

# Emissionsinventar stationäre Motoren und Gasturbinen Basisjahr 2019 und Zeitreihe 1990- 2060

Schlussbericht  
Bern, 2. Juni 2022

Benedikt Notter  
Cornelia Graf  
Cuno Bieler  
Nina Etter

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

## **Impressum**

### **Emissionsinventar stationäre Motoren und Gasturbinen**

Basisjahr 2019 und Zeitreihe 1990-2060

Schlussbericht

Bern, 2. Juni 2022

7458a\_Emissionsinventar\_StationäreMotoren+Gasturbinen\_1990-2060.docx

### **Auftraggeber**

Bundesamt für Umwelt BAFU, Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien, CH-3003 Bern

Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

### **Begleitung BAFU**

Peter Bonsack

Simone Krähenbühl

Philipp Hallauer

Anouk Bass

Sektionen Verkehr sowie Industrie und Feuerungen, Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien

### **Autorinnen und Autoren**

Dr. Benedikt Notter

Cornelia Graf

Cuno Bieler

Nina Etter

INFRAS, Sennweg 2, 3012 Bern

Tel. +41 31 370 19 19

### **Hinweis**

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

## Inhalt

<b>Impressum</b>	<b>2</b>
<b>Inhalt</b>	<b>3</b>
<b>Glossar</b>	<b>6</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>9</b>
<b>Résumé</b>	<b>13</b>
<b>Riassunto</b>	<b>18</b>
<b>1. Ausgangslage</b>	<b>23</b>
<b>2. Zielsetzung</b>	<b>24</b>
2.1. Übersicht	24
2.2. Betrachtete Anlagen	24
2.3. Zielgrössen und Systemgrenzen	26
<b>3. Methodik</b>	<b>29</b>
3.1. Prinzip	29
3.2. Gliederung	30
3.3. Datenquellen	32
3.3.1. Daten der kantonalen Fachstellen für Luftreinhaltung	32
3.3.2. Verwendungsverpflichtungen HEL des BAZG	33
3.3.3. WKK-Statistik des BFE	34
3.3.4. Weitere Datenquellen für die Mengengerüste	35
3.3.5. Weitere Datenquellen zu Emissionsfaktoren	36
3.4. Herleitung der Mengengerüste	37
3.4.1. Übersicht	37
3.4.2. Generatoren ohne Abwärmenutzung	37
3.4.3. Kleine WKK-Anlagen, 1990 – 2019	39
3.4.4. Grosse Anlagen, 1990 - 2019	40
3.4.5. Zukunftsszenarien für kleine WKK- und grosse Anlagen	41
3.5. Emissionsberechnung	43

3.5.1.	Herleitung der Emissionsfaktoren	43
3.5.2.	Berechnung der Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionen	44
<b>4.</b>	<b>Mengengerüste</b>	<b>45</b>
4.1.	Übersicht	45
4.2.	Generatoren ohne Abwärmenutzung	49
4.2.1.	Bestand	49
4.2.2.	Leistung	51
4.2.3.	Betriebsstunden	51
4.2.4.	Abgastechnologien	52
4.2.5.	Energieverbrauch	53
4.3.	Kleine WKK-Anlagen	54
4.3.1.	Bestand	54
4.3.2.	Leistung	55
4.3.3.	Betriebsstunden	56
4.3.4.	Abgastechnologien	57
4.3.5.	Energieverbrauch	58
4.4.	Grosse Anlagen	59
4.4.1.	Bestand	59
4.4.2.	Leistung	60
4.4.3.	Betriebsstunden	60
4.4.4.	Abgastechnologien	61
4.4.5.	Energieverbrauch	61
<b>5.</b>	<b>Emissionen</b>	<b>62</b>
5.1.	Übersicht	62
5.2.	Treibhausgase	64
5.3.	NO <sub>x</sub> , CO und Feinstaub	66
5.4.	Weitere Schadstoffe	68
<b>6.</b>	<b>Ergänzende Anmerkungen</b>	<b>69</b>
6.1.	Datenqualität	69
6.2.	Vergleich mit dem Standbericht 2014	72
<b>7.</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>74</b>

<b>Annex</b>	<b>75</b>
<b>A1. Energieträger-Eigenschaften</b>	<b>75</b>
<b>A2. Emissionsfaktoren</b>	<b>76</b>
<b>A3. Mengengerüste</b>	<b>79</b>
A3.1. Generatoren	79
A3.2. Kleine WKK-Anlagen	79
A3.3. Grosse Anlagen	82
<b>A4. Emissionen</b>	<b>84</b>
A4.1. Emissionssummen tabellarisch, historisch und Szenario «Zero Basis»	84
A4.2. Emissionssummen tabellarisch, Szenario «WWB»	86
A4.3. Emissionen grafisch nach Anlagentyp und Energieträger	88
A4.3.1. CO <sub>2</sub> (total)	88
A4.3.2. CO <sub>2</sub> (fossil)	89
A4.3.3. CH <sub>4</sub>	90
A4.3.4. N <sub>2</sub> O	91
A4.3.5. CO	92
A4.3.6. NO <sub>x</sub>	93
A4.3.7. PM10	94
<b>Literatur</b>	<b>95</b>

## Glossar

<b>BAFU</b>	Bundesamt für Umwelt
<b>BAZG</b>	Bundesamt für Zoll und Grenzsicherheit
<b>BFE</b>	Bundesamt für Energie
<b>BHKW</b>	Blockheizkraftwerk: modular aufgebaute Anlage zur Gewinnung elektrischer Energie und Wärme, die vorzugsweise am Ort des Wärmeverbrauchs betrieben wird. Es kann auch Nutzwärme in ein Nahwärmenetz eingespeist werden. Sie nutzt das Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung (WKK).
<b>CCF</b>	Couplage chaleur-force (Wärme-Kraft-Kopplung, WKK)
<b>CHP</b>	Utilizzo del calore residuo secondo il principio della cogenerazione (Wärme-Kraft-Kopplung, WKK)
<b>CLRTAP</b>	Genfer Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (Convention on long-range transboundary air pollution)
<b>CNG</b>	Komprimiertes Erdgas (compressed natural gas)
<b>CTEB</b>	Centrali termoelettriche a blocco (Blockheizkraftwerke, BHKW)
<b>Dampfmaschine</b>	Grosse Anlage zur thermischen Stromerzeugung, welche über die Verbrennung ausserhalb eines Kessels Hitze und Dampf erzeugt.
<b>DPF</b>	Diesel-Partikelfilter
<b>EMEP/EEA</b>	Programm zur Luftreinhaltung (European Monitoring and Evaluation Programme der europäischen Umweltagentur (European Environment Agency))
<b>EMIS</b>	Emissionsdatenbank des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)
<b>EP2050+</b>	Energieperspektiven der Schweiz des BFE (2021)
<b>EZV</b>	Eidgenössische Zollverwaltung (heute BAZG)
<b>FWL</b>	Feuerungswärmeleistung (FWL): Der auf den unteren Heizwert bezogene Wärmehalt des Brennstoffs, der einer Feuerungsanlage im Dauerbetrieb je Zeiteinheit zugeführt werden kann.
<b>GuD</b>	Gas-, und Dampf-Kombikraftwerke für die Strom-/Wärmeproduktion.
<b>HEL</b>	Heizöl extra-leicht
<b>IIR</b>	Informative Inventory Report: Berichterstattung über Luftschadstoffemissionen zuhanden der CLRTAP (Convention on Long Range Transboundary Air Pollution)
<b>KVA</b>	Kehrichtverbrennungsanlage
<b>Lastfaktor</b>	Auslastung einer Anlage, kann aus der durchschnittlichen Leistung und dem Wirkungsgrad berechnet werden.
<b>LPG</b>	Liquefied petroleum gas, z. B. Propan, Butan

