



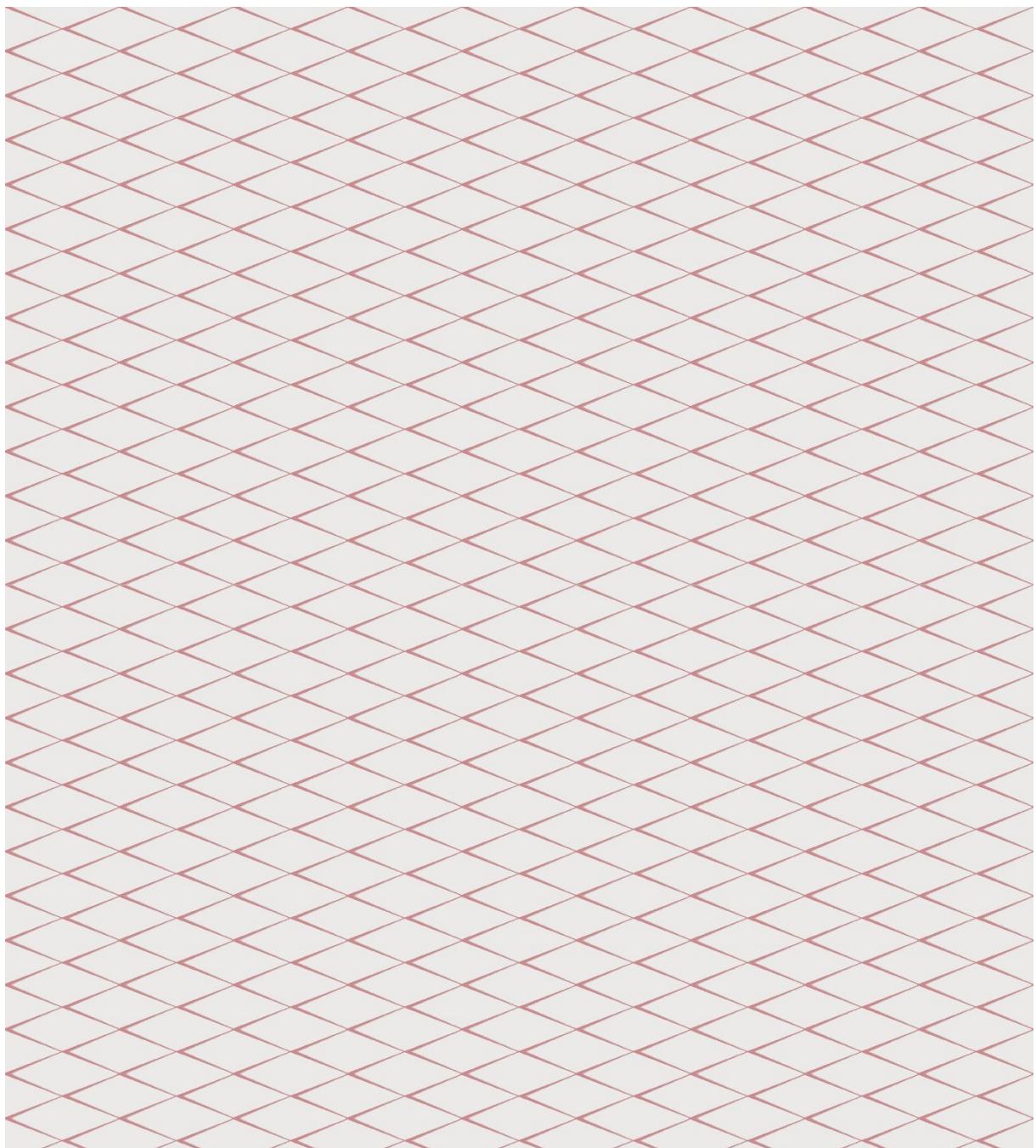
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Bericht vom 02. Juni 2021

Sichtbarmachung der Schweiz auf der electricitymap.org und Rechenzentren-Assessment





Datum: 02. Juni 2021

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer/in:

EBP Schweiz AG
Mühlebachstrasse 11
8032 Zürich
Schweiz
Telefon +41 44 395 16 16
info@ebp.ch
www.ebp.ch

Autor/in:

Kristof Kölker, EBP Schweiz AG
Rafael Brunner, EBP Schweiz AG

BFE-Bereichsleitung: Dr. Matthias Galus, matthias.galus@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung: Dr. Fabian Heymann, fabian.heymann@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/600518-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bundesamt für Energie BFE

Pulverstrasse 13, CH-3063 Ittigen; Postadresse: Bundesamt für Energie BFE, CH-3003 Bern
Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch

Inhaltsverzeichnis

1	Berechnung der CO ₂ Intensität auf electricitymap.org.....	4
1.1	Grundlagen	4
1.2	Methodik zur Schätzung des CO ₂ -Fussabdrucks	4
1.3	Situation Schweiz & Projekthistorie	6
2	Verbesserung der Datenqualität der Schweizer Stromproduktion.....	7
2.1	Annahmen.....	7
2.2	Berechnung der CO ₂ -Intensität der Kategorie «Unbekannt»	8
2.3	Validierung mit Stromproduktionsdaten der Swissgrid	9
2.4	Validierung mit BFE Monatsstatistik	11
3	Abschätzung der CO ₂ Erzeugung in Schweizer Rechenzentren	13
3.1	Stromverbrauch in Schweizer Rechenzentren	13
3.2	Anteil erneuerbare Energie am Stromverbrauch Schweizer Rechenzentren.....	14
3.3	Anteil Importierter Strom am Verbrauch von Rechenzentren	14
3.4	Stündlich aufgelöste Emissionen durch Schweizer Rechenzentren.....	15
4	Aufteilung der in Rechenzentren entstandenen Emissionen auf Dienste	16
5	Literaturverzeichnis	19
6	Anhang.....	20
6.1	Electricitymap Parser für die Schweiz	20
6.2	Folien zur Validierung	22
6.3	Abschätzung der typischen Lastkurve für Schweizer Rechenzentren	29

1 Berechnung der CO₂ Intensität auf electricitymap.org

1.1 Grundlagen

Auf der Website electricitymap.org wird die CO₂ Intensität von Strom in verschiedenen Ländern und Regionen der Welt in Echtzeit visualisiert. Echtzeit wird hierbei definiert als eine Datengrundlage, die mit einer Mindestfrequenz von einem Tag und einem Verzug von maximal 2 Stunden aktualisiert wird. Für die meisten Länder werden die Daten mit stündlicher Frequenz veröffentlicht. Die so entstehende Transparenz soll Verbrauchern helfen den CO₂-Fussabdruck von ihrem Konsum besser abschätzen zu können.

Die wichtigste Kennzahl auf electricitymap.org ist die die CO₂-Intensität vom verbrauchten Strom in $\frac{gCO_2eq}{kWh}$. Die verwendete Methode berücksichtigt importierten und exportierten Strom. Die CO₂-Intensität vom verbrauchten Strom wird gegenüber der CO₂-Intensität vom produzierten Strom in einem Land bevorzugt, um die Verbraucher im jeweiligen Land nicht für den aus dem Land exportierten Strom verantwortlich zu machen. Ausserdem ist diese Kennzahl robust gegen das Auslagern vom CO₂-Fussabdruck von exportiertem Strom ins Ausland. (Tomorrow, 2021)

Eine CO₂-Intensität pro Kopf wird nicht berechnet, da diese durch den Import von produzierten Gütern leicht verfälscht werden könnte. Die Kennzahl der CO₂-Intensität vergleicht nicht den absoluten Fussabdruck der Einwohner, da dieser neben der Intensität auch von der Menge des verbrauchten Stroms abhängt, sondern gibt an wie viel Emissionen pro kWh Strom zusätzlich freigesetzt werden. (Tomorrow, 2021)

1.2 Methodik zur Schätzung des CO₂-Fussabdrucks

Zur Berechnung der verbrauchsisierten CO₂-Intensität verwendet electricitymap Strömungsverfolgungstechniken (engl. flow-tracing). Mit dieser Methodik wird jede Region/Land als Knoten n abstrahiert. Es gibt Flüsse (engl. flows) von Emissionen zwischen den Knoten und in jedem Knoten können neue Emissionen durch die Produktion von Strom entstehen oder durch den Verbrauch von Strom konsumiert werden. Es wird angenommen, dass für jeden Knoten zu jedem Zeitpunkt der gesamte importierte und produzierte Strom und die damit verbundenen Emissionen sich gleichmässig zu einer durchschnittlichen CO₂-Intensität i_n vermischen. Diese CO₂-Intensität gilt sowohl für den in der jeweiligen Region verbrauchten Strom V_n als auch für die Stromexporte in die benachbarten Regionen $F_{n \rightarrow k}$.

