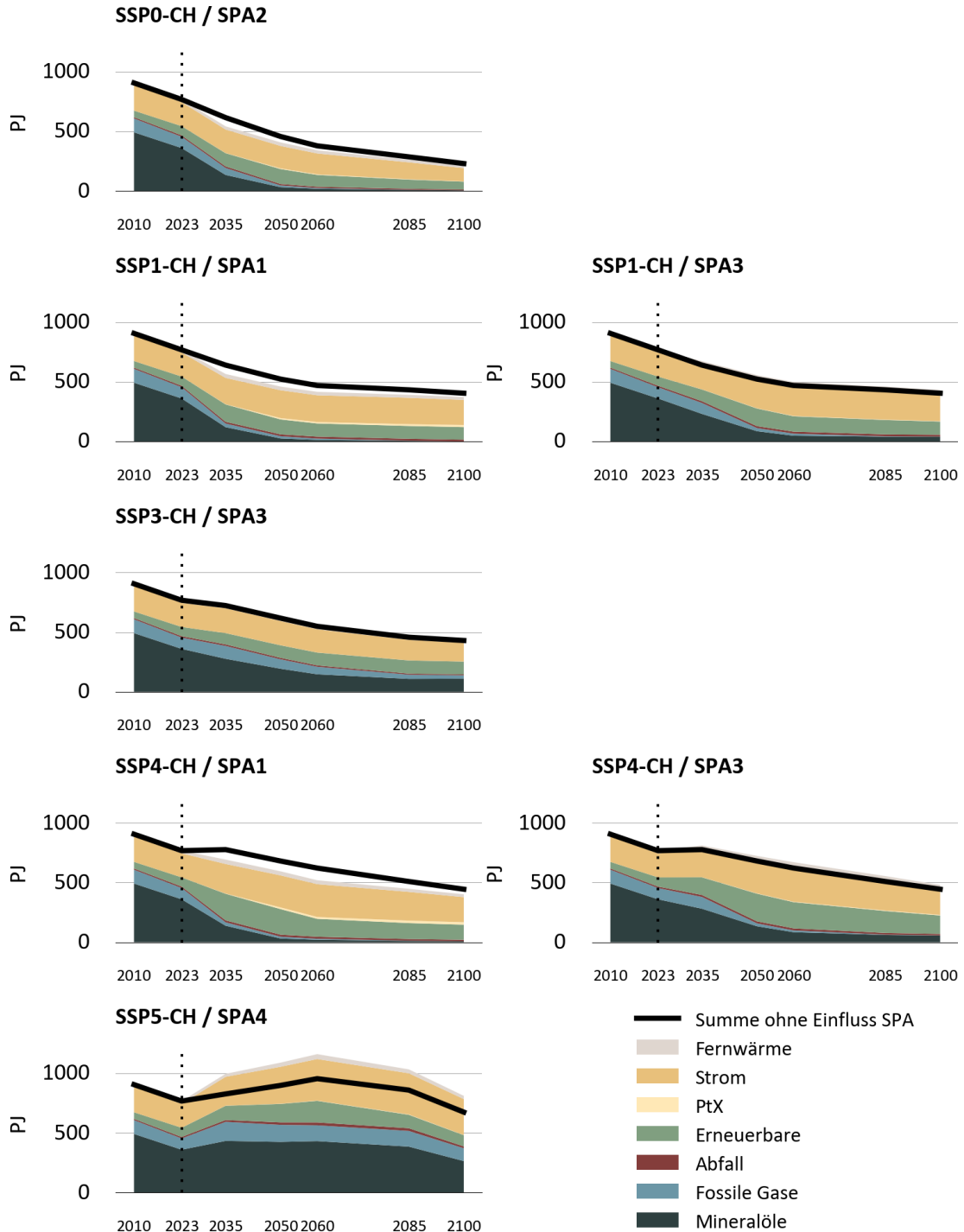
In der gewählten Form haben die zusätzlichen Instrumente aus SPA1 bis SPA4 nur eine begrenzte Wirkung auf den Endenergieverbrauch. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bereits in den SSP-CH gesellschaftliche und technologische Entwicklungen und Veränderungen modelliert werden. Zudem beinhaltet SPA0 bereits implementierte Energie- und Klimaschutzinstrumente. Beispielsweise nimmt der Energieverbrauch für den Strassenverkehr in allen SSP-CH mit Ausnahme von SSP5-CH aufgrund der Elektrifizierung und durch abnehmende Verkehrsmengen stark ab. Im Gebäudebereich nahm der Energieverbrauch im Zeitraum 2000 bis 2023 bereits deutlich ab, u.a. aufgrund anhaltender energetischer Sanierungen, effizienterer Wärmepumpen, des Abgangs von ineffizienten Altbauten aber auch aufgrund des wärmer werdenden Klimas. Dies ist ein Trend, der sich in allen SSP-CH fortsetzt.

Die zusätzlichen Instrumente werden in den SPA in der Regel früh implementiert (Zeitraum 2020-2035), danach kommen meist keine weiteren Instrumente dazu¹¹⁸. In SPA1 und SPA2 wird die Reduktion des Energieverbrauchs daher vor allem in der Anfangsphase zeitlich beschleunigt, so dass die Wirkung dieser SPA in der Jahrhundertmitte am höchsten ist. Danach sinkt die Wirkung der SPA wieder, da die SSP-CH tendenziell in die gleiche Richtung gehen. SPA3 und SPA4 bremsen die Entwicklung hingegen ab. Entscheidend für diese Aussagen ist, dass wir SPA nur mit solchen SSPs koppeln, die in eine ähnliche Richtung gehen. Würden wir z.B. SSP5 mit SPA1 koppeln, dann hätte dessen Instrumente eine grössere Wirkung. Dies ist aber politisch nicht plausibel.

Die vergleichsweise begrenzte Wirkung der zusätzlichen Instrumente der SPA ist auch darauf zurückzuführen, dass einige Instrumente primär auf eine Reduktion der Emissionen durch einen Energieträgerwechsel abzielen. Bei diesen Instrumenten werden beispielsweise fossile Energieträger durch erneuerbare Energieträger substituiert; die Höhe des Energiebedarfs ändert sich dadurch nicht zwangsläufig (z.B. Biogas ersetzt fossiles Erdgas).

¹¹⁸ Zukünftige Forschung sollte hier ansetzen: eine Festlegung von klimapolitischen Instrumenten bis Ende des Jahrhunderts war im Rahmen dieses Projekts nicht leistbar.

Abbildung 79: Gesamter Endenergieverbrauch der Schweiz nach Energieträger pro SSP-CH und SPA (in PJ)



Die schwarze Linie zeigt den gesamten Endenergieverbrauch in der Schweiz über alle Sektoren ohne den Einfluss der SPA (d.h. nur SPA0 = bestehende Instrumente). Der Unterschied der Höhe der gestapelten Flächen und der schwarzen Linie ist daher die Wirkung der SPA.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS/Prognos.

12.2. Treibhausgasemissionen

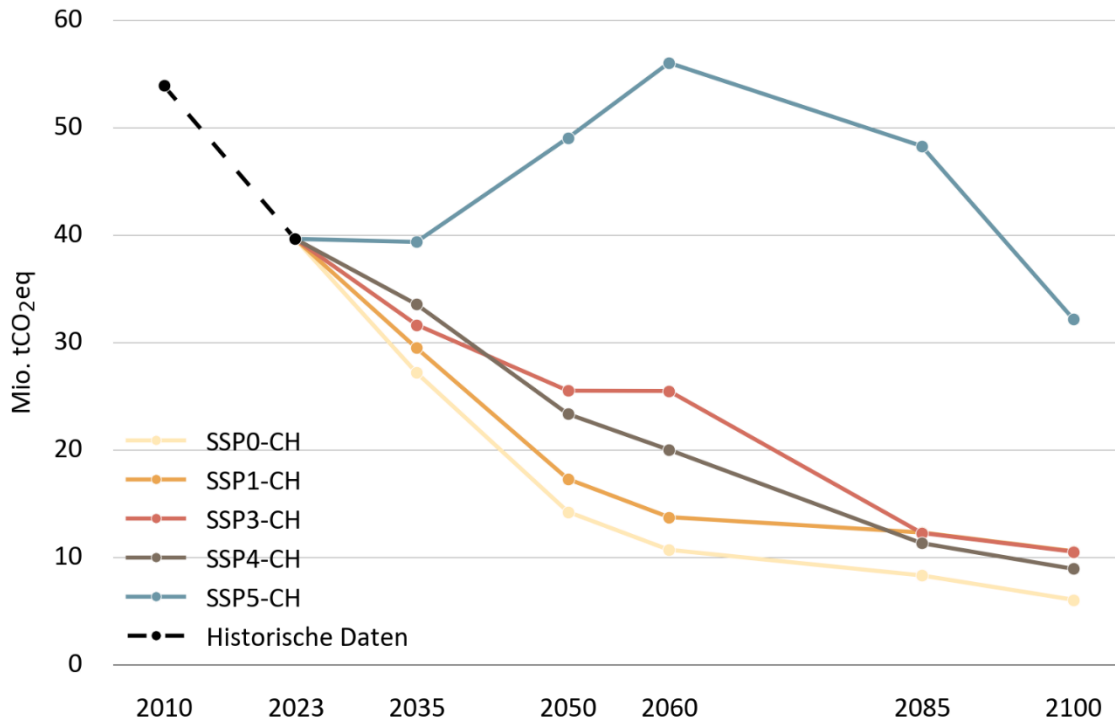
Im Nachfolgenden beschreiben wir die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den SSP-CH und in Kombination mit den SPA (SPA1 bis SPA4). Die dargestellten Emissionen orientieren sich an der Systemgrenze des Treibhausgasinventars und umfassen die Emissionen der Endverbrauchssektoren Gebäude, Verkehr und Industrie (inkl. der industriellen Prozessemissionen), die Emissionen der Energiewirtschaft (Stromerzeugung und Fernwärmeerzeugung), die Emissionen der Landwirtschaft sowie allfällige negative Emissionen durch den Einsatz von NET. Als erweiterte Systemgrenze sind zusätzlich die Treibhausgasemissionen des internationalen Flugverkehrs, die Nicht-CO₂-Emissionen des Flugverkehrs sowie die Netto-Emissionen der Importe und Exporte ausgewiesen (Emissionen der Exporte fliessen als negative Werte in die Bilanz ein). Die Treibhausgasemissionen der Sektoren Landnutzung (LULUCF) und Abfall (Deponien und Abwasserreinigung)¹¹⁹ haben wir im Rahmen des Vorhabens nicht berechnet; diese Emissionen sind in den Darstellungen daher nicht enthalten. Die Entwicklung der Gesamtemissionen aller berechneter Szenarien zeigen wir in Abbildung 80 und Abbildung 83. In Abbildung 81 und Abbildung 82 (SSPs-CH) sowie Abbildung 84 und Abbildung 85 (SSPs-CH inkl. SPA) sind die Treibhausgasemissionen zusätzlich nach Sektoren aufgeschlüsselt.