<b>LRV</b>	Luftreinhalte-Verordnung, SR 814.318.142.1
<b>MCP</b>	Medium-size combustion plants (von vorgeschlagener EU-Richtlinie zu regulierende Anlagen zur thermischen Stromerzeugung mit FWL 1-5 MW)
<b>Nennleistung</b>	Die Nennleistung einer Stromerzeugungs- oder WKK-Anlage ist die elektrische Dauerleistung, d.h. die höchste Leistung, die bei einem bestimmungsgemässen Betrieb ohne zeitliche Einschränkung erbracht wird und die Lebensdauer und Sicherheit der Anlage nicht beeinträchtigt.
<b>NIR</b>	National Inventory Report: Berichterstattung über Treibhausgasemissionen zuhanden der UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change)
<b>NSA</b>	Notstromanlage
<b>OFDF</b>	Office fédéral de la douane et de la sécurité des frontières (Bundesamt für Zoll und Grenzsicherheit, BAZG)
<b>OFEN</b>	Office fédéral de l'énergie (Bundesamt für Energie, BFE)
<b>OIA</b>	Ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (Luftreinhalteverordnung, LRV)
<b>OPair</b>	Ordonnance sur la protection de l'air (Luftreinhalteverordnung, LRV)
<b>PE2050+</b>	Perspectives énergétiques 2050+ (fr), Prospettive energetiche 2050+ (it): Energieperspektiven der Schweiz des BFE (2021)
<b>PEA</b>	«Poursuite de la politique énergétique actuelle» (fr), resp. «Proseguimento della politica energetica attuale» (it): Szenario "Weiter wie bisher" der Energieperspektiven der Schweiz des BFE (2021)
<b>PF</b>	Partikelfilter
<b>POPs</b>	Langlebige organische Schadstoffe (Persistent organic pollutants)
<b>SCR</b>	Abgastechnologie: Selective catalytic reduction
<b>THG</b>	Treibhausgase
<b>UDSC</b>	Ufficio federale della dogana e della sicurezza dei confini (Bundesamt für Zoll und Grenzsicherheit, BAZG)
<b>UFE</b>	Ufficio federale dell'energia (Bundesamt für Energie, BFE)
<b>UNECE</b>	Wirtschaftskommission der EU (United Nations Economic Commission for Europe)
<b>UNFCCC</b>	Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zum Klimawandel (United Nations Framework Convention on Climate Change)
<b>USG</b>	Umweltschutzgesetz (SR 814.01)
<b>Verbrennungskraftmaschine</b>	Grosse Anlage zur thermischen Stromerzeugung, welche durch innere Verbrennung mechanische Arbeit verrichtet.

- WKK** Wärme-Kraft-Kopplung. WKK-Anlagen sind gemäss Definition des BFE Anlagen mit Umwandlung von mindestens 5% der eingesetzten Energie in Elektrizität und mit einem Gesamtnutzungsgrad (Wärme und Elektrizität) von mindestens 60% (Kaufmann 2021).
- WWB** Szenario "Weiter wie bisher» der Energieperspektiven der Schweiz des BFE (2021)



## Zusammenfassung

Das vorliegende Emissionsinventar der stationären Motoren und Gasturbinen in der Schweiz umfasst die in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV), Anhang 2, Ziffern 82-83 geregelten Anlagen und schätzt deren Endenergieverbrauch und Emissionen für die Jahre 1990 – 2060. Es umfasst drei Anlagentypen:

- **Generatoren ohne Abwärmenutzung.** Diese werden fast ausschliesslich als Notstromaggregate eingesetzt. Als solche dürfen sie gemäss LRV zu Testzwecken maximal 50 Stunden pro Jahr betrieben werden und müssen dafür ausser einem Feinstaub- und Dieseleruss-Grenzwert keine weiteren LRV-Emissionsgrenzwerte einhalten. Die grosse Mehrheit dieser Generatoren wird mit Diesel oder Heizöl Extraleicht (HEL) betrieben.
- **Kleine WKK-Anlagen.** Dabei handelt es sich um stationäre Motoren und (wenige) Gasturbinen mit Abwärmenutzung nach dem Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung (WKK). Die meisten dieser Aggregate sind Blockheizkraftwerke (BHKW) und produzieren Wärme und Strom, meist aus gasförmigen Brennstoffen. Dabei wird entweder Erdgas eingesetzt oder in Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe anfallendes Biogas, in Abwasserreinigungsanlagen (ARA) anfallendes Klärgas oder in Deponien anfallendes Deponiegas verwertet.
- **Grosse Anlagen.** Dabei handelt es sich um Gasturbinen und GuD-Kraftwerke (kombinierte Gas- und Dampfturbinen) mit hohen individuellen Leistungen (im Bereich von >1 MW bis mehrere 100 MW elektrische Leistung). Solche Aggregate werden in Kraftwerken, Fernheizkraftwerken oder in der Industrie betrieben.

Im Basisjahr 2019 umfasst das Inventar knapp 8'000 Aggregate mit rund 12'800 MW Inputleistung, welche während rund 4.8 Millionen Stunden pro Jahr betrieben werden und rund 9.8 PJ Energie verbrauchen (Tabelle 1). Beim Bestand dominieren die Generatoren ohne WKK mit rund 6'500 Aggregaten, gefolgt von den kleinen WKK-Anlagen mit knapp 1'200 Aggregaten; von den grossen Anlagen sind aktuell 17 in Betrieb. Bei der installierten Leistung sind die Verhältnisse zwischen den Anlagentypen ähnlich wie beim Bestand. Beim Endenergieverbrauch machen die Generatoren ohne WKK jedoch nur rund 5% aus, während die beiden anderen Kategorien je rund die Hälfte des Rests verursachen. Dies liegt daran, dass die Generatoren ohne WKK als Notstromaggregate jährlich nur wenige Stunden für Testläufe betrieben werden, während die anderen beiden Anlagekategorien jährlich Tausende von Stunden laufen.

Die zeitliche Entwicklung der Mengengerüst-Parameter ist grundsätzlich zunehmend (Abbildung 1). Dabei verzeichnen aber die kleinen WKK- sowie die grossen Anlagen in den letzten zehn bis fünfzehn Jahren einen leicht rückgängigen Trend, was auf die Schliessung

einiger grosser Anlagen in der Industrie und den Ersatz kleiner WKK-Aggregate mit grösseren, aber auch ersatzlosen Stilllegungen kleinerer Aggregate zurückgeht.

Beide auf die Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) des BFE gestützten Zukunftsszenarien sehen eine Zunahme der Strom- und Wärmeproduktion grosser und kleiner WKK-Anlagen vor, was sich in einem steigenden Endenergieverbrauch in der Zukunft auswirkt. Unter dem Klimazielszenario «Zero Basis» ist der Anstieg etwas weniger ausgeprägt; Biogas resp. Biomethan setzt sich als wichtigster Energieträger durch. Das «WWB»-Szenario, welches aktuelle Rahmenbedingungen unterstellt, sieht einen etwas stärkeren, von Erdgas dominierten Anstieg vor.