Die in der jeweiligen Region produzierte Menge Strom pro Produktionskategorie m ist gegeben als $P_{m,n}$. Weiterhin sind die CO₂-Intensität der jeweiligen Produktionskategorie gegeben als $i_{m,n}$. Die im Knoten n entstandenen Emissionen lässt sich berechnen als Summe aller Produktionskategorien $\sum_m i_{m,n} P_{m,n}$.

Ausserdem sind die Stromflüsse F zu den direkt benachbarten Regionen k bekannt. Die Importe aus den benachbarten Regionen $F_{k \rightarrow n}$ müssen zur Modellierung der CO₂ Emissionen mit der Intensität des jeweiligen Knotens i_k multipliziert werden.

Die folgende Gleichung beschreibt das Flussmodell für Land n . (Bo Tranberg, 2019)

$$i_n \left(V_n + \sum_k F_{n \rightarrow k} \right) = \sum_m i_{m,n} P_{m,n} + \sum_k i_k F_{k \rightarrow n}$$

Formel 1: Modell der Emissions-Flüsse für die Berechnung der CO₂-Intensität auf electricitymap

Weiterhin wird eine verlustfreien Stromübertragung ($V_n + \sum_k F_{n \rightarrow k} = \sum_m P_{m,n} + \sum_k F_{k \rightarrow n}$) angenommen, so dass die CO₂-Intensität für jede Region berechnet werden kann. (Bo Tranberg, 2019) (Tomorrow, 2021)

Das oben beschriebene Modell wird auf die Daten in der Datenbank der electricitymap angewendet. Die individuellen Quellen der Stromproduktion pro Produktionskategorien der berücksichtigten Länder wird auf der Internetseite von electricitymap.org veröffentlicht. (Tomorrow, 2021) Die CO₂-Intensitäten des produzierten Stroms beinhalten die Emissionen des gesamten Lebenszyklus des produzierenden Kraftwerks (Bau, Betrieb und Abbau). Die Daten werden aus Basis der ecoinvent Datenbank 3.4 abgeleitet. (Bo Tranberg, 2019)

Tabelle 1 gibt die CO₂-Intensitäten der verschiedenen Kraftwerkstypen in der Schweiz an. (Tomorrow, 2021)

Tabelle 1: Verwendete CO₂-Intensitäten (Gesamter Lebenszyklus) pro Kraftwerkstyp des in der Schweiz produzierten Stroms (Quelle: IPCC 2014)

Produktionsart	CO ₂ -Intensität [$\frac{g\text{CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$]
Geothermie	12
Biomasse	38
Wasserkraft	230
Solar	24
Pumpspeicherkraftwerke	45

1.3 Situation Schweiz & Projekthistorie

Für die Berücksichtigung im Modell der electricitymap muss die Stromproduktion einer Region aufgeschlüsselt nach Produktionskategorie mit einem maximalen Zeitverzug von 2 Stunden verfügbar sein. Für die Schweiz werden diese Daten auf der ENTSOE-E Transparency Plattform (Kategorie 16.1.B&C) veröffentlicht. Im Jahr 2017 wurden folgenden Probleme auf der Website von electricitymap gemeldet (Tomorrow, 2018)

- Im Jahr 2016 wurden von den 36.3 TWh (gem. BFE) durch Wasserkraft produzierten Stroms nur 13.5 TWh an die ENTSOE-E Transparency Plattform gemeldet. D.h. fast zwei Drittel des durch Wasserkraft produzierten Stroms fehlt.
- Die 3.1 TWh die gem. BFE im Jahr 2016 in konventionell-thermischen Kraft- und Fernheizkraftwerken produziert wurden fehlen komplett auf der ENTSOE-E Transparency Plattform.

Aufgrund der fehlenden Daten kam es bei der Berechnung CO₂-Intensität in der Schweiz zu einem signifikanten Fehler. Wie in Kapitel 1.2 beschrieben, überträgt sich dieser Fehler durch Exporte auf benachbarte Regionen, so dass 2017 entschieden wurde die Schweiz von den Berechnungen auszuschliessen. (Tomorrow, 2018)

Im August 2020 initiierte das BFE auf einem von Opendata.ch organisierten Hackathon zum Thema Energie ein Innovationsprojekt, um die Echtzeitdaten in der Schweiz zu verbessern und eine Veröffentlichung auf electricitymap zu ermöglichen. Ein Team aus Fachspezialisten, Softwareentwicklern und Data Analysts entwickelte eine Lösung, um die fehlenden Daten auf der ENTSOE-E Transparency Plattform abzuschätzen und für die Verwendung der Berechnung der CO₂ Intensität zu verwenden. Die gemeinsam erarbeitete Lösung wird im Kapitel 2 beschrieben.

2 Verbesserung der Datenqualität der Schweizer Stromproduktion

Wie in Kapitel 1.2 beschrieben muss die Stromproduktion und die zugehörige CO₂-Intensität von Kraftwerken, die nicht in den Produktionsdaten der ENTSOE-E Transparency Plattform erfasst werden, mit einem maximalen Verzug von 2 Stunden bestimmt werden.

2.1 Annahmen

Der Betreiber der electricitymap erlaubt keine Zuweisung von national-differenzierten CO₂-Intensitäten von einzelnen Kraftwerkstypen. Daher wurde in dem auf dem Hackathon entwickelten Ansatz angenommen, dass die Zusammensetzung des nicht in den ENTSOE-E Daten erfassten Stroms der Schweiz (roter Block) über das Jahr konstant ist.

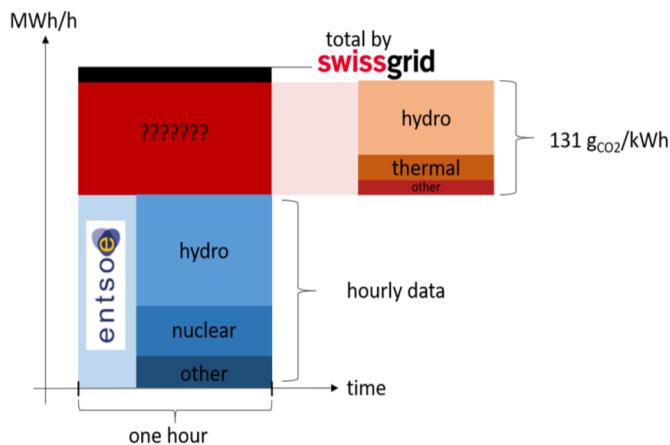


Abbildung 1: Visualisierung der Kategorie "unbekannt"