12.2.1. Sozioökonomische Szenarien (SSP-CH)

Im Zeitraum 2010 bis 2023 sind die Treibhausgasemissionen deutlich gesunken, von 54 Mio. tCO₂eq auf knapp 40 Mio. tCO₂eq (-26 %). In den Pfaden SSP0-CH bis SSP4-CH setzt sich dieser Trend fort und die Treibhausgasemissionen nehmen bis zum Jahr 2100 weiter ab. Die Treibhausgasemissionen dieser SSP-CH unterscheiden sich vergleichsweise wenig, vergleichbar zur Entwicklung des Endenergieverbrauchs (Abbildung 75). Obwohl die Treibhausgasemissionen dieser SSP-CH bis zum Jahr 2100 deutlich abnehmen (-73 % in SSP3-CH bis -85 % in SSP0-CH; jeweils ggü. 2023) wird in keinem dieser SSP-CH das in der Klimastrategie (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2021) (Bundesamt für Umwelt (BAFU) 2025c) verankerte Reduktionsziel von Netto-Null im Jahr 2050 erreicht, da die zusätzlichen Klimaschutzpolitiken der SPA noch fehlen. Im Jahr 2050 liegen die Restemissionen im Bereich von rund 15-25 Mio. tCO₂eq. Noch deutlich höher sind die Treibhausgasemissionen in SSP5-CH. In diesen Szenarien steigen die Treibhausgasemissionen bis 2060 an auf 56 Mio. tCO₂eq und verringern sich dann bis zum Jahr 2100 auf 32 Mio. tCO₂eq.

¹¹⁹ Die Verbrennung von Abfall in Kehrrechtverwertungsanlagen ist im Sektor Energie enthalten.

Abbildung 80: Gesamte Treibhausgasemissionen der Schweiz pro SSP-CH gemäss Systemgrenze des Treibhausgasinventars (in Mio. tCO₂eq)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS/Prognos.

Die Entwicklung der Treibhausgasemissionen in den einzelnen Sektoren verläuft unterschiedlich (Abbildung 81). In den Sektoren Gebäude und Verkehr verringern sich die Treibhausgasemissionen stark. Diese Sektoren werden nahezu vollständig dekarbonisiert, in SSP0-CH und SSP1-CH bereits bis etwa 2060. Hauptursachen sind die Reduktion des Energieverbrauchs und die Elektrifizierung der Wärmeerzeugung und der Fahrzeugflotten. Eine Ausnahme bildet auch hier das SSP5-CH, bei dem die Emissionen im Verkehrssektor vorerst wieder ansteigen und erst nach 2060 abnehmen. Bis zum Jahr 2100 werden die Emissionen sowohl im Gebäudesektor als auch im Verkehrssektor in SSP5-CH um rund 50 % verringert (ggü. 2023).

Auch im Industriesektor nehmen die Treibhausgasemissionen in allen SSP-CH ab. Der Rückgang fällt jedoch geringer aus als in den Endverbrauchssektoren Gebäude und Verkehr und es verbleibt ein Sockel an Treibhausgasemissionen. Dieser entsteht hauptsächlich durch industrielle Prozessemissionen, welche insbesondere bei der Zementproduktion entstehen.

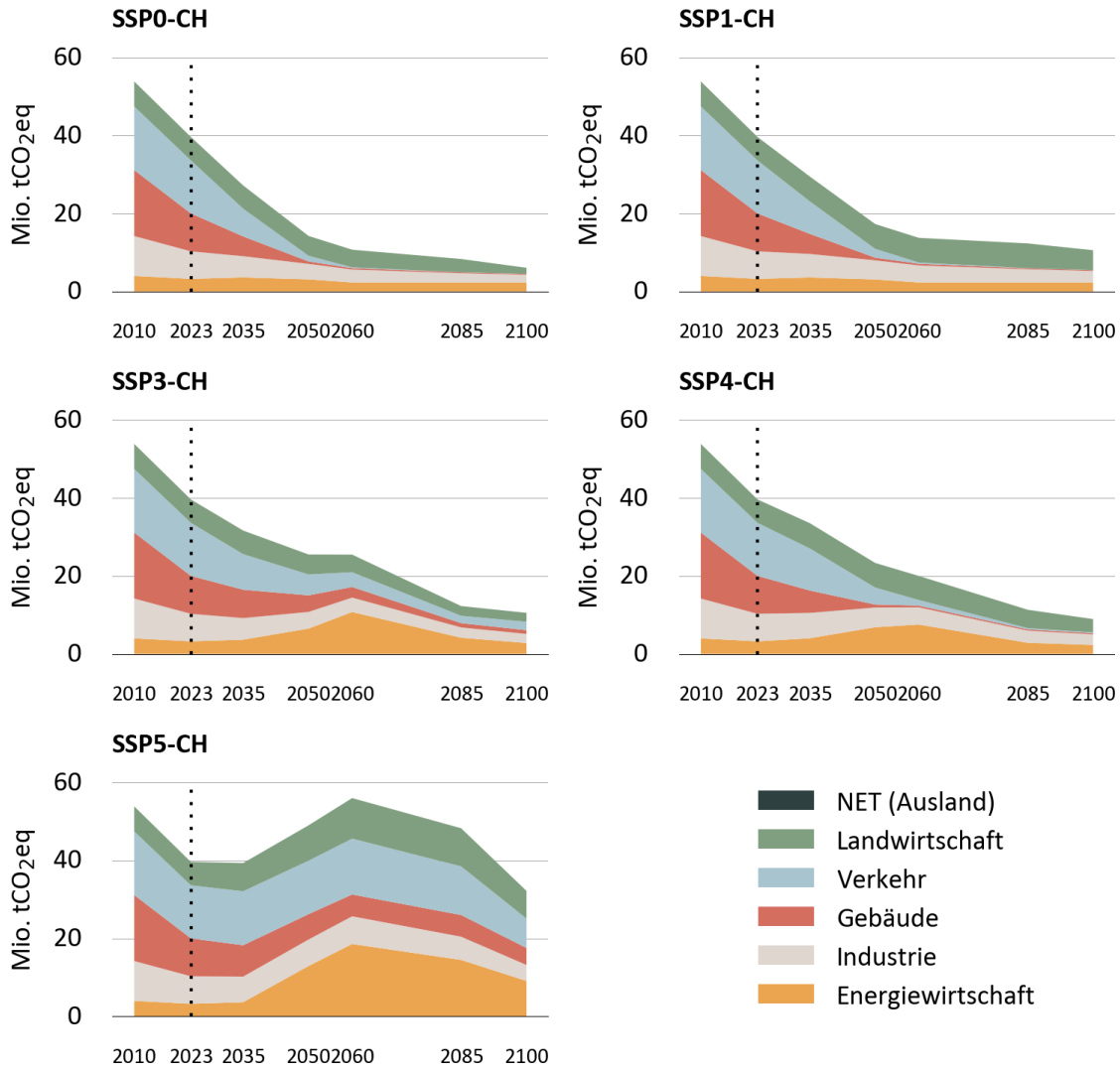
Im Sektor Energiewirtschaft wurden im Jahr 2023 vergleichsweise wenig Treibhausgasemissionen emittiert (rund 3 Mio. tCO₂eq). Die Emissionen entstehen im Wesentlichen bei der thermischen Verwertung der fossilen Abfälle in den KVA. In SSP0-CH und SSP1-CH

verbleiben die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2100 in etwa auf dem aktuellen Niveau, verursacht durch die Emissionen der KVA. In SSP3-CH und SSP4-CH steigen die Emissionen bis zum Jahr 2060 an (SSP3-CH: 11 Mio. tCO₂eq, SSP4-CH knapp 8 Mio. tCO₂eq), was auf den Zubau von Gaskraftwerken zur Erzeugung von Strom und Fernwärme zurückzuführen ist (gekoppelt und ungekoppelt). Längerfristig nehmen in diesen Szenarien die Emissionen im Sektor Energiewirtschaft aufgrund des rückläufigen Stromverbrauchs wieder ab (Gaskraftwerke werden nicht mehr benötigt). Im Jahr 2100 liegen die Emissionen auch in diesen Szenarien wieder annähernd auf dem aktuellen Niveau. Am stärksten ist der Anstieg der Emissionen in SSP5-CH. Die Zunahme in SSP5-CH ist ebenfalls hauptsächlich auf den Zubau von Gaskraftwerken zur Stromproduktion zurückzuführen. Bis zum Jahr 2060 steigen die Emissionen im Sektor Energiewirtschaft auf rund 19 Mio. tCO₂eq und nehmen dann wieder ab (2100: 9 Mio. tCO₂eq).