**Tabelle 1: Bestand, Betriebsstunden, installierte Inputleistung und Endenergieverbrauch stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp im Jahr 2019.**

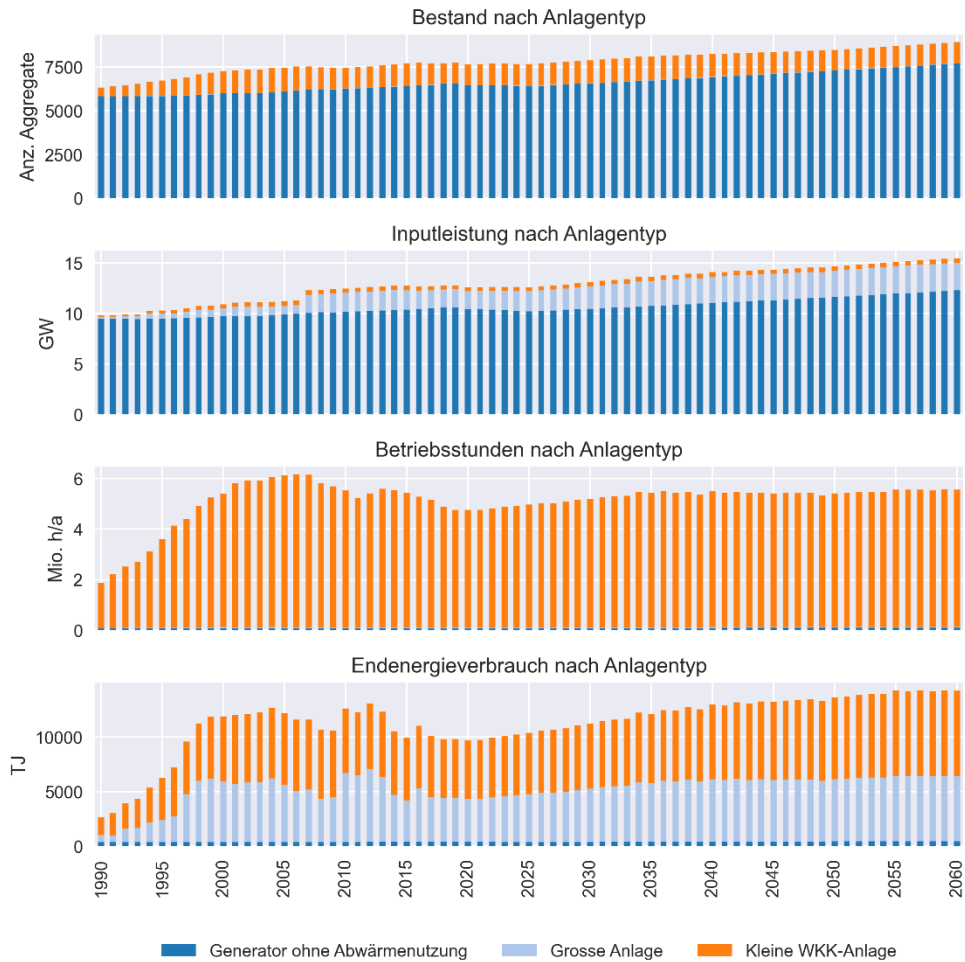
Anlagentyp	Anzahl Aggregate	Betr.Std. [1000 h]	Betr.Std. pro Aggregat und Jahr	Installierte Inputleistung [MW]	Inputleistung pro Aggregat [MW]	Endenergieverbrauch [PJ]
Generator ohne Abwärmenutzung	6'544	86	13	10'604	1.62	0.4
Kleine WKK-Anlage	1'188	4'645	3'910	386	0.32	5.4
Grosse Anlage	17	24	1'384	1'807	106.28	4.0
<b>Summe/Mittelwert</b>	<b>7'749</b>	<b>4'755</b>	<b>614</b>	<b>12'796</b>	<b>1.65</b>	<b>9.8</b>

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

Die Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen betragen im Jahr 2019 rund 350'000 t fossiles CO<sub>2</sub>, rund 1'100 t NO<sub>x</sub> und rund 25 t Feinstaub (Tabelle 2). Beim fossilen CO<sub>2</sub> dominieren die grossen Anlagen, da sie hauptsächlich Erdgas verbrennen, während in kleinen WKK-Anlagen mehr Biogas als Erdgas eingesetzt wird, welches per Definition kein fossiles CO<sub>2</sub> ausstösst. Bei den Luftschadstoff-Emissionen dominieren hingegen die kleinen WKK-Anlagen, und auch die Generatoren ohne Abwärmenutzung verursachen im Vergleich zum Energieverbrauch überproportionale Luftschadstoff-Emissionen.

In der Zukunft sind unter dem Szenario «Zero Basis» alle Emissionen rückläufig. Der zunehmende Ersatz von Erdgas mit dem erneuerbaren Biogas/Biomethan lässt auch die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen schrumpfen. Unter dem Szenario «WWB» nehmen diese hingegen zu. Die Luftschadstoff-Emissionen nehmen dank der zu erwartenden zunehmenden Verbreitung von Abgastechnologien wie Partikelfiltern (v.a. bei Notstromaggregaten) oder Oxidations- sowie SCR-Katalysatoren (v.a. bei kleinen WKK-Anlagen) unter beiden Szenarien ab.

**Abbildung 1: Bestand, installierte Inputleistung, Betriebsstunden und Endenergieverbrauch stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp über die Zeitreihe 1990-2060 (Szenario «Zero Basis»).**



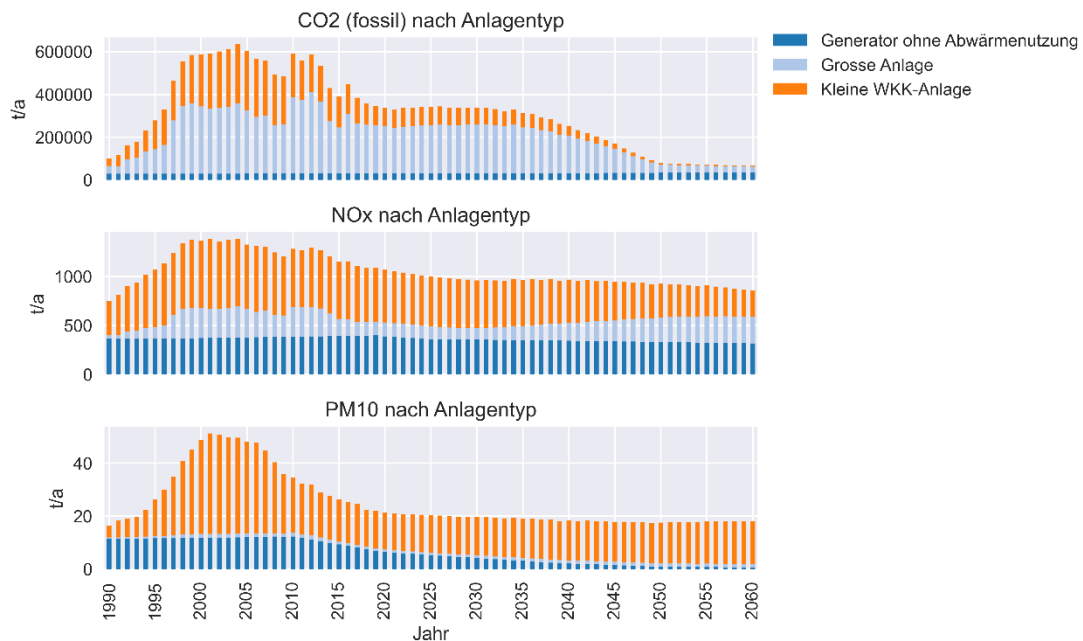
Grafik INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