Für jede Stunde kann die gesamte Stromproduktion in der Schweiz abgeschätzt werden als die Differenz zwischen der gesamten Last in der Schweiz (ENTSOE-E Kategorie 6.1.B¹: Inklusive Übertragungsverluste, Eigenverbrauch von Kraftwerken und Verbrauch von Pumpspeicherwerkten) und den Exporten/Importen mit benachbarten Ländern (ENTSOE-E Handbuch Kategorie 12.1.G). Die Stromproduktion in Kraftwerken, welche die Daten nicht an die ENTSOE-E Transparency Plattform übermitteln, wird berechnet als Differenz der oben abgeschätzten gesamten Produktion in der Schweiz und der Summe der Stromproduktion der Kraftwerke, welche die Daten übermitteln und auf electricitymap als «unbekannt» veröffentlicht.

$$P_{unbekannt,ch} = V_n + \sum_k F_{ch \rightarrow k} - \sum_k F_{k \rightarrow ch} - \sum_m P_{m,ch}$$

¹ <https://transparency.entsoe.eu/load-domain/r2/totalLoadR2/show>

Formel 2: Berechnung der Stromproduktion in Kraftwerken, welche die Daten nicht an die ENTSOE-E Transparency Plattform übermitteln

2.2 Berechnung der CO₂-Intensität der Kategorie «Unbekannt»

Die Modelle des Betreibers der electricitymap nehmen zeitlich konstante CO₂-Intensitäten für einzelne Kraftwerkstypen an. Es gibt keine Unterscheidung zwischen im Sommer oder im Winter produzierten Strom derselben Stromerzeugungs-Technologie wie z.B. Atomstrom. Für die in Kapitel 2.1 neu eingeführte Kategorie «unbekannt» wird daher eine über das Jahr gemittelte durchschnittliche CO₂-Intensität aus einem Vergleich der BFE Gesamtenergiestatistik 2019 mit dem auf der ENTSOE veröffentlichten Daten.

Tabelle 2: Vergleich der Elektrizitätserzeugung im Jahr 2019 nach BFE Gesamtenergiestatistik 2019 (Tab. 24) und aggregierte Werte der ENTSOE-E Transparency Plattform

2019	Gesamtenergie -statistik BFE ²	ENTSOE-E Transparency Plattform ³	Abdeckung der Werte der Gesamtenergiestatistik BFE auf ENTSOE-E TP	Gewichtungsfaktor CO2-Intensität
	[GWh]	[GWh]	[%]	$\left[\frac{\text{g CO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}\right]$
Atomstrom	25.28	25.71	101.7	12
Wasserkraft	17.70	1.95	11.0	24
Wind	0.08	0.15	187.5	0
Solar	2.18	0.42	19.2	45
Pumpspeicher-kraftwerke	22.85	19.54	85.5	150
Konventionell-thermisch	3.05	-	0.0	700
Andere erneuerbare	0.68	-	0.0	220

² <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/gesamtenergiestatistik.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVib-GljYX/Rpb24vZG93bmhvYWQvMTAxMzg=.html>

³ <https://transparency.entsoe.eu/>

In Tabelle 2 ist zu sehen, dass Wasserkraft den grössten Anteil des Stroms, der nicht an die ENTSOE Transparency Plattform gemeldet wird, ausmacht. Dieser Strom wird überwiegend in kleineren Flusskraftwerken produziert. Weitere signifikante Anteile kommen aus kleineren Photovoltaik Anlagen (Solar) und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (Konventionell-thermisch), welche nicht als Kategorie für die Schweiz auf der ENTSOE Transparency Plattform erfasst werden.

Mit den Gewichtungsfaktoren aus Tabelle 1 ergibt sich für den nicht an die ENTSOE gemeldeten in der Schweiz produzierten Strom eine CO₂-Intensität von **131.4 $\frac{\text{gCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}}$** .

2.3 Validierung mit Stromproduktionsdaten der Swissgrid

Swissgrid, die Netzwerkbetreiberin der Schweiz, veröffentlicht auf ihrer Website mit einem Verzug von ca. 2-4 Wochen Daten zur stündlichen Stromproduktion in der Schweiz. Diese Daten können nicht für die electricitymap verwendet werden, da Sie nicht in Echtzeit veröffentlicht werden und ausserdem nur die gesamte Schweizer Stromproduktion ohne Aufschlüsselung der einzelnen Kraftwerkstypen beinhaltet. (Swissgrid, 2021)

Die Daten der Swissgrid werden im Folgenden verwendet um die in Echtzeit berechnete, gesamte Stromproduktion in der Schweiz (siehe Kapitel 2.1) zu validieren. Hierfür wurde die Stromproduktion in der Schweiz gemäss dem Modell für das Jahr 2020 berechnet und mit den Swissgrid Daten sowie den Daten auf der ENTSOE-Transparency Plattform verglichen.

Tabelle 3: In der Schweiz pro Stunde produzierter Strom [in GWh] gemäss Swissgrid, ENTSOE, der BFE Monatsstatistik und dem Modell für die electricitymap (Januar-November 2020)

[GWh]	Neues Modell (siehe Kapitel 2.1)	Swissgrid ⁴	ENTSOE
Durchschnitt	7.60	7.78	5.34
Maximum	14.42	13.84	10.57
Minimum	3.44	4.40	1.38
Summe	60'936	62'340	42'797
Pumpspeicherkraftwerke	22.85	19.54	150
Konventionell-thermisch	3.05	-	700
Andere erneuerbare	0.68	-	220

⁴ <https://www.swissgrid.ch/de/home/customers/topics/energy-data-ch.html>

Tabelle 3 zeigt, dass von den durch die Swissgrid publizierten 62TWh nur 42TWh auf der ENTSOE Plattform publiziert werden. Durch die in Kapitel 2.1 beschriebene Modellierung kann dieser Wert auf 61TWh korrigiert werden. Dies stimmt ebenfalls mit vom BFE publizierten Monatsstatistiken überein. (Bundesamt für Energie, 2021)

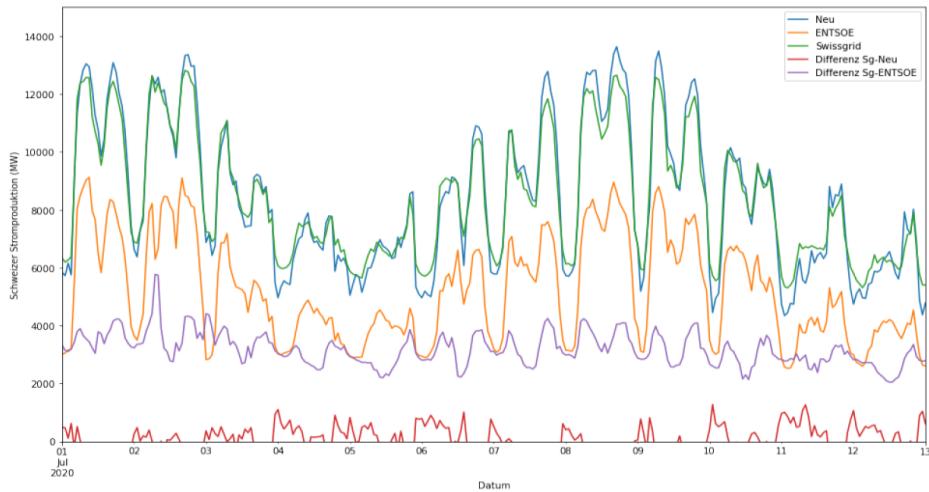


Abbildung 2: In der Schweiz produzierter Strom pro Stunde gemäss Swissgrid (grün), ENTSOE (gelb) und dem Modell für die electricitymap (blau) sowie deren Differenz für die ersten beiden Juli Wochen 2020.

Abbildung 2 zeigt den zeitlichen Ablauf der in Tabelle 3 aufgezeigten Differenzen für die ersten beiden Juli Wochen 2020. Zu jedem Zeitpunkt gibt es signifikanten Unterschiede zwischen den Swissgrid Daten (grün) und der Summe der ENTSOE Daten (gelb). Durch die getroffenen Annahmen (blau) kann zeitlich eine gute Übereinstimmung mit den später veröffentlichten Swissgrid Daten erreicht werden.