Die Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft haben wir ausschliesslich von der Nutztierhaltung und der Düngerbewirtschaftung hergeleitet (weitere Emissionen beispielsweise aus Landnutzungsänderungen sind nicht berücksichtigt). Mit Ausnahme von SSP5-CH nehmen die Treibhausgasemissionen im Sektor Landwirtschaft in allen SSP-CH bis zum Jahr 2100 ab, am stärksten im SSP0-CH (-74 %). Es verbleibt jedoch ein Sockel an Treibhausgasemissionen in der Höhe von knapp 2 bis rund 5 Mio. tCO₂eq. Im SSP5-CH steigen die Treibhausgasemissionen durch die Intensivierung der Landwirtschaft und die Zunahme der Anzahl Nutztiere bis zum Jahr 2060 auf rund 10 Mio. tCO₂eq. Nach 2060, mit dem Rückgang der Bevölkerung, nehmen auch hier die Emissionen ab, verbleiben jedoch bis zum Jahr 2100 über dem Niveau des Jahres 2023. Die hohen Emissionen sind auf die hohe Selbstversorgung und den hohen Fleischkonsum zurückzuführen.

Aufgrund der unterschiedlichen Entwicklung in den Sektoren verändert sich im Zeitverlauf deren relative Bedeutung. Aktuell fallen rund 60 % der Emissionen in den Sektoren Gebäude und Verkehr an. Dieser Anteil nimmt in allen SSP-CH deutlich ab, auch in SSP5-CH. Demgegenüber steigen die Anteile der Sektoren Energiewirtschaft und Landwirtschaft, und in geringerem Ausmass auch der Anteil des Industriesektors, an den gesamten Treibhausgasemissionen in allen SSP-CH an. Zu beachten ist, dass carbon capture and storage (CCS) und Negativemissionstechnologien (NET) in den SSP-CH noch keine Anwendung finden, da wir annehmen, dass diese nur durch die SPA eingeführt werden.

Abbildung 81: Gesamte Treibhausgasemissionen der Schweiz pro SSP-CH gemäss Systemgrenze des Treibhausgasinventars (in Mio. tCO₂eq)



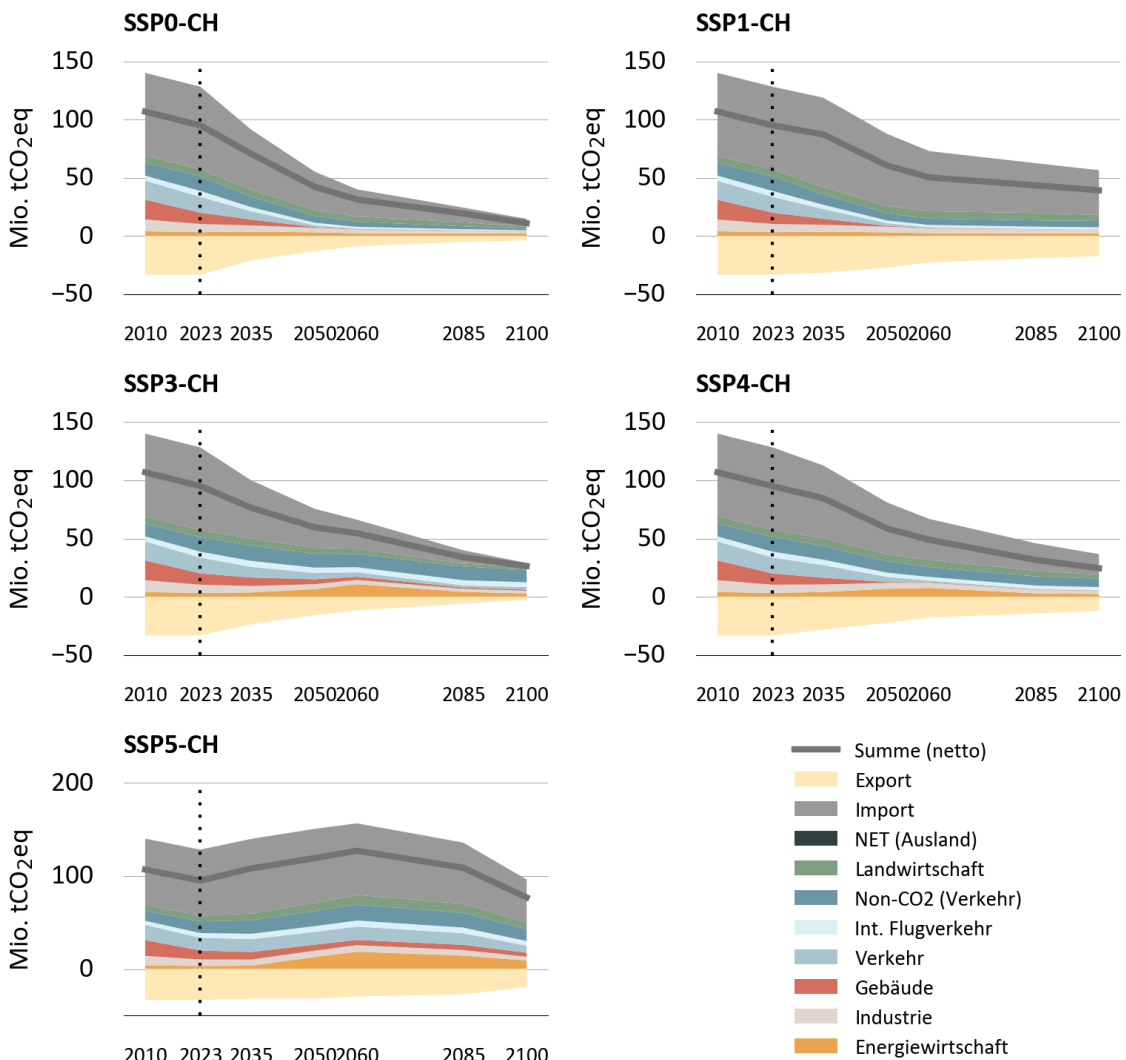
Hinweis: NET (Ausland) findet in den SSP-CH nicht statt, ist aber in der Legende trotzdem einhalten.
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS/Prognos.

Die bisherige Darstellung entspricht der Systemgrenze des Treibhausgasinventars. Werden die Emissionen des internationalen Flugverkehrs, die Nicht-CO₂-Wirkung des Flugverkehrs sowie die Netto-Emissionen der Importe und Exporte mitberücksichtigt, ergeben sich in allen Szenarien deutlich höhere Treibhausgasemissionen (Abbildung 82). Alle drei Bereiche haben aktuell (Jahr 2023) einen erheblichen Einfluss auf die Höhe der Treibhausgasemissionen der Schweiz. Dominant sind die importierten Emissionen. Mit Ausnahme von SSP0-CH, bei dem sowohl der internationale Handel als auch der Flugverkehr im Zeitverlauf sehr stark abnehmen, haben

diese Bereiche auch langfristig in allen SSP-CH einen erheblichen Effekt auf die Emissionen und tragen massgeblich zu den verbleibenden Restemissionen bei. Auch inklusive dieser Ergänzungen gilt, dass die Treibhausgasemissionen in allen SSP-CH im Jahr 2100 kleiner sind als im Jahr 2023. Dieser Rückgang erfolgt kontinuierlich, mit der Ausnahme von SSP5-CH, in dem die Emissionen zuerst ansteigen.

Abbildung 82: Gesamte Treibhausgasemissionen der Schweiz pro SSP-CH bei erweiterter Systemgrenze, d.h. inkl. Emissionen des int. Flugverkehrs, der Nicht-CO₂-Wirkung des Flugverkehrs und den Netto-Emissionen der Importe und Exporte (in Mio. tCO₂eq)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS/Prognos.

wird, (2) biogene Energieträger in der Industrie und (3) reine Biomassekraftwerke (BECCS). Diese inländischen negativen Emissionen sind nicht separat ausgewiesen, sondern Teil der Sektoren Energiewirtschaft und Industrie (und verringern somit dessen Emissionen). Negative Treibhausgasemissionen im Ausland sind separat ausgewiesen und deren Menge ist per Annahme fixiert.