**Tabelle 2: Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp im Jahr 2019.**

Anlagentyp	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
Generator ohne Abwärmenutzung	31'304	397	58	7
Kleine WKK-Anlage	89'351	545	622	14
Grosse Anlage	225'849	142	47	1
<b>Summe</b>	<b>346'504</b>	<b>1'084</b>	<b>727</b>	<b>22</b>

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung 2: Fossile CO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und PM<sub>10</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp, 1990-2060 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

Im Vergleich zur Vorgängerstudie, einem auf das Jahr 2014 beschränkten «Standbericht» zu den Emissionen der stationären Motoren und Gasturbinen (INFRAS 2016), wird als grösste Änderung der Bestand der Generatoren ohne WKK aktuell über doppelt so hoch eingeschätzt. Dies ist eine Folge der aktuell grösseren und repräsentativeren Stichprobe der für beide Studien ausgewerteten Verwendungsverpflichtungen des BAZG. Da die Generatoren ohne WKK hinsichtlich Bestand und installierter Leistung das Inventar dominieren (vgl. Abbildung 1), verdoppeln sich diese beiden Kennzahlen in etwa auch für das gesamte Inventar. Aufgrund der niedrigen Betriebsstunden der Generatoren ohne WKK wirkt sich diese Änderung jedoch kaum auf Endenergieverbrauch und Emissionen aus.

## Résumé

L'inventaire des émissions des moteurs stationnaires et des turbines à gaz en Suisse propose une estimation, pour les années 1990 - 2060, de la consommation d'énergie et des émissions des installations visées à l'annexe 2, ch. 82 et 83, de l'ordonnance sur la protection de l'air (OPair). Il porte ainsi sur trois types d'installations :

- **Générateurs sans récupération de chaleur.** Ceux-ci sont presque exclusivement utilisés comme générateurs de secours. En vertu de l'OPair, ils peuvent donc être exploités à des fins de test au maximum 50 heures par an et ne sont pas tenus de respecter d'autres valeurs limite d'émission OPair, à l'exception d'une valeur limite pour les poussières fines et la suie de diesel. La grande majorité de ces générateurs fonctionnent au diesel ou au mazout extra-léger (HEL).
- **Les petites installations de cogénération.** Il s'agit de moteurs stationnaires et de (rares) turbines à gaz avec récupération de chaleur selon le principe du couplage chaleur-force (CCF). La majorité de ces installations sont des centrales à énergie totale équipée, qui produisent de la chaleur et de l'électricité souvent à partir de combustibles gazeux. Ainsi, elles sont alimentées au gaz naturel, au biogaz issu de l'agriculture, de l'industrie ou de l'artisanat, au gaz d'épuration provenant des stations d'épuration des eaux usées (STEP) ou au gaz de décharge.
- **Les grandes installations.** Ce type comporte les turbines à gaz et les centrales à cycle combiné (association de turbines à gaz et de turbines à vapeur) présentant une grande puissance individuelle (puissance électrique allant de moins de 1 MW à plusieurs centaines de MW). Ces installations sont utilisées dans des centrales, des centrales de chauffage à distance ou dans l'industrie.

En 2019, année de référence, l'inventaire comprend près de 8'000 agrégats avec environ 12'800 MW de puissance d'entrée. Ceux-ci fonctionnent pendant environ 4.8 millions d'heures par an et consomment environ 9.8 PJ d'énergie (Tableau 3). En ce qui concerne le nombre, les générateurs sans CCF dominent avec environ 6'500 agrégats, suivis par les petites installations CCF avec près de 1'200 agrégats; parmi les grandes installations, 17 sont actuellement en service. Concernant la puissance installée, les rapports entre les types d'installations sont similaires à ceux du nombre d'agrégats. En ce qui concerne la consommation d'énergie finale, les générateurs sans CCF ne représentent toutefois qu'environ 5%, alors que les deux autres catégories se partagent environ la moitié de la partie restante. Cela s'explique par le fait que les générateurs sans CCF, en tant que groupes électrogènes de secours, ne fonctionnent à des fins d'essai que quelques heures par an pour des tests,

alors que les deux autres catégories d'installations fonctionnent des milliers d'heures par an.

L'évolution temporelle des paramètres de la structure quantitative est en principe croissante (Figure 3). Toutefois, les petites installations CCF ainsi que les grandes installations ont enregistré une légère tendance à la baisse au cours des dix à quinze dernières années, ce qui s'explique par la fermeture de quelques grandes installations dans l'industrie et le remplacement de petites installations CCF par des plus importants, mais aussi par la fermeture sans remplacement de petites installations.

Les deux scénarios d'avenir basés sur les Perspectives énergétiques 2050+ (PE2050+) de l'OFEN prévoient une augmentation de la production d'électricité et de chaleur des grandes et petites installations CCF, ce qui se traduit par une hausse de la consommation d'énergie finale à l'avenir. Dans le scénario "Zéro base", l'augmentation est un peu moins prononcée ; le biogaz resp. le biométhane s'impose comme la principale source d'énergie. Le scénario "Poursuite de la politique énergétique actuelle (PEA)", qui suppose les conditions-cadres actuelles, prévoit une augmentation de la consommation d'énergie finale un peu plus forte, dominée par le gaz naturel.

**Tableau 3: Nombre, heures d'exploitation, puissance d'entrée installée et consommation d'énergie finale des moteurs stationnaires et des turbines à gaz par type d'installation en 2019.**

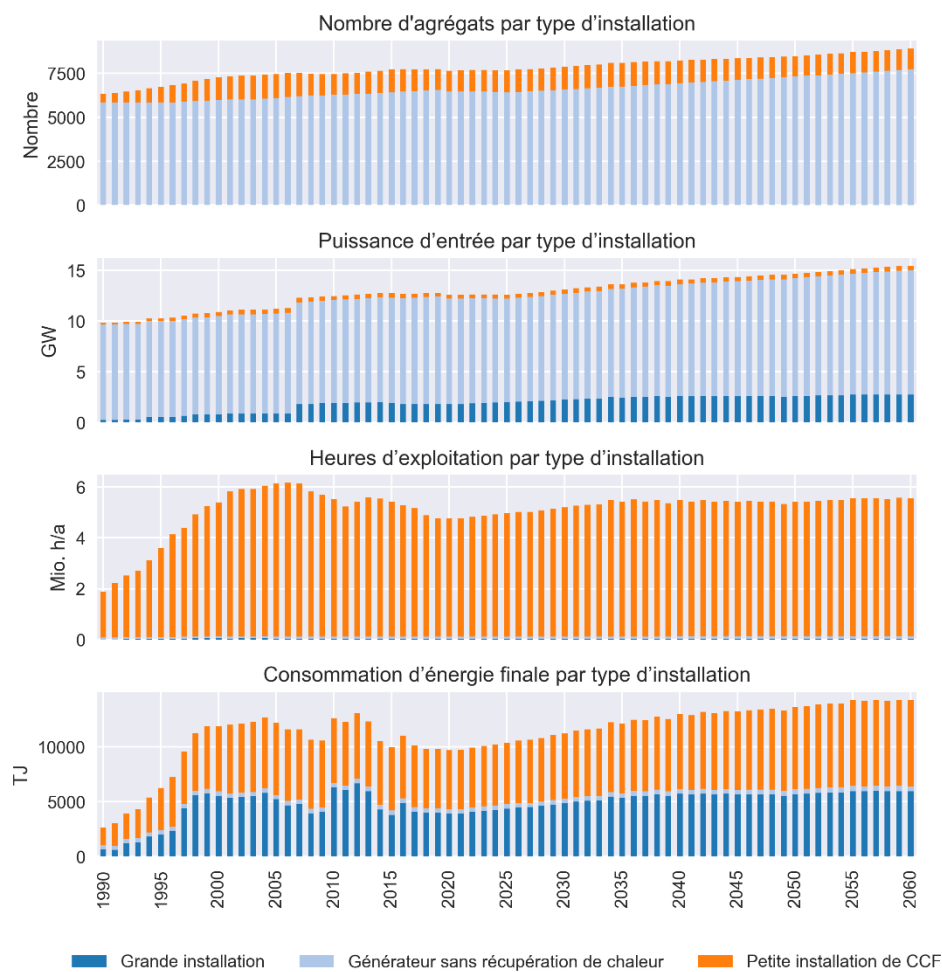
Type d'installation	Nombre d'agrégats	Heures d'exploitation [1000 h]	Nombre d'heures par agrégat et par an	Puissance d'entrée installée [MW]	Puissance d'entrée par agrégat [MW]	Consommation d'énergie finale [PJ]
Générateur sans récupération de chaleur	6'544	86	13	10'604	1.62	0.4
Petite installation de CCF	1'188	4'645	3'910	386	0.32	5.4
Grande installation	17	24	1'384	1'807	106.28	4.0
<b>Somme/moyenne</b>	<b>7'749</b>	<b>4'755</b>	<b>614</b>	<b>12'796</b>	<b>1.65</b>	<b>9.8</b>