Die Differenz zwischen den Swissgrid und den ENTSOE ist typischerweise zwischen 8-12 Uhr und 18-23 Uhr besonders gross. Ausserdem ist die Differenz zwischen April und September grösser als während des restlichen Jahres. Wahrscheinlich wird aufgrund des hohen Strombedarfs und der Verfügbarkeit in diesen Momenten besonders viel Strom in Laufwasserkraftwerken produziert. Dieser wird nicht an ENTSOE gemeldet, so dass die Differenz in diesen Momenten besonders gross ist.

Für die Berechnungen mit dem Modell (blaue Kurve) wurden die aktuell auf der ENTSOE Transparency Plattform veröffentlichten Daten für den Stromverbrauch sowie Importe und Exporte verwendet. Es muss beachtet werden, dass die Daten für den Stromverbrauch bis zum 3. Mittwoch des darauffolgenden Monats durch genauere Werte ersetzt werden. Die zum Zeitpunkt der ersten Veröffentlichung gemeldeten Werte werden nicht dauerhaft abgespeichert, sondern gehen mit der Veröffentlichung der korrigierten Werte verloren. Eine Validierung mit den Werten die in Echtzeit für die Berechnung des Stromverbrauchs auf electricitymap.org verwendet werden ist daher nicht möglich.

Es gibt eine gute Übereinstimmung zwischen den Werten, die auf der electricitymap für die gesamte Stromproduktion in der Schweiz in Echtzeit veröffentlicht werden und den später durch Swissgrid veröffentlichten Werten, so dass sich das Modell sich insgesamt gut eignet, um die Stromproduktion in der Schweiz abzuschätzen.

2.4 Validierung mit BFE Monatsstatistik

Das BFE veröffentlicht monatliche Informationen über die Stromproduktion. Diese werden in diesem Kapitel verwendet, um den die Aufteilung auf electricitymap auf die Erzeugungstechnologien zu verifizieren. Hierfür wurden für die Berechnung der zu erwartenden Werte auf der electricitymap erneut die aktuell auf der ENTSOE Transparency Plattform veröffentlichten Werte verwendet. (Bundesamt für Energie, 2021)

Tabelle 4: In der Schweiz pro Stunde produzierter Strom [in GWh] gemäss der BFE Monatsstatistik und dem Modell für die electricitymap (Januar-Oktober 2020)

[GWh]	Wasserkraft		Kernkraftwerke		Rest		Total	
	BFE ES	EMap	BFE ES	EMap	BFE ES	EMap	BFE ES	EMap
Januar	3013	2662	2187	2231	498	308	5698	4522
Februar	2504	2144	2047	2087	531	449	5082	4162
März	2705	2519	2185	2231	542	743	5432	4711
April	2349	2401	1974	2017	519	968	4842	4652
Mai	3071	3164	1944	1988	554	1193	5569	5535
Juni	3694	3721	1476	1500	546	1153	5716	5385
Juli	3979	3901	1249	1245	618	1212	5846	5268
August	3381	3611	1626	1655	557	1026	5564	5365
September	2979	3183	2067	2104	555	849	5601	5307
Oktober	3006	3083	2164	2195	481	675	5651	5234

Für die Aufteilung der Kategorie «unbekannt» werden die aus Tabelle 2 abgeleiteten Prozentsätze für die durchschnittliche Zusammensetzung der nicht gemeldeten Stromproduktion verwendet (77% Wasserkraft, 23% Rest). Die in Tabelle 4 aufgeführt Kategorie «Rest» fasst Stromproduktionen aus konventionell-thermischen und erneuerbaren Kraftwerken wie z.B. Solar- und Windenergie zusammen.

Bei den Echtzeitdaten der Schweizer Stromproduktion fehlte ein grosser Anteil an Wasserkraft (siehe Tabelle 2) aus Laufwasserkraftwerken. Tabelle 4 zeigt für die Wasserkraft eine gute Übereinstimmung zwischen den durch das BFE veröffentlichten Werten und den auf der electricitymap zu erwartenden Werten.

Im April-September wird in der Schweiz überdurchschnittlich viel Strom in Laufwasserkraftwerken produziert. Da für die Zusammensetzung auf electricitymap der Jahresdurchschnitt verwendet wird, ist die Abschätzung der Kategorie für erneuerbare Technologien und konventionell-thermische Kraftwerke in diesen Monaten etwas zu hoch.

3 Abschätzung der CO₂ Erzeugung in Schweizer Rechenzentren

3.1 Stromverbrauch in Schweizer Rechenzentren

Zum Abschätzen einer typischen Lastkurve wird der gemessene Stromverbrauch eines Rechenzentrums der Swisscom verwendet und aufbereitet. Der Datensatz besteht aus dem Stromverbrauch von 4 Blöcken (NOBR 1-4) zwischen dem 22.01.2020 und dem 21.01.2021 in 15 Minuten Intervallen. Die Daten werden wie folgt aufbereitet, um eine Lastkurve abzuschätzen.

- a. Es fehlen einzelne Datenpunkte. Da dies nie mehr als ein Datenpunkt und nie mehr als einer der 4 Blöcke gleichzeitig betrifft wird die Lücke über ein "backwardsfill" mit den Daten der vorherigen 15 Minuten abgeschätzt.
- b. Im Moment der Zeitumstellung fehlt der Wert einer Stunde (Zeitverschiebung). Dieser wird mit dem Wert der vorherigen Stunde abgeschätzt.
- c. Die zwischen dem 01.01.2021 und dem 21.01.2021 werden zur Abschätzung der Werte für den gleichen Zeitraum im Jahr 2020 verwendet.
- d. Die fehlenden Werte am 22.01.2020 werden durch die Werte des 21.01.2020 geschätzt.

Für das Jahr 2013 wurde in einer Studie der Stromverbrauch der Schweizer Rechenzentren auf 1660.71 GWh geschätzt. Dieser Wert wird zusammen mit der typische Lastkurve benutzt, um den stündlichen Stromverbrauch in Schweizer Rechenzentren abzuschätzen. (IWSB - Institut für Wirtschaftsstudien Basel AG, 2014)

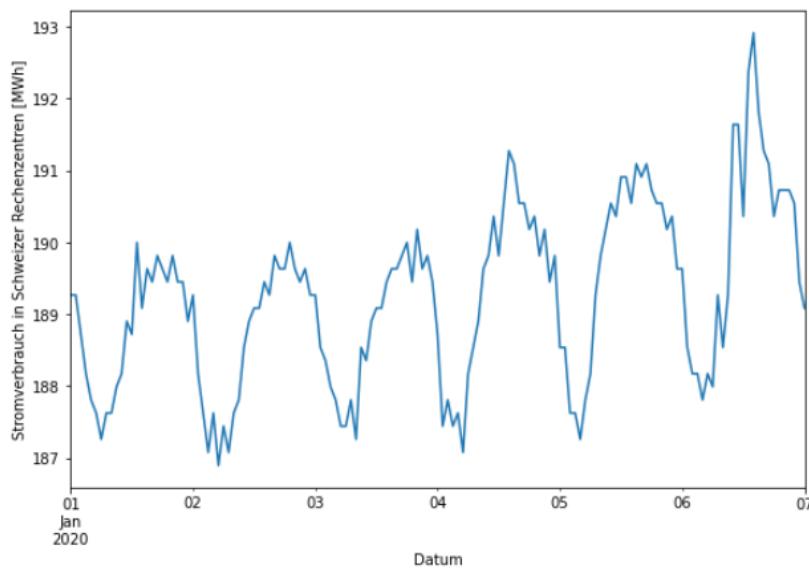


Abbildung 3: Abschätzung des gesamten Stromverbrauchs in Schweizer Rechenzentren in der ersten Januar Woche 2020

3.2 Anteil erneuerbare Energie am Stromverbrauch Schweizer Rechenzentren

Aktuell stehen die Ergebnisse des Modells für die CO₂ Intensität des verbrauchten Stroms der electricitymap noch nicht zur Verfügung, so dass stattdessen die stündlich aufgelöste Zusammensetzung des in der Schweiz produzierten Stroms verwendet wird.