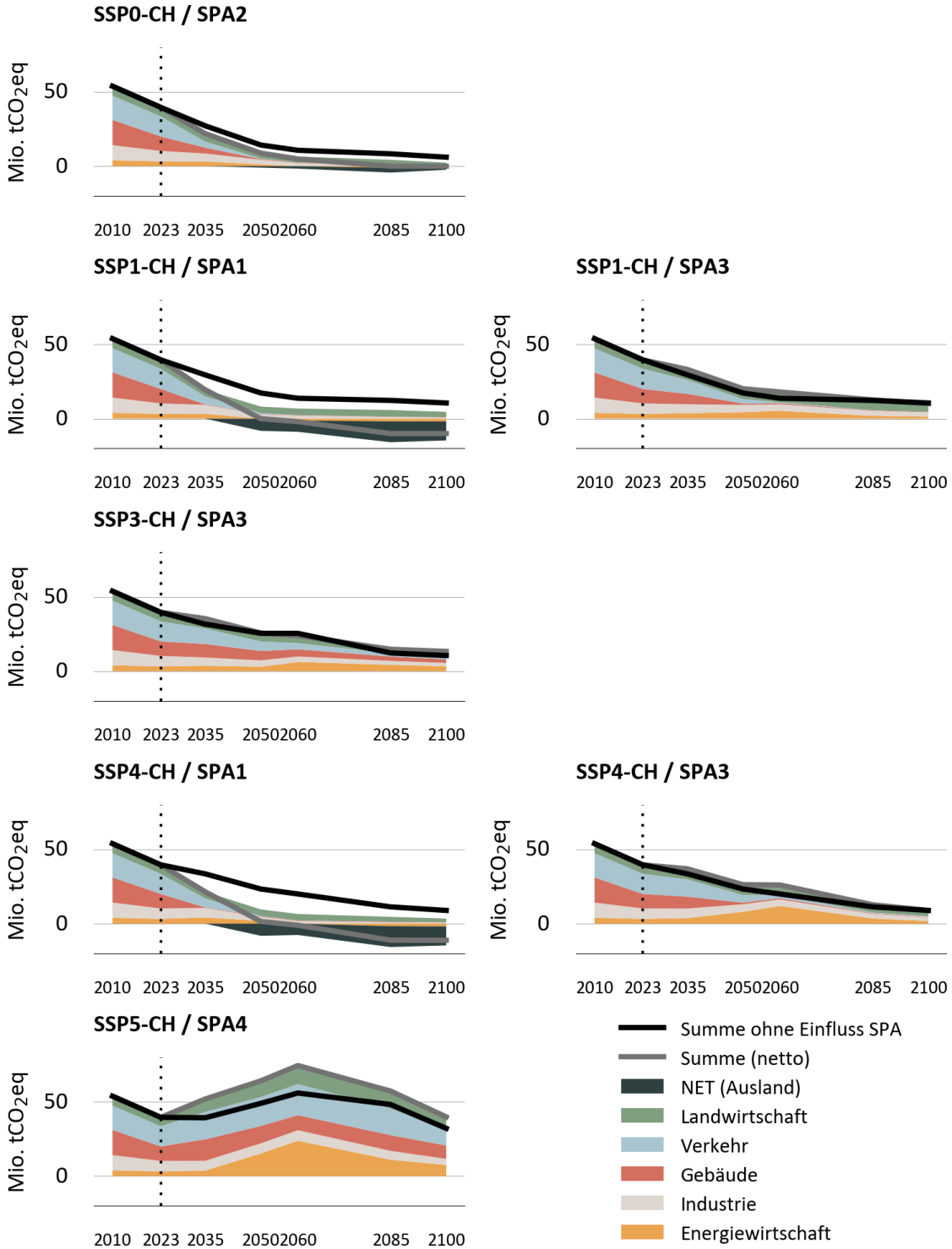
In den Kombinationen mit SPA1 betragen die gesamten negativen Emissionen in 2050 rund 10-12 Mio. tCO₂eq pro Jahr (Summe Inland und Ausland). Aufgrund der Vorgabe von SPA1 ab 2060 bilanziell negative Emissionen zu erzeugen, nimmt diese Menge im Zeitverlauf auf rund 14-15 Mio. tCO₂eq pro Jahr zu, so dass die Kombination mit SPA1 in der zweiten Jahrhunderthälfte netto-negativ sind

In der Kombination von SSP0-CH mit SPA2, welche das Ziel von Netto-Null, jedoch keine netto-negativen Emissionen verfolgt, wird das Netto-Null-Ziel im Jahr 2085 erreicht. Dazu werden jährliche negative Emissionen in der Höhe von etwa 5 Mio. tCO₂eq benötigt (Summe Inland und Ausland). Bis zum Jahr 2100 verringert sich diese Menge auf noch rund 3.5 Mio. tCO₂eq pro Jahr, weil die auszugleichenden Emissionen (verbleibende Restemissionen) abnehmen.

In SPA3 wird CCS nur in geringem Umfang eingesetzt und es werden keine negativen Emissionen erzeugt. In den Kombinationen von SSP1-CH und SSP4-CH mit SPA3 erhöhen sich die Treibhausgasemissionen im Jahr 2060 im Vergleich zu SPA0 um jeweils rund 30 % (rund +3-6 Mio. tCO₂eq). Unter anderem wird mehr Strom (und Wärme) aus Gaskraftwerken erzeugt. Nach 2060 verringern sich die Differenzen gegenüber SPA0, im Jahr 2100 unterscheiden sich die Emissionen nur noch wenig. In der Kombination SSP3-CH mit SPA3 liegen die Emissionen langfristig rund 3 Mio. tCO₂eq höher als in SPA0. Die zusätzlichen Emissionen fallen vor allem in den Sektoren Gebäude und Verkehr an. Im Sektor Energiewirtschaft werden die höheren Emissionen aus Gaskraftwerken teilweise durch den Einsatz von CCS bei Kehrrichtverwertungsanlagen kompensiert (bis -1 Mio. tCO₂eq).

In SPA4, welches mit SSP5-CH kombiniert wird, sind die Emissionen im Jahr 2060 um rund 30 % (+18 Mio. tCO₂eq) höher als in SPA0. Der Anstieg ist auf die Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude und Verkehr sowie in geringerem Umfang auf die Landwirtschaft zurückzuführen. Im Sektor Industrie verändern sich die Treibhausgasemissionen aufgrund der SPA4 nicht wesentlich. Nach 2060 verringert sich die Differenz, in 2100 beträgt die Differenz gegenüber SPA0 noch rund 8 Mio. tCO₂eq (+24 %). In SPA4 wird kein CCS eingesetzt und es werden keine negativen Emissionen erzeugt.

Abbildung 84: Treibhausgasemissionen der Schweiz pro SSP-CH und SPA gemäss Systemgrenze des Treibhausgasinventars (in Mio. tCO₂eq)