Tableau INFRAS. Source : propre évaluation

Les émissions des moteurs stationnaires et des turbines à gaz s'élèvent en 2019 à environ 350'000 t de CO<sub>2</sub> fossile, à environ 1'100 t de NO<sub>x</sub> et à environ 25 t de particules fines (Tableau 4). En ce qui concerne le CO<sub>2</sub> fossile, les grandes installations dominent, car elles brûlent principalement du gaz naturel, tandis que les petites installations CCF utilisent plus de biogaz que de gaz naturel, qui par définition n'émet pas de CO<sub>2</sub> fossile. En revanche, les émissions de polluants atmosphériques sont dominées par les petites installations CCF. Les générateurs sans récupération de chaleur génèrent également des émissions de polluants atmosphériques disproportionnées par rapport à la consommation d'énergie.

A l'avenir, dans le cadre du scénario "Zéro base", toutes les émissions sont en baisse. Le remplacement croissant du gaz naturel par le biogaz/biométhane renouvelable fait également diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> d'origine fossile. Dans le scénario "PEA" ces émissions augmentent en revanche. Dans les deux scénarios les émissions de polluants atmosphériques diminuent grâce à la généralisation attendue de technologies de gaz d'échappement telles que les filtres à particules (surtout pour les groupes électrogènes de secours) ou les catalyseurs d'oxydation et SCR (surtout pour les petites installations de cogénération).

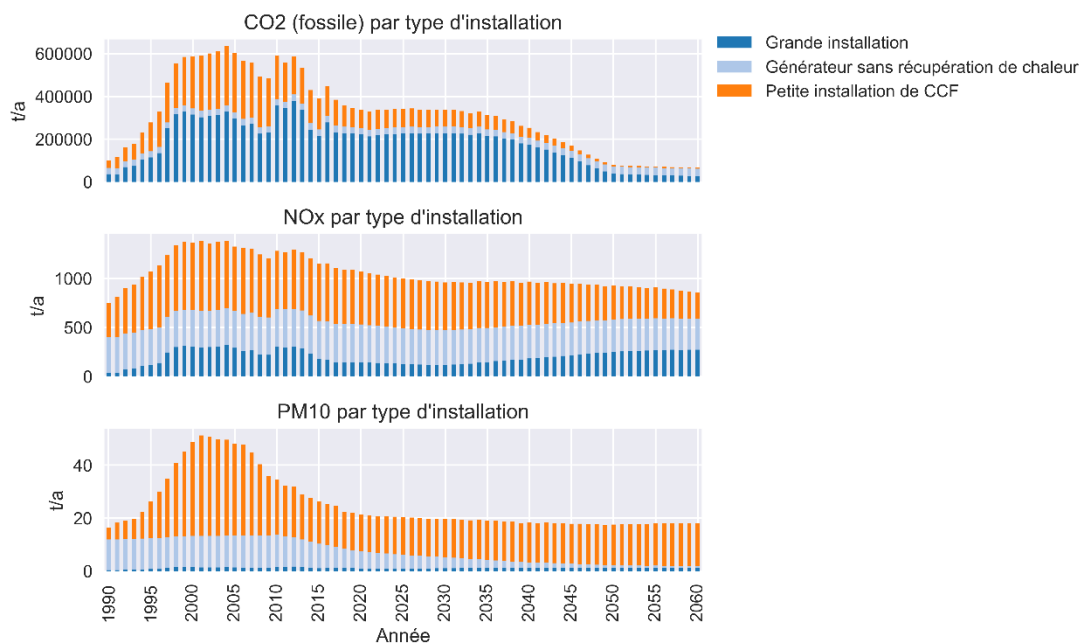
**Figure 3: Nombre, puissance d'entrée installée, heures d'exploitation et consommation d'énergie finale des moteurs stationnaires et des turbines à gaz par type d'installation entre 1990 et 2060 (scénario «Zéro base»).**



**Tableau 4: Emissions des moteurs stationnaires et des turbines à gaz par type d'installation en 2019.**

Type d'installation	CO <sub>2</sub> (fossile) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
Générateur sans récupération de chaleur	31'304	397	58	7
Petite installation de CCF	89'351	545	622	14
Grande installation	225'849	142	47	1
<b>Total</b>	<b>346'504</b>	<b>1'084</b>	<b>727</b>	<b>22</b>

Tableau INFRAS. Source : propres calculs

**Figure 4: Emissions de CO<sub>2</sub> d'origine fossile, NO<sub>x</sub> et PM10 des moteurs stationnaires et des turbines à gaz par type d'installation, 1990-2060 (évolution future selon le scénario «Zéro base»).**

Graphique INFRAS. Source : propres calculs

Par rapport à l'étude précédente, un "rapport d'étape" limité à l'année 2014 sur les émissions des moteurs stationnaires et des turbines à gaz (INFRAS 2016), le changement le plus important est l'estimation de l'effectif des générateurs sans CCF. Actuellement il est estimé au moins deux fois plus haut qu'en 2014. C'est une conséquence de l'échantillon actuellement plus grand et plus représentatif des déclarations de garantie de l'OFDF (Office fédéral de la douane et de la sécurité des frontières) évalués par rapport à l'étude précédente. Comme les générateurs sans CCF dominent l'inventaire en termes d'effectif et de puissance installée (cf. Figure 3), ces deux chiffres ont également à peu près doublés pour l'ensemble



de l'inventaire. Toutefois, en raison du faible nombre d'heures de fonctionnement des générateurs sans CCF, ce changement n'a guère d'incidence sur la consommation d'énergie finale et sur les émissions.