Von den auf der ENTSOE Transparency Plattform veröffentlichten Kategorien sind Solarenergie, Windenergie, Wasserkraft, Pumpspeicher und 88% des produzierten Stroms der Kategorie "unbekannt" (siehe Tabelle 2.1) erneuerbare. So lässt sich stündlich der Anteil der erneuerbaren Energie berechnen. Zusammen mit dem Verbrauch V der Lastkurve aus Kapitel 3.1 ergibt sich, dass **57.5%** des Stroms, der in Schweizer Rechenzentren verbraucht wird, erneuerbar ist.

$$\chi_{\text{erneuerbar}} = \sum_h V_{\text{Rechenzentrum},h} * \chi_{\text{erneuerbar},h}$$

Formel 3: Jahresdurchschnitt des Anteils erneuerbare Energien

3.3 Anteil Importierter Strom am Verbrauch von Rechenzentren

Der Strom, den die Rechenzentren in der Schweiz verbrauchen setzt sich zusammen aus dem in der Schweiz produzierten Strom und dem importierten Strom. Für den in der Schweiz produzierten Strom P wird die Summe, der auf electricitymap aufgeschalteten Technologien m für jede Stunde berechnet. Für den Import I werden alle Importe der benachbarten Länder und Regionen k stündlich aufsummiert.

$$\chi_{\text{importiert},h} = \frac{I_h}{P_h + I_h} = \frac{\sum_k I_{h,k}}{\sum_m P_{h,m} + \sum_k I_{h,k}}$$

Formel 4: Stündlicher Anteil importierter Strom

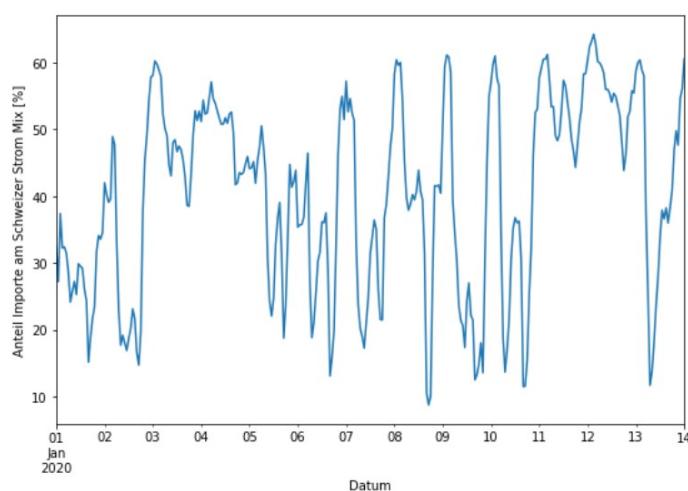


Abbildung 4: Stündlicher Anteil importierter Strom am Schweizer Strom Mix in der ersten Januar Woche 2020

Mit der in Kapitel 3.1 bestimmten Lastkurve ergibt sich ein gewichteter Mittelwert von **23.8%** Anteil importierte Strom am Stromverbrauch Schweizer Rechenzentren.

3.4 Stündlich aufgelöste Emissionen durch Schweizer Rechenzentren

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, steht die CO₂ Intensität des in der Schweiz verbrauchten Stroms noch nicht zur Verfügung. Die CO₂ Intensität des produzierten Stroms kann mit den in Tabelle 2 dargestellten CO₂ Intensitäten berechnet werden. Multipliziert mit dem Stromverbrauch aus Kapitel 3.1 ergeben sich folgende Emissionswerte durch Schweizer Rechenzentren.

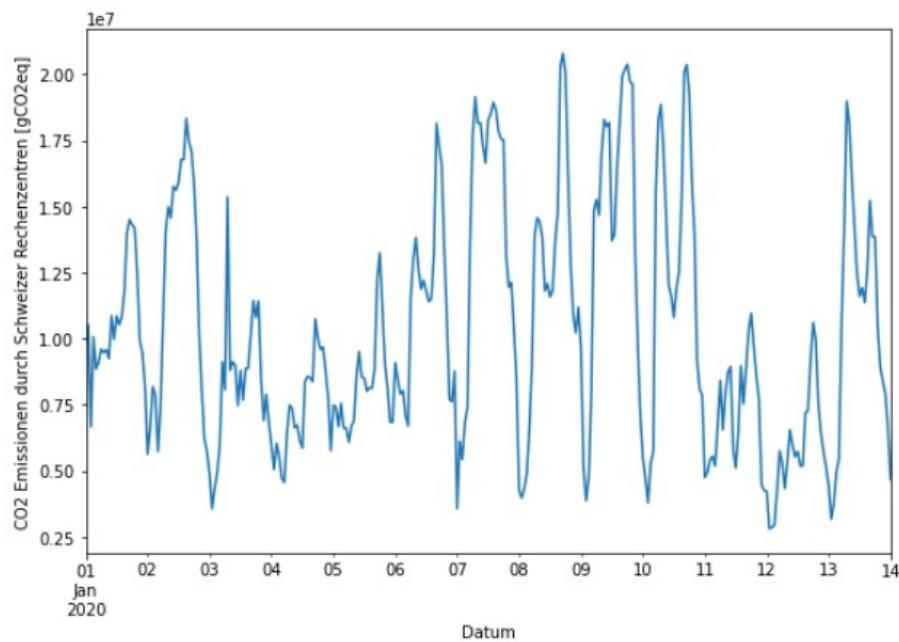


Abbildung 5: Stündlich aufgelöste CO₂ Emissionen durch Schweizer Rechenzentren in der ersten Januar Woche 2020

4 Aufteilung der in Rechenzentren entstandenen Emissionen auf Dienste

In diesem Kapitel werden Möglichkeiten beschrieben die in Kapitel 3.4 berechneten CO₂ Emissionen in Schweizer Rechenzentren auf verschiedene Online-Dienstleistungen wie Videoplattformen oder soziale Netzwerke zu disaggregieren.

Generell kann davon ausgegangen werden, dass der Energiebedarf in Rechenzentren mit den für den jeweiligen Dienst benötigten Datenmengen direkt korreliert. Um die CO₂ Emissionen, die in Rechenzentren entstanden sind, zu disaggregieren werden die durch verschiedene Dienste *d* verursachten Datenströme *Q* benötigt. Zusammen mit den stündlich aufgelösten Emissionen Schweizer Rechenzentren (siehe Kapitel 3.4) können die Emissionen pro Dienst berechnet werden als:

$$Emissionen_{d,h} = \frac{Q_d}{\sum_d Q_d} Emissionen_{Rechenzentren,h}$$

Formel 5: Desegregation der Emissionen in Rechenzentren auf Internetdienste

Für die Datenströme pro Dienst können zum Beispiel die Daten aus dem «The Mobile Internet Phenomena Report» von Sandvine (siehe Tabelle 5) verwendet werden. (Sandvine, 2020)

Tabelle 5: Anteil [%] am gesamten weltweiten Internetdatenverkehr nach Kategorie [2020] Quelle: (Sandvine, 2020)

Internetdienst	Downstream	Upstream	Total
Video Streaming	65.6	22.4	62.1
Social	12.9	16.8	12.7
Messaging	5.9	16.9	6.8
Marketplace	5.9	1.9	5.6
Web	4.2	19.5	5.5
Gaming	3.7	3.3	3.3
Cloud	0.3	7.0	1.8
Security and VPN	0.8	7.9	1.3
Filesharing	0.6	3.8	0.9
Audio Streaming	0.2	0.5	0.1

Internet-Datenverkehr wird generell unterschieden in Downstream und Upstream, wobei Downstream Daten von einem Server zu einem Konsumenten fliessen (z.B. wenn dieser sich ein Online Video anguckt) und Upstream Daten die vom Benutzer zu einem Server fliessen (z.B. wenn der Benutzer Dateien hochlädt). Es wäre zu untersuchen, ob die Bearbeitung von Upstream Datenverkehr signifikant mehr oder weniger Energie in Rechenzentren verbraucht als die Bearbeitung von Downstream Daten. Insgesamt wird über 60% des Internetdatenverkehrs durch das Streamen von Online Videos verursacht. Die beiden Internetseiten mit dem grössten Internetdatenverkehr sind Youtube (25%) und Facebook Video (18%).