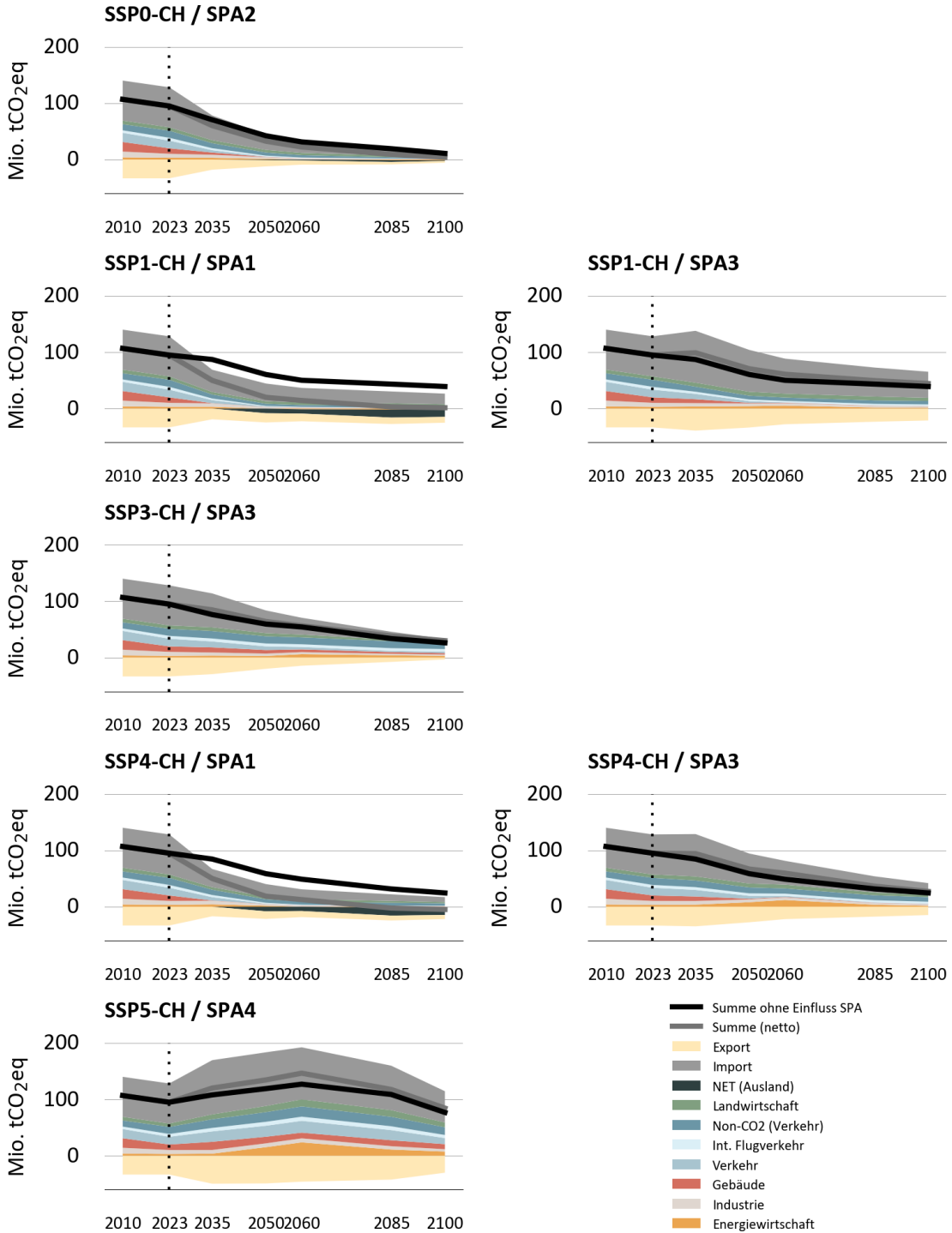


Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS/Prognos.

Die gesamten Treibhausgasemissionen der erweiterten Systemgrenze, d.h. inklusive derjenigen des internationalen Flugverkehrs, der Nicht-CO₂-Emissionen des Flugverkehrs sowie der Netto-Emissionen der Importe und Exporte, sind in Abbildung 85 dargestellt. Grundsätzlich zeigen sich in den zusätzlichen Sektoren bzw. Emissionsquellen dieselben Trends wie für die Sektoren innerhalb der Systemgrenzen des Treibhausgasinventars. Auffällig ist, dass Netto-Null in der erweiterten Systemgrenze in den Kombinationen mit SPA1 und SPA2 viel später bzw. gar nicht erreicht wird, v.a. wegen des Einflusses der importierten Emissionen (und in geringem Umfang auch des internationalen Flugverkehrs). Um Netto-Null auch bei den erweiterten Systemgrenzen zu erreichen, müssten mehr negative Emissionen erzeugt werden (oder die direkten und indirekten Emissionen stärker verringert werden).

Abbildung 85: Gesamte Treibhausgasemissionen der Schweiz pro SSP-CH und SPA bei erweiterter Systemgrenze, d.h. inkl. Emissionen des int. Flugverkehrs, den Nicht-CO₂-Emissionen des Flugverkehrs und den Netto-Emissionen der Importe und Exporte (in Mio. tCO₂eq)



Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH und SPA siehe Glossar.

Grafik INFRAS/Prognos.

Annex

A1. Übersicht Szenarioparameter

Tabelle34: Übersicht Szenarioparameter (ohne Landnutzung)

Szenarioparameter (Wirkspektrum)	Energie- wirtschaft	Verkehr	Gebäude	Industrie	Land- wirtschaft	Import/ Export
Sektorübergreifende Parameter (für mehrere Sektoren)						
Wohnbevölkerung (spezifische Vorgaben)		x	x	x	x	x
BIP pro Kopf (spezifische Vorgaben)		x	x	x		
Umweltbewusstsein (-50% / +100%)	x	x	x			
Innovationstätigkeit (-50% / +100%)		x	x	x	x	
Anteil erneuerbarer am Gesamtmix (-20%/+100%)	x	x	x	x		
Wohnraum pro Kopf (-22%/+22%)			x	x		
Individuelles Konsumniveau (-50%/+25%)*			x	x		x
Produktnutzungsdauer (-33% / +33%)*		x		x		
Verdichtungslevel (-25%/+50%)		x	x			
Spezifische Parameter (für nur einen Sektor)						
Selbstversorgungsgrad	x					
Akzeptanz & Wirtschaftlichkeit Wasserkraft	x					
Akzeptanz & Wirtschaftlichkeit Kernkraft	x					
Akzeptanz & Wirtschaftlichkeit fossile Energie	x					
Güterverkehr		x				
Personenkilometer pro Person		x				
Anteil BEV am Flottenmix		x				
Verbreitung Wasserstoff als Energieträger		x				
Flugverkehr (SSP4)		x				
Fokus Langsamverkehr		x				
Fokus ÖV		x				
Fläche Ackerbau		x				
Urbanisierungsgrad			x			
Anteil Wärmepumpe am Heizungsmix			x			
Produktion energieintensiver Unternehmen				x		
Internationale Handelsströme				x		
Ökonomische Integration				x		

Ausbildungsstand/Qualifikation	x
Effizienz in der Produktion	x
Wertschätzung Natur	x
Technologie-Akzeptanz	x
Tierbestand pro Kopf	x
Exporte	x
Importe	x

* Im Modul Industrie wurde eine andere Bandbreite verwendet.

Tabelle INFRAS.

A2. Ergänzende Informationen für Sektor Import und Export

Tabelle 35: Ausgangsdaten für Import- und Exportmengen (BAZG, 2023) und produktspezifische Emissionsfaktoren (EBP, 2022).

SIT C #	Produktkategorie	Emissionsfaktor in kg CO ₂ eq / kg Produkt (EBP 2022)	Import in kg (BAZG 2023)	Export in kg (BAZG 2023)
00	Lebende Tiere, andere als solche des Abschnitts 03	5.84	4'473'823	2'875'572
01	Fleisch und Fleischzubereitungen	13.54	118'421'245	23'390'204
02	Molkereiprodukte und Vogeleier	3.38	174'119'627	134'876'690
03	Fische (ausg. Meeressäugetiere), Krebstiere, Weichtiere und andere wirbellose Wassertiere und Zubereitungen daraus	2.89	77'264'293	205'539
04	Getreide und Getreidezubereitungen	0.94	1'447'123'672	91'161'159
05	Gemüse und Obst	0.89	1'591'967'507	29'533'678
06	Zucker, Zuckerwaren und Honig	0.61	255'602'945	44'083'496
07	Kaffee, Tee, Kakao, Gewürze und Waren daraus	9.27	386'142'739	281'351'619
08	Tierfutter (ausgenommen ungemahlene Getreide)	0.91	1'364'968'007	148'698'345
09	Verschiedene geniessbare Waren und Zubereitungen	3.79	213'025'043	213'966'813
11	Getränke	0.53	1'224'343'710	2'770'337'624
12	Tabak und verarbeitete Tabakwaren	1.32	21'709'716	22'235'294
21	Rohe Häute, Felle und Pelzfelle	7.17	197'440	14'945'286
22	Ölsaaten und ölhaltige Früchte	0.78	35'373'667	375'972
23	Rohkautschuk (einschliesslich synthetischen und aufgearbeiteten Kautschuks)	4.63	38'637'697	7'589'689
24	Kork und Holz	0.16	993'645'507	869'658'827
25	Papierhalbstoffe und Abfälle von Papier	0.61	347'052'184	505'315'428
26	Spinnstoffe (andere als andere gekämmte Wolle) und ihre Abfälle (nicht in Garn oder Gewebe hergestellt)	5.17	28'995'684	62'701'980
27	Düngermittel roh, ausgenommen solche des Abschnitts 56, und mineralische Rohstoffe (ausgenommen Steinkohle, Erdöl und Edelsteine)	0.12	8'966'135'547	3'175'254'388
28	Metallurgische Erze und Metallabfälle	0.22	600'504'134	984'273'584
29	Rohstoffe tierischen und pflanzlichen Ursprungs, a.n.g.	0.81	276'493'133	150'975'480