## Riassunto

Il presente inventario delle emissioni dei motori stazionari e delle turbine a gas in Svizzera comprende gli impianti regolamentati nell'allegato 2 cifre 82-83 dell'ordinanza contro l'inquinamento atmosferico (OIA) e ne valuta il consumo energetico e le emissioni per gli anni 1990 - 2060. Esso comprende tre tipi di impianti:

- **Generatori senza recupero del calore residuo.** Questi sono utilizzati quasi esclusivamente come generatori d'emergenza. In quanto tali, secondo l'OIA possono essere utilizzati a scopi di test al massimo per 50 ore all'anno e, fatto salvo di un valore limite di polveri fini e di fuliggine da diesel, non devono rispettare ulteriori valori limite di emissioni. La maggior parte di questi generatori funziona con gasolio o olio combustibile extra leggero (HEL).
- **Piccoli impianti di cogenerazione.** Si tratta di motori stazionari con recupero del calore residuo e (poche) turbine a gas con l'utilizzo del calore residuo secondo il principio della cogenerazione (CHP). La maggior parte di tali aggregati sono centrali termoelettriche a blocco (CTEB) che producono calore e corrente, per lo più da combustibili gassosi. In questi casi è utilizzato il gas naturale oppure, nell'agricoltura, nell'industria o nell'artigianato il biogas prodotto, oppure negli impianti di depurazione delle acque di scarico (IDA) l'eventuale gas di depurazione, o nelle discariche il gas di discarica.
- **Grandi impianti.** Si tratta di turbine a gas e centrali con turbine combinate gas-vapore ad alta potenza singola (in un intervallo da >1 MW fino ad alcune centinaia di MW di potenza elettrica). Tali unità sono impiegate in centrali, centrali di teleriscaldamento o nell'industria.

Nell'anno di base 2019, l'inventario comprende poco meno di 8'000 aggregati con circa 12'800 MW di potenza d'ingresso. Questi aggregati sono in funzione per circa 4.8 milioni di ore all'anno e consumano circa 9.8 PJ di energia (Tabella 5). I generatori senza CHP dominano l'inventario con circa 6'500 aggregati, seguiti dai piccoli impianti di cogenerazione con poco meno di 1'200 aggregati; dei grandi impianti, 17 sono attualmente in funzione. In termini di potenza installata i rapporti tra i tipi di impianti sono simili a quelli del numero esistente. In termini di consumo finale di energia, tuttavia, i generatori senza CHP rappresentano solo circa il 5%, mentre le altre due categorie rappresentano ciascuna circa la metà della parte restante. Questo è dovuto al fatto che i generatori senza CHP sono utilizzati come generatori di emergenza solo per poche ore all'anno a scopi di test, mentre le altre due categorie di impianti funzionano per migliaia di ore all'anno.

L'evoluzione temporale dei parametri della struttura quantitativa è fondamentalmente crescente (Figura 5). Tuttavia, i piccoli impianti di cogenerazione e i grandi impianti hanno mostrato una leggera tendenza al ribasso negli ultimi dieci a quindici anni, il che è dovuto alla chiusura di alcuni grandi impianti nell'industria e alla sostituzione di piccoli aggregati di cogenerazione con aggregati più grandi, ma anche alla chiusura di piccoli aggregati senza sostituzione.

Entrambi gli scenari futuri basati sulle Prospettive energetiche 2050+ (PE2050+) dell'UFE prevedono un aumento della produzione di elettricità e di calore da parte di grandi e piccoli impianti di cogenerazione. Questo avrà l'effetto di aumentare il consumo di energia finale in futuro. Nello scenario dell'obiettivo climatico "Zero Base" l'aumento è un po' meno pronunciato; il biogas risp. il biometano prevale come fonte energetica più importante. Lo scenario "Proseguimento della politica energetica attuale (PEA)", che presuppone le condizioni quadro attuali, prevede un aumento un po' più forte del consumo di energia finale dominato dal gas naturale.

**Tabella 5: Numero, ore di funzionamento, potenza d'ingresso installata e consumo di energia finale di motori stazionari e di turbine a gas in funzione del tipo di impianto nel 2019.**

Tipo di impianto	Numero di aggregati	Ore di funzionamento [1000 h]	Ore di funzionamento per aggregato e anno	Potenza d'ingresso installata [MW]	Potenza d'ingresso per aggregato [MW]	Consumo di energia finale [PJ]
Generatore senza recupero del calore residuo	6'544	86	13	10'604	1.62	0.4
Piccolo impianto di cogenerazione	1'188	4'645	3'910	386	0.32	5.4
Grande impianto	17	24	1'384	1'807	106.28	4.0
<b>Somma/media</b>	<b>7'749</b>	<b>4'755</b>	<b>614</b>	<b>12'796</b>	<b>1.65</b>	<b>9.8</b>

Tabella INFRAS. Fonte: valutazione propria

Le emissioni dei motori stazionari e delle turbine a gas ammontano nel 2019 a circa 350'000 t di CO<sub>2</sub> fossile, a circa 1'100 t di NO<sub>x</sub> e a circa 25 t di polveri fini (Tabella 6). In termini di CO<sub>2</sub> fossile i grandi impianti dominano, poiché bruciano principalmente gas naturale, mentre i piccoli impianti di cogenerazione usano più biogas che gas naturale, che per definizione non emette CO<sub>2</sub> fossile. In termini di emissioni di inquinanti atmosferici dominano invece i piccoli impianti di cogenerazione. Anche i generatori senza recupero del calore residuo causano emissioni di inquinanti atmosferici sproporzionatamente alte rispetto al consumo di energia.

In futuro secondo lo scenario "Zero Base" tutte le emissioni sono in calo. La crescente sostituzione del gas naturale con biogas/biometano rinnovabile porta alla diminuzione le

emissioni di CO<sub>2</sub> fossile. Nello scenario "PEA" invece quest'ultime aumentano. In entrambi gli scenari le emissioni di inquinanti atmosferici diminuiscono grazie all'aumento previsto dell'uso di tecnologie dei gas di scarico come i filtri per le particelle (specialmente per i generatori di emergenza) o i catalizzatori di ossidazione e SCR (specialmente per i piccoli impianti di cogenerazione).

**Figura 5: Numero, potenza d'ingresso installata, ore di funzionamento e consumo di energia finale di motori stazionari e di turbine a gas in funzione del tipo di impianto tra il 1990 e il 2060 (scenario «Zero Base»).**