Tabelle 6: Anteil [%] am gesamten europäischen Internetdatenverkehr nach Website [2020] Quelle: (Sandvine, 2020)

Internetdienst	Downstream	Upstream	Total
Youtube	27.0	7.4	25.5
Facebook Video	17.8	5.5	17.8
Instagram	7.1	8.2	7.2
Facebook	5.2		5.2
Netflix	4.4		4.1
Http Media Stream	3.9		3.7
Google Play	3.5		3.3
Tiktok	3.1		3.0
Whatsapp	2.7	4.0	2.8
Snapchat			2.1

Weiterhin sollte der zeitliche Verlauf bei den Überlegungen zur Desaggregation beachtet werden. Typischerweise gibt es eine Lastspitze am frühen Abend, die vor allem durch Videodienste verursacht wird. Die Last während dieser Spitzenzeiten wächst noch schneller als die gesamte Datenmenge. Dies macht ggf. einen Ausbau der Infrastruktur erforderlich, der für die Abdeckung der Grundlast nicht notwendig wäre. J. Morley et al. haben typische Lastkurven für die verschiedenen Online-Dienste erstellt, die für eine stündlich aufgeschlüsselte Aufteilung verwendet werden könnten. (Janine Morley, 2018)

Bei der Berechnung durch Webdienste entstandene CO₂Emissionen sollte berücksichtigt werden, dass insbesondere für Videoinhalte nur ein kleiner Anteil der Emissionen in den Rechenzentren anfällt. Schien et al. geben den Anteil mit 2 bis 11% abhängig vom Endgerät des Benutzers an. Wichtig sind

neben dem Energieverbrauch des Endgeräts ausserdem der Energiebedarf des Netzwerks und ganz besonders ob die Daten über eine mobile Datenverbindung geladen werden. Für nicht Videoinhalte beträgt der Anteil der Rechenzentren zwischen 4 und 48%. (Daniel Schien, 2013)

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt der Juni 2020 IEA Bericht über Rechenzentren und Internetverkehr. Der Anteil am weltweiten Stromverbrauch wird mit 200 TWh (~ 0.8% am Endverbrauch) angegeben und der Stromverbrauch Übertragungsnetzwerke mit 250TWh (~ 0.8% am Endverbrauch). Es wird prognostiziert, dass der Anteil am Internetverkehr über mobile Netzwerke von 50% im Jahr 2019 auf 70% im Jahr 2022 ansteigen wird, was aufgrund der höheren Energieintensität von mobilen Netzwerken zu einem Anstieg des Energieverbrauchs führen könnte. Ausserdem wird darauf verwiesen, dass der Stromverbrauch der Übertragungsnetzwerke von der Technologie abhängt, wobei 4G ungefähr 5-mal effizienter als 3G ist. (Kamiya, 2020)

Coroama et al. argumentieren, dass bei der Berechnung durch Internetdatenverkehr entstandenen CO₂ Emissionen der Stromverbrauch für die Übertragungsnetzwerke ebenfalls berücksichtigt werden sollte und geben Formel an, um die entsprechenden Werte abzuschätzen. (Coroama V.C., 2015)

5 Literaturverzeichnis

Bo Tranberg, O. C. B. L. T. G. I. S. G. B. A., 2019. Real-Time Carbon Accounting Method for the European Electricity Markets. *Physics and Society*, p. 20.

Bundesamt für Energie, 2017. *Ergebnisbericht zu Etappe 2: Festlegung und Objektblätter; Entwurf vom 22. November 2017*, Bern: s.n.

Bundesamt für Energie, 2017. *Umgang mit den Stellungnahmen der Regionalkonferenzen zu Etappe 2*, Bern: Bundesamt für Energie.

Bundesamt für Energie, 2021. *Elektrizitätsstatistik*. [Online] Available at: <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/elektrizitaetsstatistik.html> [Zugriff am 2021].

Coroama V.C., S. D. P. C. H. L., 2015. The Energy Intensity of the Internet: Home and Access Networks. In: *ICT Innovations for Sustainability. Advances in Intelligent Systems and Computing*. s.l.:Springer, pp. 137-155.

Daniel Schien, P. S. M. Y. C. P., 2013. Modeling and Assessing Variabilityin Energy Consumption During the UseStage of Online Multimedia Services. *Industrial Ecology*, pp. 800-813.

ENTSOE, 2021. *ENTSOE-E Transparency Platform*. [Online] Available at: <https://transparency.entsoe.eu/> [Zugriff am 2021].

IWSB - Institut für Wirtschaftsstudien Basel AG, 2014. *Bundesamt für Energie*. [Online] Available at: [Rechenzentren in der Schweiz - Energieeffizienz: Stromverbrauch und Effizienzpotenzial](#) [Zugriff am 2021].

Janine Morley, K. W. M. H., 2018. Digitalisation, energy and data demand: The impact of Internet traffic on overall and peak electricity consumption. *Energy Research & Social Science*, pp. 128-137.

Kamiya, G., 2020. *IEA*. [Online] Available at: <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks>

Nagra, 2016. *Entsorgungsprogramm 2016 (NAB 16-01)*, Wettingen: Nagra.

Sandvine, 2020. [Online] Available at: <https://www.sandvine.com/download-report-mobile-internet-phenomena-report-2020-sandvine> [Zugriff am 05 2021].

Swissgrid, 2021. *Energieübersicht*. [Online] Available at: <https://www.swissgrid.ch/de/home/customers/topics/energy-data-ch.html> [Zugriff am 2021].

Tomorrow, 2018. *Bug Report Schweizer Daten.* [Online]
Available at: <https://github.com/tmrowco/electricitymap-contrib/issues/892>
[Zugriff am 2021].

Tomorrow, 2021. *Data Sources for Electricitymap.* [Online]
Available at: https://github.com/tmrowco/electricitymap-contrib/blob/master/DATA_SOURCES.md

Tomorrow, 2021. *Electricitymap GitHub Repository.* [Online]
Available at: <https://github.com/tmrowco/electricitymap-contrib>
[Zugriff am 2021].