SIT C #	Produktkategorie	Emissionsfaktor in kg CO ₂ eq / kg Produkt (EBP 2022)	Import in kg (BAZG 2023)	Export in kg (BAZG 2023)
32	Steinkohle, Koks und Steinkohlenbriketts	0.69	225'962'314	405'070
33	Erdöl, Erdölnebenerzeugnisse und verwandte Materialien	0.66	8'773'148'261	1'140'647'521
34	Gas, auch hergestellt	0.06	2'479'817'897	8'159'630
41	Tierische Öle und Fette	1.64	14'699'180	1'708'151
42	Pflanzliche Fette und Öle, roh oder raffiniert, sowie deren Fraktionen	3.01	125'893'812	1'383'018
43	Tierische oder pflanzliche Fette und Öle, verarbeitet; Wachse; ungeniessbare Mischungen und Zubereitungen von tierischen oder pflanzlichen Fetten oder Ölen, a.n.g.	2.45	20'014'191	18'841'216
51	Organische chemische Erzeugnisse	2.82	1'356'716'569	312'916'853
52	Anorganische chemische Erzeugnisse	1.92	756'468'184	196'441'717
53	Gerb oder Farbstoffauszüge und Farbstoffe	1.96	317'277'029	163'229'800
54	Medizinische und pharmazeutische Erzeugnisse	9.61	79'313'753	118'654'389
55	Ätherische Öle und Resinoide und Riechstoffe; zubereitete Riechstoffe, Körperpflege und Schönheitsmittel	2.26	268'526'166	200'159'451
56	Düngemittel (ausgenommen solche der Gruppe 272)	3.58	265'188'942	8'151'536
57	Kunststoffe in Primärformen	3.86	991'038'196	455'071'939
58	Kunststoffe, nicht in Primärformen	3.82	372'266'918	247'151'070
59	Verschiedene Erzeugnisse der chemischen Industrie, a.n.g.	2.1	1'995'258'438	1'489'813'562
61	Leder, Lederwaren, a.n.g., und Pelzfelle	6.09	1'847'079	336'252
62	Kautschukwaren, a.n.g.	2.66	167'787'546	61'530'697
63	Kork und Holzwaren (ausgenommen Möbel), a.n.g.	1.02	879'757'773	404'702'929
64	Papiere und Pappen; Waren aus Zellstoff, Papier oder Pappe	1.41	1'155'334'023	911'483'222
65	Garne und Waren aus Spinnstoffen, a.n.g.	13.05	192'786'546	58'399'784
66	Mineralische Stoffe, nicht metallisch, a.n.g.	0.96	3'052'172'674	718'018'261
67	Eisen und Stahl	2.31	2'369'552'967	931'370'419
68	Nichteisenmetall	6.61	779'377'978	444'761'737
69	Waren aus Metallen, a.n.g.	7.35	842'623'944	388'133'708
71	Energieerzeugungsmaschinen und mittel	3.72	71'597'865	84'595'273
72	Spezialisierte Maschinen für besondere Zwecke	3.87	223'531'813	157'816'669
73	Maschinen für die Metallbearbeitung	4.38	55'098'797	80'907'142
74	Maschinen, Apparate und Geräte für allgemeiner industrieller Zweck, a.n.g., und Teile davon, a.n.g.	2.82	417'631'496	236'426'351
75	Büromaschinen und automatische Datenverarbeitungsmaschinen	16.46	33'981'634	9'906'536
76	Fernmeldegeräte und Tonaufnahme und Tonwiedergabegeräte	26.01	36'934'665	4'596'235
77	Elektrische Maschinen, Apparate und Geräte, a.n.g., und elektrische Teile davon (einschl. nicht elektrischen Gegenstücke, a.n.g., mit elektrischen Haushaltsgeräten)	12.25	422'807'706	211'322'322
78	Strassenfahrzeuge (einschl. Luftkissen Fahrzeuge)	4.82	759'615'904	382'826'307
79	Anderes Verkehrsmaterial	5.08	61'072'635	50'244'115

SIT C #	Produktkategorie	Emissionsfaktor in kg CO ₂ eq / kg Produkt (EBP 2022)	Import in kg (BAZG 2023)	Export in kg (BAZG 2023)
81	Vorgefertigte Gebäude; Sanitäre Anlagen, Heizungs- und Beleuchtungseinrichtungen und Zubehör, a.n.g.	7.52	125'919'658	24'129'953
82	Möbel und Teile davon; Bettausstattungen, Sprungrahmen und ähnliche Waren	5.29	509'970'783	56'994'104
83	Reiseartikel, Handtaschen und ähnliche Behälter	8.03	23'612'196	6'091'524
84	Bekleidung und Bekleidungszubehör	27.4	126'230'113	22'272'376
85	Schuhe	8	38'409'993	7'655'486
87	Optische Instrumente, Apparate und Geräte, a.n.g.	15.79	47'122'931	42'839'801
88	Fotografische Apparate und Ausrüstungen und optische Waren, a.n.g.; Uhrmacherwaren	18.03	8'619'754	2'081'091
89	Verschiedene Waren, a.n.g.	4.34	678'332'347	273'335'871
93	Besondere Warenverkehrsvorgänge und Waren, nicht nach Beschaffenheit gegliedert	2.99	2'668'865	63'872'611

Table INFRAS. Source: EBP 2022; BAZG 2023 .

Tabelle36: Zuteilung der Produktgruppen und -kategorien aus der Zollstatistik (nach SITC) zu den Branchen und Untergruppen des Industrie-Sektormodells

Kategorisierung der Zollstatistik	
Produktgruppe	Produktkategorie
Branche Industriemodell: Grundstoffe/Baustoffe	
▪ Grundstoffchemikalien	
Rohstoffe	Düngermittel roh, ausgenommen solche des Abschnitts 56, und mineralische Rohstoffe (ausgenommen Steinkohle, Erdöl und Edelsteine)
Chemische Erzeugnisse	Organische chemische Erzeugnisse Anorganische chemische Erzeugnisse Düngemittel (ausgenommen solche der Gruppe 272) Kunststoffe in Primärformen
▪ Metalle	
Bearbeitete Waren	Eisen und Stahl Nichteisenmetall Waren aus Metallen, a.n.g.
▪ Mineralien	
Rohstoffe	Metallurgische Erze und Metallabfälle
Bearbeitete Waren	Mineralische Stoffe, nicht metallisch, a.n.g.
▪ Chemie/Pharma	
Rohstoffe	Rohstoffe tierischen und pflanzlichen Ursprungs, a.n.g..
Chemische Erzeugnisse	Gerb- oder Farbstoffauszüge und Farbstoffe

Kategorisierung der Zollstatistik	
Produktgruppe	Produktkategorie
Branche Industriemodell: Grundstoffe/Baustoffe	
▪ <i>Grundstoffchemikalien</i>	
Rohstoffe	Düngermittel roh, ausgenommen solche des Abschnitts 56, und mineralische Rohstoffe (ausgenommen Steinkohle, Erdöl und Edelsteine)
Chemische Erzeugnisse	Organische chemische Erzeugnisse
	Anorganische chemische Erzeugnisse
	Düngemittel (ausgenommen solche der Gruppe 272)
	Kunststoffe in Primärformen
▪ <i>Metalle</i>	
Bearbeitete Waren	Eisen und Stahl
	Medizinische und pharmazeutische Erzeugnisse
	Ätherische Öle und Resinoide und Riechstoffe; zubereitete Riechstoffe, Körperpflege und Schönheitsmittel
	Verschiedene Erzeugnisse der chemischen Industrie, a.n.g.
Branche Industriemodell: Weiterverarbeitete Güter	
▪ <i>Gummi/Kunststoff</i>	
Rohstoffe	Rohkautschuk (einschliesslich synthetischen und aufgearbeiteten Kautschuks)
Chemische Erzeugnisse	Kunststoffe, nicht in Primärformen
Bearbeitete Waren	Kautschukwaren, a.n.g.
▪ <i>Maschinen/Geräte</i>	
Maschinenbauerzeugnisse und Fahrzeuge	Energieerzeugungsmaschinen und mittel
	Spezialisierte Maschinen für besondere Zwecke
	Maschinen für die Metallbearbeitung
	Maschinen, Apparate und Geräte für allgemeinen industriellen Zweck, a.n.g., und Teile davon, a.n.g.
	Büromaschinen und automatische Datenverarbeitungsanlagen
	Fernmeldegeräte und Tonaufnahme- und Tonwiedergabegeräte
	Elektrische Maschinen, Apparate und Geräte, a.n.g., und elektrische Teile davon (einschl. nicht elektrischen Gegenständen, a.n.g., mit elektrischen Haushaltsgeräten)
	Vorgefertigte Gebäude; sanitäre Anlagen, Heizungs- und Beleuchtungseinrichtungen und Zubehör, a.n.g.
	Optische Instrumente, Apparate und Geräte, a.n.g.
	Fotografische Apparate und Ausrüstungen und optische Waren, a.n.g.; Uhrmacherwaren
Verschiedene Waren, a.n.g.	
Verschiedene Fertigwaren	

Kategorisierung der Zollstatistik	
Produktgruppe	Produktkategorie
Branche Industriemodell: Grundstoffe/Baustoffe	
▪ <i>Grundstoffchemikalien</i>	
Rohstoffe	Düngermittel roh, ausgenommen solche des Abschnitts 56, und mineralische Rohstoffe (ausgenommen Steinkohle, Erdöl und Edelsteine)
Chemische Erzeugnisse	Organische chemische Erzeugnisse Anorganische chemische Erzeugnisse Düngemittel (ausgenommen solche der Gruppe 272) Kunststoffe in Primärformen
▪ <i>Metalle</i>	
Bearbeitete Waren	Eisen und Stahl
Branche Industriemodell: Konsumgüter	
▪ <i>Andere Industrien</i>	
Rohstoffe	Kork und Holz
Bearbeitete Waren	Kork- und Holzwaren (ausgenommen Möbel), a.n.g.
Verschiedene Fertigwaren	Möbel und Teile davon; Bettausstattungen, Sprungrahmen und ähnliche Waren
Sonstige	Besondere Warenverkehrsvorgänge und Waren, nicht nach Beschaffenheit gegliedert
▪ <i>Nahrungsmittel</i>	
Nahrungsmittel und lebende Tiere	Lebende Tiere, andere als solche des Abschnitts 03 Fleisch und Fleischzubereitungen Molkereiprodukte und Vogeleier Fische (ausg. Meeressäugtiere), Krebstiere, Weichtiere und andere wirbellose Wassertiere und Zubereitungen daraus Getreide und Getreidezubereitungen Gemüse und Obst Zucker, Zuckerwaren und Honig Kaffee, Tee, Kakao, Gewürze und Waren daraus Tierfutter (ausgenommen ungemahlene Getreide) Verschiedene genießbare Waren und Zubereitungen
Getränke und Tabak	Getränke Tabak und verarbeitete Tabakwaren
Rohstoffe	Ölsaaten und ölhaltige Früchte
Tierische und pflanzliche Öle, Fette und Wachse	Tierische Öle und Fette Pflanzliche Fette und Öle, roh oder raffiniert, sowie deren Fraktionen

Kategorisierung der Zollstatistik**Produktgruppe****Produktkategorie****Branche Industriemodell: Grundstoffe/Baustoffe**▪ *Grundstoffchemikalien*

Rohstoffe	Düngermittel roh, ausgenommen solche des Abschnitts 56, und mineralische Rohstoffe (ausgenommen Steinkohle, Erdöl und Edelsteine)
Chemische Erzeugnisse	Organische chemische Erzeugnisse
	Anorganische chemische Erzeugnisse
	Düngemittel (ausgenommen solche der Gruppe 272) Kunststoffe in Primärformen

▪ *Metalle*

Bearbeitete Waren	Eisen und Stahl
	Tierische oder pflanzliche Fette und Öle, verarbeitet; Wachse; ungenießbare Mischungen und Zubereitungen von tierischen oder pflanzlichen Fetten oder Ölen, a.n.g.