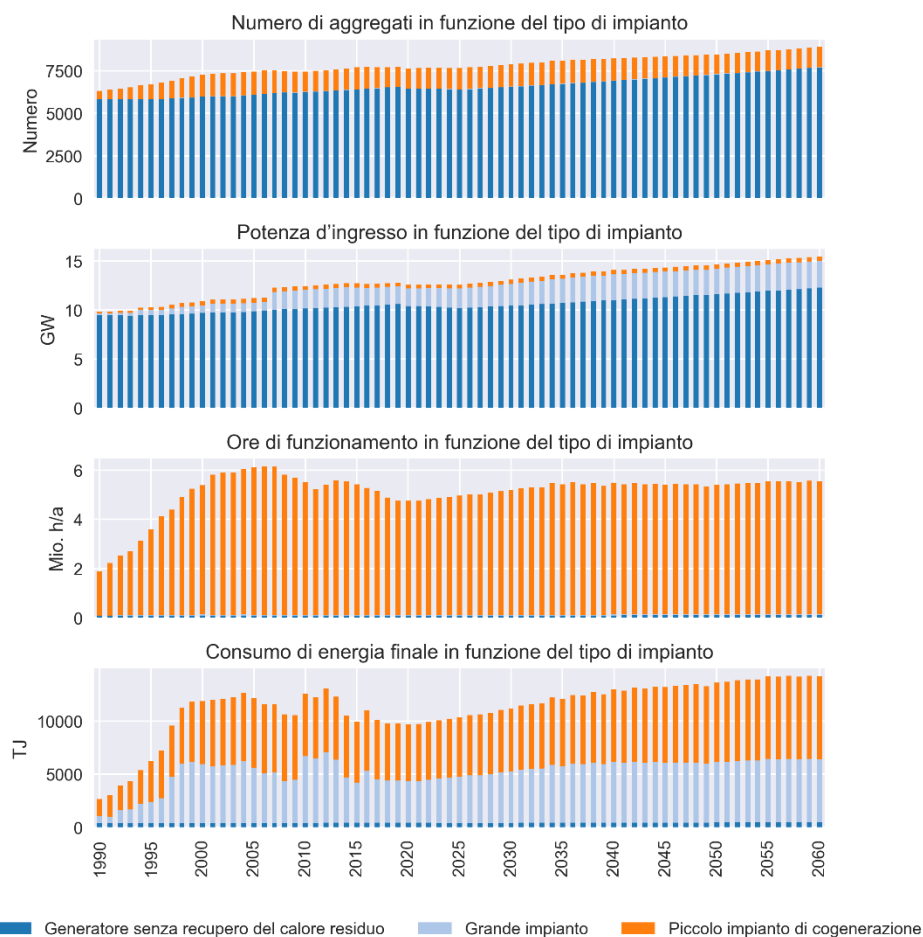


Grafico INFRAS. Fonte: valutazione propria

**Tabella 6: Emissioni di motori stazionari e di turbine a gas in funzione del tipo di impianto nel 2019.**

Tipo di impianto	CO <sub>2</sub> (fossile) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
Generatore senza recupero del calore residuo	31'304	397	58	7
Piccolo impianto di cogenerazione	89'351	545	622	14
Grande impianto	225'849	142	47	1
<b>Totale</b>	<b>346'504</b>	<b>1'084</b>	<b>727</b>	<b>22</b>

Tabella INFRAS. Fonte: calcoli propri

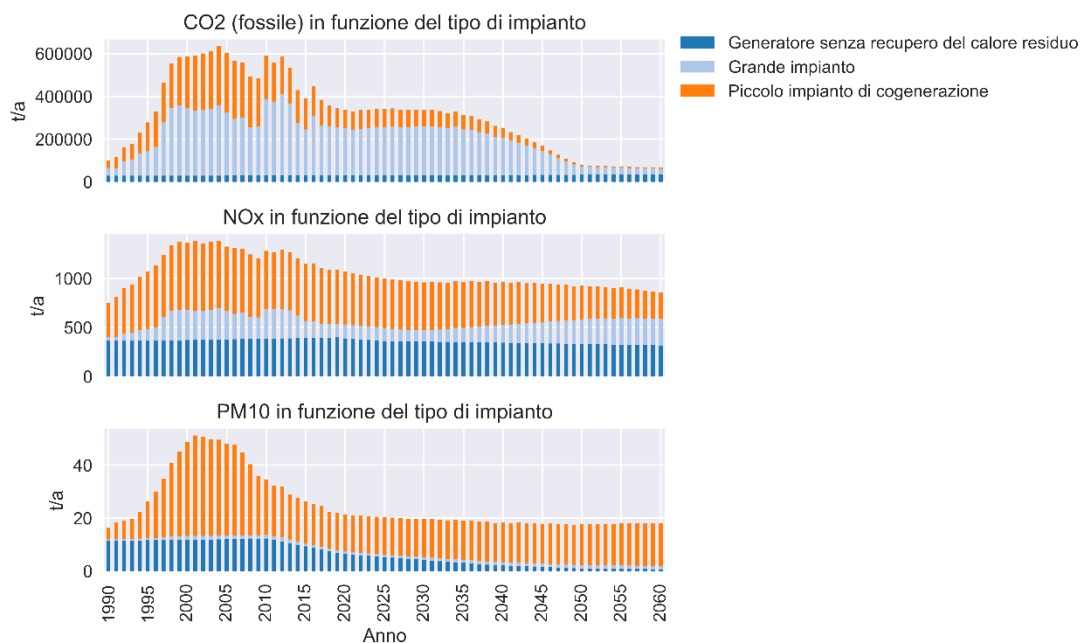
**Figura 6: Emissioni di CO<sub>2</sub> fossile, NO<sub>x</sub> e PM10 di motori stazionari e di turbine a gas in funzione del tipo di impianto, 1990-2060 (evoluzione futura secondo lo scenario «Zero Base»).**

Grafico INFRAS. Fonte: calcoli propri

Rispetto allo studio precedente, un rapporto limitato all'anno 2014 sulle emissioni dei motori stazionari e delle turbine a gas (INFRAS 2016), la differenza maggiore si registra nel numero di generatori senza CHP. Questo viene attualmente stimato a più del doppio rispetto al 2014. Questa è una conseguenza del campione attualmente più grande e più rappresentativo degli impegni circa l'uso dell'UDSC (Ufficio federale della dogana e della sicurezza dei confini) valutati rispetto a quello dello studio risalente al 2014. Poiché i generatori senza CHP dominano l'inventario in termini di numero e di potenza installata (cfr. Figura 5), queste due cifre raddoppiano all'incirca anche per tutto l'inventario. Tuttavia, a causa delle basse ore di funzionamento dei generatori senza CHP, questo cambiamento ha poco effetto sul consumo di energia finale e sulle emissioni.



## 1. Ausgangslage

Gestützt auf Art. 44 des Umweltschutzgesetzes (USG), Art. 39 der Luftreinhalte-Verordnung (LRV), aufgrund der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zum Klimawandel sowie aufgrund der Genfer Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung der UNECE erhebt das BAFU regelmässig die Luftschadstoff-Emissionen aller Quellen. Das BAFU, Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien, nimmt diese Aufgabe mit der periodischen Berichterstattung über Energie- und Treibstoffverbrauch sowie der Luftschadstoff- und Treibhausgasemissionen wahr. Je nach Sektor variieren Methodik und die jeweiligen Zeitpunkte der Berichterstattung.

Für den Bereich der stationären Verbrennungsmotoren und Gasturbinen bestand bisher noch kein vollständiges Emissionsinventar in Form einer Zeitreihe wie in anderen Sektoren, in welchen Verbrennungskraftmaschinen eingesetzt werden, namentlich dem Strassenverkehr (s. BAFU 2010, INFRAS 2017) und den mobilen Maschinen im Non-Road-Sektor (BAFU 2015). Als erster Schritt hin zu einem solchen Emissionsinventar wurde 2016 ein Standbericht erarbeitet, der die Bestände, Aktivitäten, Energieverbrauch und Emissionen von stationären Verbrennungsmotoren und Gasturbinen im Stichjahr 2014 beschreibt (INFRAS 2016). Die vorliegende Studie aktualisiert diesen Standbericht mit aktuellen Daten mit dem Stichjahr 2019, und leitet basierend auf historischen Daten und den Prognosen aus den kürzlich aktualisierten Energieperspektiven des BFE (EP2050+, BFE 2021a) eine Zeitreihe von 1990 (d.h. dem Basisjahr der internationalen Emissionsberichterstattung) bis 2060 (dem letzten Jahr der EP2050+) her.