Tomorrow, 2021. *Electricitymap Website.* [Online]
Available at: <https://www.electricitymap.org/map>

6 Anhang

6.1 Electricitymap Parser für die Schweiz

```
#!/usr/bin/env python3

import arrow

from . import ENTSOE
import logging
import requests


def fetch_swiss_exchanges(session, target_datetime, logger):
    """Returns the total exchanges of Switzerland with its neighboring countries."""
    swiss_transmissions = {}
    for exchange_key in ['AT', 'DE', 'IT', 'FR']:
        exchanges = ENTSOE.fetch_exchange(zone_key1='CH',
                                           zone_key2=exchange_key,
                                           session=session,
                                           target_datetime=target_datetime,
                                           logger=logger)
        if not exchanges:
            continue

        for exchange in exchanges:
            datetime = exchange['datetime']
            if datetime not in swiss_transmissions:
                swiss_transmissions[datetime] = exchange['netFlow']
            else:
                swiss_transmissions[datetime] += exchange['netFlow']

    return swiss_transmissions
```

```

def fetch_swiss_consumption(session, target_datetime, logger):
    """Returns the total consumption of Switzerland."""
    consumptions = ENTSOE.fetch_consumption(zone_key='CH',
                                              session=session,
                                              target_datetime=target_datetime,
                                              logger=logger)
    return {c['datetime']: c['consumption'] for c in consumptions}

def fetch_production(zone_key='CH', session=None, target_datetime=None,
                     logger=logging.getLogger(__name__)):
    """
    Returns the total production by type for Switzerland.
    Currently the majority of the run-of-river production is missing.
    The difference between the sum of all production types and the total
    production is allocated as 'unknown'.
    The total production is calculated as sum of the consumption, storage
    and net imports.
    """
    now = arrow.get(target_datetime, 'Europe/Zurich') if target_datetime
    else arrow.now(tz='Europe/Zurich')
    r = session or requests.session()

    exchanges = fetch_swiss_exchanges(r, now, logger)
    consumptions = fetch_swiss_consumption(r, now, logger)
    productions = ENTSOE.fetch_production(zone_key=zone_key, session=r,
                                           target_datetime=now, logger=logger)

    if not productions:
        return

    for p in productions:
        dt = p['datetime']
        if dt not in exchanges or dt not in consumptions:
            continue
        known_production = sum([x or 0 for x in p['production'].values()])

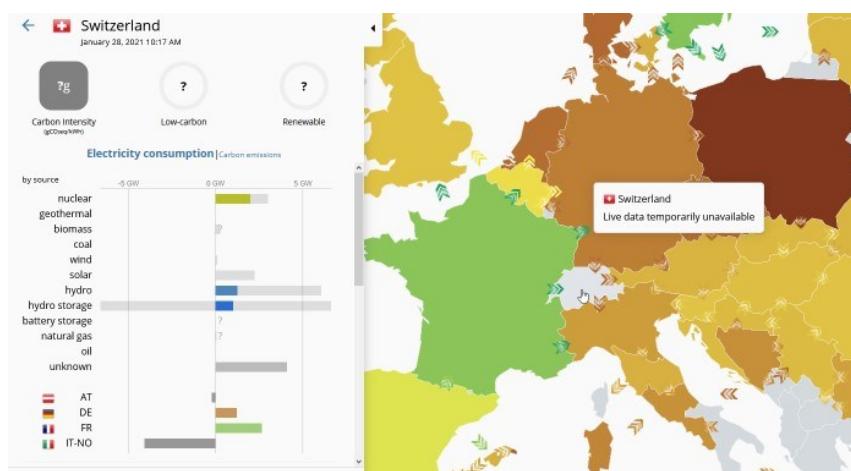
        storage = sum([x or 0 for x in p['storage'].values()])
        total_production = consumptions[dt] + storage + exchanges[dt]
        unknown_production = total_production - known_production
        p['production']['unknown'] = unknown_production if unknown_production > 0 else 0

    return productions

if __name__ == '__main__':
    print(fetch_production())

```

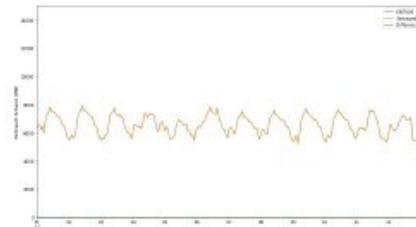
Plausibilisierung Electricitymap



6.2 Folien zur Validierung

Stündlicher Stromverbrauch der Schweiz

2020 [GWh]	Swissgrid ¹⁾	ENTSOE ²⁾	Differenz
Durchschnitt	7.10	7.10	0.00
Maximum	9.83	9.83	0.12
Minimum	4.70	4.70	-0.05
Aggregiert	62'390.2	62'378.0	12.2



- 1) Verbrauchte Energie: Die verbrauchte Energie Regelblock Schweiz ist das Total aller Lastgänge der Bilanzgruppen in **Näertelbstfassung**. Diese werden von den Verteilnetzbetreibern an Swissgrid gemeldet. Die Summe beinhaltet sämtliche in der Schweiz aus dem Übertragungsnetz und den Verteilnetzen bezogene elektrische Energie. (Inklusive Verluste, Pumpenergie bei Pumpspeicherwerkten und Eigenbedarf von Kraftwerken)
- 2) ActualLoad (inklusive Verluste, Pumpenergie bei Pumpspeicherwerkten und Eigenbedarf von Kraftwerken)

Es gibt fast keine Abweichungen zwischen den Daten auf der ENTSOE Transparency Platform und Swissgrid

Wie weit weichen die abgeleiteten Stundenwerte
Stromerzeugungs- und Nachfragewerte von den publizierten
Werten der monatlichen Elektrizitätsbilanzen bzw. der
jährlichen Elektrizitäts - bzw. Gesamtenergiestatistik ab?

Stündliche Stromproduktion Januar – November 2020

[GWh]	Neu	Swissgrid	ENTSOE	BFE [Jan-Okt]	Neu- Swissgrid	Neu- ENTSOE
Durchschnitt	7.60	7.78	5.34	-	-0.17	2.26
Maximum	14.42	13.84	10.57	-	1.44	7.9
Minimum	3.44	4.40	1.38	-	-2.06	0
Aggregiert	60'936.2	62'339.6	42'797.5	55'001	-1'403.4	18'138.7

- Der grösste Anteil des produzierten Stroms dessen Daten nicht an ENTSOE geliefert werden (18.1 TWh von Jan Nov 2020) ist von kleinen Laufwasserkraftwerken (BFE: 15.7 TWh JaOkt 2020)
- Die Differenz zu ENTSOE ist typischerweise zwischen 8-12 Uhr und 18-23 Uhr besonders gross. Außerdem ist die Differenz zwischen April und September grösser. Aufgrund des hohen Bedarfs und der Verfügbarkeit wird in diesen Momenten besonders viel Strom in Laufwasserkraftwerken produziert. Dieser wird nicht an ENTSOE gemeldet, sodass die ENTSOE Summe kleiner als die reale Stromproduktion ist.
- Bei einem hohen Energiebedarf hat der neue Ansatz typischerweise etwas höhere Werte als Swissgrid und bei einem niedrigeren Energiebedarf typischerweise etwas tiefere.

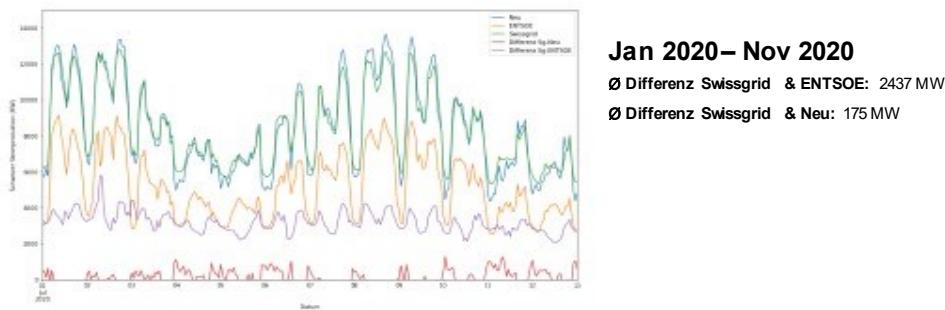
Validierung mit Swissgrid Energieübersicht

Electricitymap(neu)

= Load + Exports- Imports (ENTSOE)

= Bekannte Produktion (Summe ENTSOE) + Unbekannte Produktion

≈ Summe produzierte Energie Regelblock Schweiz (Swissgrid Energieübersicht)