▪ *Papier/Druck*

Bearbeitete Waren	Papiere und Pappen; Waren aus Zellstoff, Papier oder Pappe
Rohstoffe	Papierhalbstoffe und Abfälle von Papier

▪ *Textil/Leder*

Rohstoffe	Rohe Häute, Felle und Pelzfelle
	Spinnstoffe (andere als andere gekämmte Wolle) und ihre Abfälle (nicht in Garn oder Gewebe hergestellt)
Bearbeitete Waren	Leder, Lederwaren, a.n.g., und Pelzfelle
	Garne und Waren aus Spinnstoffen, a.n.g.
Verschiedene Fertigwaren	Reiseartikel, Handtaschen und ähnliche Behältnisse
	Bekleidung und Bekleidungszubehör
	Schuhe

Tabelle37: Zuordnung Produktgruppen zu Branchen und zu Nachfrage-Bereichen

Nachfragebereiche / Sektoren	Industrie-Branche	Industrie-Untergruppe (Beispiel)	Typische SITC-Gruppen (Beispiele)
Ernährung	Konsumgüter	Nahrungsmittel	Lebende Tiere, Fleisch, Obst, Getreide, Getränke, Tabak
	Grundstoffe/Baustoffe	Grundstoffchemikalien	Düngemittel, chem. Vorprodukte
	Weiterverarb. Güter	Chemie/Pharma	Pflanzenöle, tierische Öle, pharmazeutische Stoffe
Industrie	Konsumgüter	Textil/Leder, Papier/Druck	Lederwaren, Papier, Textilien
	Grundstoffe/Baustoffe	Metalle, Mineralien	Eisen/Stahl, Nichteisenmetalle, Minerale
	Weiterverarb. Güter	Maschinen/Geräte, Chemie/Pharma	Maschinen, Chemikalien, Pharmazeutika
Wohnen	Grundstoffe/Baustoffe	Metalle, Mineralien	Erze, Baustoffe, vorgefertigte Bauelemente
	Konsumgüter	Textil/Leder	Möbel, Haushaltswaren
Konsum	Konsumgüter	Textil/Leder, andere Industrien	Möbel, Haushaltswaren, Spielzeug
Sonstiger Konsum	Konsumgüter	Textil/Leder, Papier/Druck	Kleidung, Schuhe, Taschen
	Weiterverarb. Güter	Maschinen/Geräte, Chemie/Pharma	Kosmetika, Elektronik, optische Instrumente

Tabelle INFRAS.

A3. Methodik zur Skalierung von Anteilen

Ein einigen Fällen sind die Modellparameter Anteile (z.B. Anteil Energieträger am Heizungsmix). Wenn Anteile durch die Wirkungsmatrix verändert werden, ist in der Regel nicht gewährleistet, dass sie nach der Änderung in der Summe 100% ergeben. In einem solchen Fall führen wir eine Skalierung durch. Das folgende illustrative Beispiel zeigt dieses Vorgehen. Nachdem die Wirkung des SSP berücksichtigt ist, resultiert eine Summe von 130%. Wir skalieren im Folgenden aber nicht alle Werte linear nach unten, sondern gehen davon aus, dass der Zuwachs allein durch den Anteil kompensiert wird, der gemäss der Wirkungsmatrix nicht beeinflusst wird. Im Beispiel würde der Zuwachs von total 30% allein durch eine Reduktion von Gas kompensiert werden.

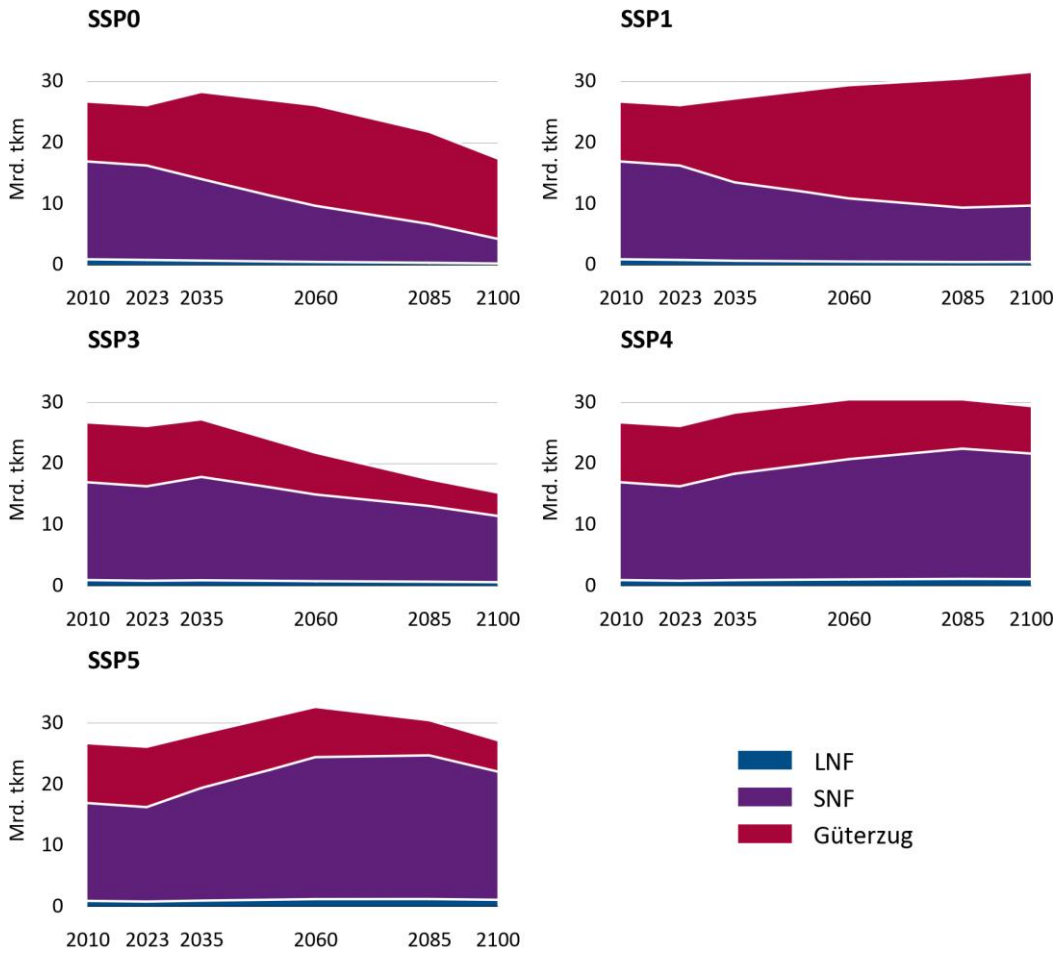
Illustratives Beispiel:

Energieträger	Anteil Start	Wirkung SPP	Anteil unskaliert	Folgeanpassungen	Finale Aufteilung
Erdgas	50%	-	50%	-30 PP	20%
Wärmepumpe	40%	+20 PP	60%	-	60%
Erneuerbar	10%	+10 PP	20%	-	20%
Total	100%	+30 PP	130%		100%

In gewissen Fällen wird der Anteil eines Elements durch die Wirkung der SPP erhöht und parallel dazu ein anderer Anteil reduziert (z.B. Wirkung SPP: Erdgas -10PP; Wärmepumpe +20PP). In solchen Fällen wenden wir ein analoges Verfahren an, um auch hier sicherzustellen, dass die finale Summe der Anteile 100% ergibt.