Abweichung Stromproduktion nach Kategorie

2020 (in GWh)	Wasserkraft		Kernkraftwerke		Rest		Total	
	BFE ¹⁾	EM ²⁾	BFE	EM	BFE ³⁾	EM ⁴⁾	BFE ⁵⁾	EM
Januar	3013	2662	2187	2231	498	308	5698	4522
Februar	2504	2144	2047	2087	531	449	5082	4162
März	2705	2519	2185	2231	542	743	5432	4711
April	2349	2401	1974	2017	519	968	4842	4652
Mai	3071	3164	1944	1988	554	1193	5569	5535
Juni	3694	3721	1476	1500	546	1153	5716	5385
Juli	3979	3901	1249	1245	618	1212	5846	5268
August	3381	3611	1626	1655	557	1026	5564	5365
September	2979	3183	2067	2104	555	849	5601	5307
Oktober	3006	3083	2164	2195	481	675	5651	5234

Im April-September wird viel Strom in Laufwasserkraftwerken produziert. In diesen Monaten ist der Anteil an Strom aus den Laufwasserkraftwerken über dem angenommenen Jahresdurchschnitt von 77%. Dies erklärt den erhöhten Verbrauch des "Rest" (Solar + Wind + 23%* Unbekannt) in diesen Monaten.

- 1) Hydraulische Erzeugung Verbrauch der Speicherpumpemontlichen Elektrizitätsbilanzen)
- 2) Hydro(HydroPumpedStorage +HydroRun-of-river and poundage+ HydroWaterReservoir (ENTSOE)) + 77% * Unbekannt
- 3) Konv.-therm. und erneuerbare Energien
- 4) Solar + Wind + 23% * Unbekannt
- 5) Nettoerzeugung

2020 gab es mit der Abschaltung des KKW Mühleberg ein «Sprung» in den Jahresstatistiken - wie kann zukünftig mit solchen Effekten umgegangen werden?

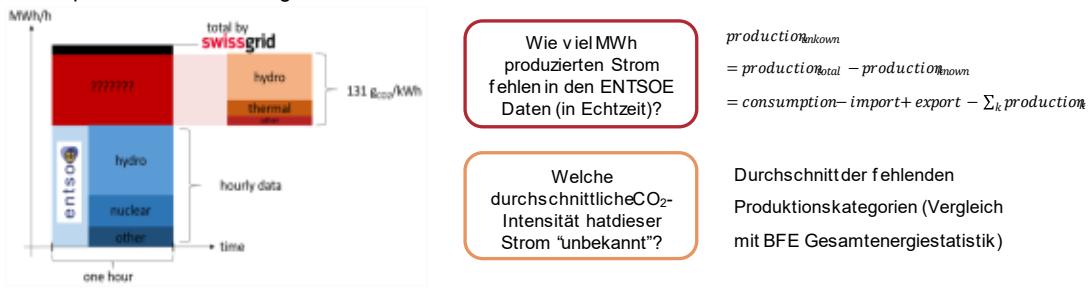
Kategorie unbekannt

Problem

 Daten der Stromproduktion nach Kategorie sind unvollständig.

Lösung

Wir führen eine Kategorie "**unbekannt**" für den produzierten Strom der nicht in den ENTSOE Daten "Stromproduktion nach Kategorie" erfasst wird ein.



- Wenn wegen der Abschaltung mehr Strom in Kraftwerken produziert wird, welche keine Daten an ENTSOE liefern (kleine Laufwasserkraftwerke, konventionell-thermisch, Solar), sollte die durchschnittliche CO₂ Intensität der Kategorie "unbekannt" angepasst werden. Eine Erhöhung der Stromproduktion in grossen Kraftwerken wird in Echtzeit automatisch erfasst.
- Unabhängig davon macht es Sinn in regelmässigen Abständen die CO₂ Intensität neu zu berechnen. Für die Berechnung benötigt es einen Vergleich der ENTSOE Daten mit den Daten der Gesamtenergiestatistik
- Wenn die Daten der Gesamtenergiestatistik zum Beispiel über LinkedData oder eine API gelesen zur Verfügung gestellt werden, könnte ein Skript den entsprechenden Faktor automatisch berechnen

Wie beeinflusst ein Erzeugungsfluss von D nach IT den CO2-Fussabdruck der Schweiz auf electricitymap?

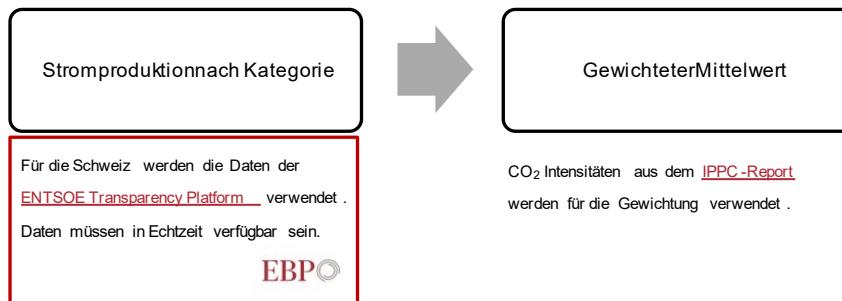
Exportiert die Schweiz den CO2 freien Strom und importiert CO2 intensiven Strom? Wie wird das abgebildet?

Berechnung der CO2 -Intensität auf electricitymap.org

- Electricitymap unterscheidet zwischen CO₂ Fussabdruck des **produzierten** und des **konsumierten** Stroms (Beide Werte werden auf der Website publiziert)
- Der CO₂ Fussabdruck des **produzierten Stroms** wird vom importierten Strom nicht beeinflusst
- Für den CO₂ Fussabdruck des **konsumierten Stroms** hat Electricitymap eine Lösung basierend auf "CO₂ Emissions-Flüssen" entwickelt. ^{1) 2)}



Modell CO₂ Intensität Produzierter Strom



Der CO₂ Fussabdruck des **produzierten Stroms** wird vom importierten Strom nicht beeinflusst

03.06.2021 Plausibilisierung Electricitymap

Modell CO₂ Intensität Konsumierten Strom

Electricitymap hat hier eine Lösung basierend auf den Import/Export Flüssen von CO₂ Emissionen entwickelt. Die Importe aus den benachbarten Ländern werden mit der durchschnittlichen (Verbrauch) Intensität des jeweiligen Landes multipliziert und die Exporte mit der durchschnittlichen Intensität der Schweiz.

$$x_i \cdot consumption_i = \sum_m I_{i,m} \cdot production_{i,m} + \sum_j x_j \cdot import_{i,j} - \sum_k x_k \cdot export_{i,k}$$

Unter der Annahme, dass keine Übertragungsverluste auftreten (consumption = production + import - export) folgt.

$$\begin{bmatrix} production_1 + import_1 & -import_{1,2} & \dots & -import_{1,n} \\ -import_{2,1} & production_2 + import_2 & \dots & -import_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -import_{n,1} & -import_{n,2} & \dots & production_n + import_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_m I_{1,m} \cdot production_1 \\ \vdots \\ \sum_m I_{n,m} \cdot production_n \end{bmatrix}$$

D.h. die CO₂ Intensität des konsumierten der Schweiz (Verbrauch) wird berechnet als

$$x_{CH} = \frac{\sum_m I_{CH,m} \cdot production_{CH,m} + x_{DE} import_{CH,DE} + x_{FR} import_{CH,FR} + \dots}{production_{CH} + import_{CH}}$$



Der CO₂ Fussabdruck des konsumierten Stroms geht hoch, wenn viel Strom mit einer höheren CO₂ Intensität importiert wird

i Land
m Produktionskategorie
x Durchschnittliche CO₂-Intensität Verbrauch
/ ProduktionsCO₂-Intensität

03.06.2021 Plausibilisierung Electricitymap

© EBP | 14

6.3 Abschätzung der typischen Lastkurve für Schweizer Rechenzentren