A4. Weitere Grafiken der Sektormodelle

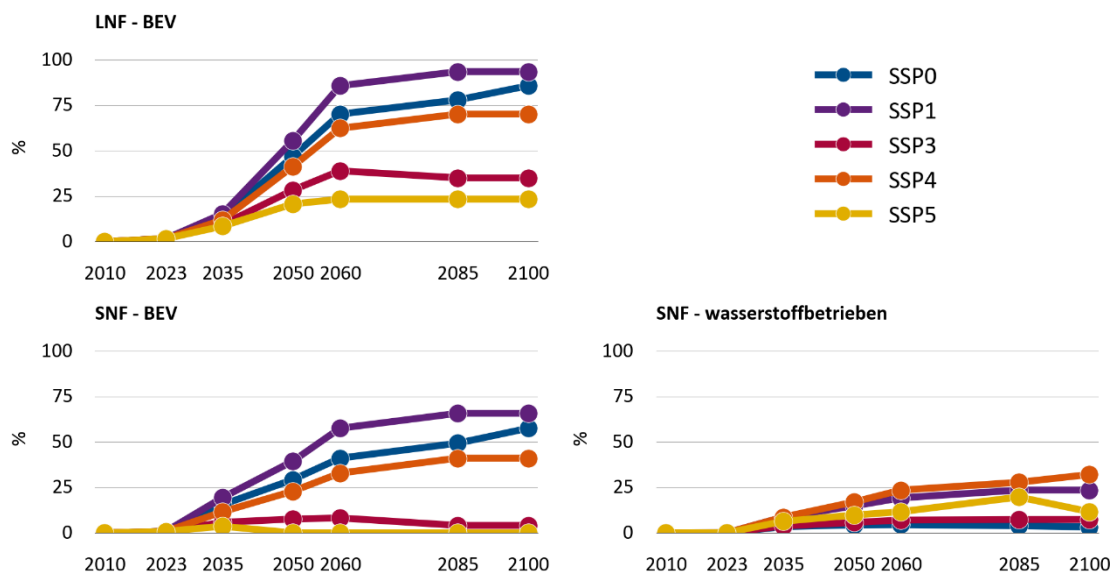
Abbildung 86: Verkehrsleistung Güterverkehr nach Verkehrsmittel in Mrd. tkm



LNF = Leichte Nutzfahrzeuge, SNF = Schwere Nutzfahrzeuge.
Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

Abbildung 87: Anteil der BEV und wasserstoffbetriebenen Fahrzeuge im Güterverkehr



LNF = Leichte Nutzfahrzeuge, SNF = Schwere Nutzfahrzeuge. Die Entwicklung der Non-Road-Maschinen verläuft analog den LNF und SNF, mit einem Zeitschritt Verzögerung.

Für eine Beschreibung der Abkürzungen der SSP-CH siehe Glossar.

Grafik INFRAS.

A5. Quellenverzeichnis

Albisser, T. K., Julian Schmidli and Pascal. (2025, Juli 25). Silent power guzzlers: Switzerland's booming data centres. *SWI Swissinfo.Ch*. <https://www.swissinfo.ch/eng/swiss-ai/silent-power-guzzlers-switzerlands-booming-data-centres/89724159>

Allen, M., Tanaka, K., Macey, A., Cain, M., Jenkins, S., Lynch, J., & Smith, M. (2021). Ensuring that offsets and other internationally transferred mitigation outcomes contribute effectively to limiting global warming. *Environmental Research Letters*, 16(7), 074009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfcf9>

Altenbuger, A. (2025, August 28). *KI, Energiebedarf – eine Herausforderung? Lösungsansätze für den steigenden Energiebedarf in Rechenzentren*.

Black, B., Adde, A., Farinotti, D., Guisan, A., Külling, N., Kurmann, M., Martin, C., Mayer, P., Rabe, S.-E., Streit, J., Zekollari, H., & Grêt-Regamey, A. (2024). Broadening the horizon in land use change modelling: Normative scenarios for nature positive futures in Switzerland. *Regional Environmental Change*, 24(3), 115. <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02261-0>

Bundesamt für Energie (BFE). (2022, Oktober 20). *Energieperspektiven 2050+*. Bundesamt für Energie (BFE). <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050plus/energieperspektiven-2050plus.html>

Bundesamt für Energie (BFE). (2024a). *Schweizerische Elektrizitätsstatistik 2023*. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html>

Bundesamt für Energie (BFE). (2024b). *Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2023*. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.html>

Bundesamt für Energie (BFE), Sektion Wasserkraft. (2025). *Stand der Wasserkraftnutzung in der Schweiz am 31. Dezember 2024*. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/erneuerbare-energien/wasserkraft.html>

Bundesamt für Raumentwicklung (ARE). (2022, Mai 11). *Verkehrsperspektiven 2050*. ARE - Verkehrsperspektiven 2050. <https://www.aren.admin.ch/de/verkehrsperspektiven>

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2015). *Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-road-Sektors* (No. UW-1519-D; Umwelt-Wissen). Bundesamt für Umwelt (BAFU). <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/energieverbrauch-und-schadstoffemissionen-des-non-road-sektors.html>

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2021). *Klimastrategie 2050* [Online-Artikel]. Bundesamt für Umwelt (BAFU). <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimapolitik/ziele-und-strategien/langfristige-klimastrategie-2050.html>

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2025a). *Emissionen von Treibhausgasen nach CO₂-Gesetz und Übereinkommen von Paris (Version Juli 2025)*. Bundesamt für Umwelt (BAFU). <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/emissionen-von-treibhausgasen-nach-co2-gesetz-und-uebereinkommen-von-paris.html>

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2025b). *Kenngrossen zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen in der Schweiz 1990-2023*. Bundesamt für Umwelt (BAFU).

https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/en/dokumente/klima/fachinfo-daten/kenngrossen_thg_emissionen_schweiz.pdf.download.pdf/Kenngrossen_2025_DE.pdf

Bundesamt für Umwelt (BAFU). (2025c, Januar 29). *Langfristige Klimastrategie 2050*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-klima/klimapolitik/ziele-und-strategien/langfristige-klimastrategie-2050.html>

de Vries, A. (2023). The growing energy footprint of artificial intelligence. *Joule*, 7(10), 2191–2194. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004>

Der Bundesrat. (2021, Januar 28). *Klimaschutz: Bundesrat verabschiedet die langfristige Klimastrategie der Schweiz*. <https://www.news.admin.ch/de/nsb?id=82140>

Gubler L., Tschumi P., Pütz M., Seidl I. (2026). *SSP-CH – Sozioökonomische Szenarien für die Schweiz. Grundlagen, Methoden und Resultate*. WSL Ber. 193. <https://doi.org/10.55419/wsl:42764>

Hoppe, J., Hinder, B., Rafaty, R., Patt, A., & Grubb, M. (2023). Three Decades of Climate Mitigation Policy: What Has It Delivered? *Annual Review of Environment and Resources*, 48(1), 615–650. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112321-103821>

International Energy Agency. (2020). *Electricity Market Report*. OECD. <https://doi.org/10.1787/f0aed4e6-en>

Jakob, M., Müller, J., & Altenburger, A. (2021). *Rechenzentren in der Schweiz—Stromverbrauch und Effizienzpotenzial*. Bundesamt für Energie (BFE). <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/66075.pdf>

Lamb, W. F., Grubb, M., Diluiso, F., & Minx, J. C. (2022). Countries with sustained greenhouse gas emissions reductions: An analysis of trends and progress by sector. *Climate Policy*, 22(1), 1–17. <https://doi.org/10.1080/14693062.2021.1990831>

Lee, D. S., Fahey, D. W., Skowron, A., Allen, M. R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S. J., Freeman, S., Forster, P. M., Fuglestad, J., Gettelman, A., De León, R. R., Lim, L. L., Lund, M. T., Millar, R. J., Owen, B., Penner, J. E., Pitari, G., Prather, M. J., ... Wilcox, L. J. (2021). The

contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>

Neu, U. (2022). *Climate effect and CO2 equivalent emissions of short-lived substances*. Swiss Academies of Arts and Sciences. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6343974>

Schmid, N., Eichler, M., Reisser, M., Füssler, J., Coroamă, V., Dumbravă, O., & Kaack, L. H. (2025). *Carbon leakage in AI-driven data center growth?* (S. 64). German Environment Agency. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7756>

Oberpriller, Q. Schmid, S., Bogler, S., Giger, D. und Füssler, J.; Kemmler, A., Piégisa, A., Kreidelmeyer, S., Vu, M. P., Brutsche, A. und Kirchner, A.; Zwahlen, J.; Black, B.; Gubler, L (2026). Treibhausgasemissionen unter verschiedenen sozioökonomischen und klimapolitischen Szenarien für die Schweiz. National Center for Climate Services NCCS. <https://ssp-ch-szenarien.wsl.ch/de/publikationen> oder <https://doi.org/10.55419/wsl:42756>

Schweizer Akademien der Wissenschaften (SCNAT). (2021). *Die Auswirkungen der Flugverkehrsemissionen auf das Klima*. SCNAT. https://scnat.ch/de/uuid/i/81d6af2e-432d-5dff-b961-b50e788704e8-Die_Auswirkungen_der_Flugverkehrsemissionen_auf_das_Klima

Stechemesser, A., Koch, N., Mark, E., Dilger, E., Klösel, P., Menicacci, L., Nachtigall, D., Pretis, F., Ritter, N., Schwarz, M., Vossen, H., & Wenzel, A. (2024). Climate policies that achieved major emission reductions: Global evidence from two decades. *Science*, 385(6711), 884–892. <https://doi.org/10.1126/science.adl6547>

Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere*, 13(4), 1125–1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>