Gesetzlich sind die Luftschadstoffemissionen der stationären Verbrennungsmotoren und Gasturbinen auf nationaler Ebene in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV)<sup>1</sup>, in Anhang 2, Ziffern 82-83 geregelt. Auf kantonaler und kommunaler Ebene existieren teilweise über die LRV hinausgehende Bestimmungen (z.B. LHA 2010, UGZ 2011). Auf EU-Ebene werden mit der «MCP Directive» (MCP = medium-size combustion plants, s. EUR-Lex 2015) die Emissionen stationärer Anlagen ab 1 MW Feuerungswärmeleistung (FWL) geregelt. Schliesslich begrenzt auch das Göteborg-Protokoll der UNECE die Emissionen stationärer Verbrennungsanlagen ab 5 MW FWL (UNECE 2013) auf europäischer Ebene. Auf den Markt der entsprechenden Aggregate in der Schweiz hat überdies die deutsche 44. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (44. BImSchV, BMJ 2019) einen gewissen Einfluss.

---

<sup>1</sup> LRV, SR 814.318.142.1

## 2. Zielsetzung

### 2.1. Übersicht

Ziel des vorliegenden Emissionsinventars ist die Quantifizierung von Beständen, installierten Leistungen, Betriebsstunden, Endenergieverbrauch und Luftschadstoffemissionen stationärer Motoren und Gasturbinen in der Schweiz. Auf der Basis von aktuellen Daten mit Stichjahr 2019, historischen/statistischen Daten und den Prognosen aus den Energieperspektiven des BFE (EP2050+, BFE 2021a) wird eine Zeitreihe der obengenannten Zielgrößen von 1990 (d.h. dem Basisjahr der internationalen Emissionsberichterstattung) bis 2060 (dem letzten Jahr der EP2050+) hergeleitet. Für den zukünftigen Teil (d.h. ab 2020) wird je eine Zeitreihe für die zwei Hauptszenarien der EP2050+, d.h. die Szenarien «WWB» («Weiter wie bisher») und «ZeroBasis» (Netto-Null-Zielszenario), erstellt.

### 2.2. Betrachtete Anlagen

Im Fokus des vorliegenden Emissionsinventars stehen stationäre Motoren und Gasturbinen, welche in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV), Anhang 2, Artikel 82 und 83 geregelt sind. Die Systemgrenzen sind identisch wie im Standbericht 2014 (INFRAS 2016) definiert. Sie umfassen drei Anlagentypen:

- Stromerzeugungsaggregate ohne Nutzung der entstehenden Abwärme («klassische» Generatoren). Diese Generatoren werden fast ausschliesslich als Notstromaggregate eingesetzt, d.h. sie werden weniger als 50 Stunden pro Jahr für Testzwecke betrieben, und müssen somit gemäss LRV weniger strenge Grenzwerte erfüllen als Anlagen mit höheren jährlichen Betriebsstunden. Die grosse Mehrheit dieser Generatoren wird mit Diesel oder Heizöl Extraleicht (HEL) betrieben. Das vorliegende Emissionsinventar umfasst mit HEL betriebene Aggregate – mehr dazu s. unten.
- Kleine WKK-Anlagen, d.h. Stromerzeugungsaggregate mit Nutzung der Abwärme nach dem Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung (WKK)<sup>2</sup>. Dabei handelt es sich meist um Blockheizkraftwerke (BHKW), welche hohe jährliche Betriebsstunden (zwischen ca. 2500 und 8000 h/a) aufweisen und grossmehrheitlich mit Gas – sei dies Erd-, Bio-, Klär- oder Deponegas – betrieben werden. Die Definition dieser Anlagen richtet sich nach der Definition

---

<sup>2</sup> WKK-Anlagen sind gemäss Definition des BFE Anlagen mit Umwandlung von mindestens 5% der eingesetzten Energie in Elektrizität und mit einem Gesamtnutzungsgrad (Wärme und Elektrizität) von mindestens 60% (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015).



in der BFE-Statistik (Kaufmann 2021) und umfasst BHKW bis zu einer elektrischen Leistung von 10 MW, sowie andere WKK-Anlagen (z.B. Wärmepumpen, Gasturbinen) bis zu einer elektrischen Leistung von 1 MW.

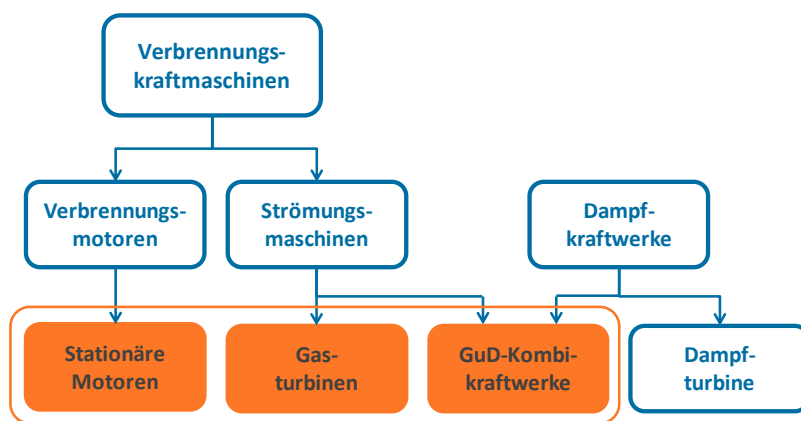
- Grosse Anlagen zur thermischen Energie- und Wärmeproduktion. Dabei handelt es sich hauptsächlich um Gasturbinen oder GuD-(Gas- und Dampf-)Kombikraftwerke in der Industrie oder für die öffentliche Strom-/Wärmeproduktion, mit >1 MW elektrischer Leistung.

Zur Abgrenzung des Inventars hinsichtlich Anlagentypen sind zwei Fälle speziell zu beachten:

- Generatoren ohne WKK können mobil oder stationär eingesetzt werden. Grundsätzlich werde die mobil eingesetzten Generatoren im Non-Road-Emissionsinventar (BAFU 2015) und die stationären im vorliegenden Inventar berücksichtigt, unabhängig vom verwendeten Energieträger. Generatoren ohne WKK werden teils mit Heizöl extraleicht (HEL) und teilweise mit Diesel betrieben. HEL und Diesel sind (abgesehen v. teilweise unterschiedlichen Gehalten von Komponenten wie Schwefel) technisch äquivalent, können also für die gleichen Motoren eingesetzt werden. Ausschliesslich für den stationären Einsatz erlaubt das Gesetz die Verwendung des steuerlich günstigeren HEL (vorausgesetzt die Einhaltung einer Verwendungsverpflichtung der Eidgenössischen Steuerverwaltung, s. Kap. 3.3.2). Es wird hier vereinfachend angenommen, dass alle stationären Motoren HEL verwenden, denn die Angabe in den Datenquellen, ob HEL oder Diesel verwendet wird, ist unzuverlässig (s. Kap. 4.2.5). So wird auch der Vergleich der in den Emissionsinventaren bottom-up berechneten Energieverbräuchen mit dem Treibstoffabsatz gemäss Statistik vereinfacht, denn der Dieselabsatz kann vollständig dem mobilen Bereich (Strassenverkehr und mobile Maschinen) und der HEL-Absatz dem stationären Bereich zugeordnet werden. Eine geringe, nicht näher quantifizierbare Unschärfe in Bezug auf die Menge des stationär verbrauchten Diesels wird damit in Kauf genommen.
- Bei grossen Anlagen zur thermischen Stromerzeugung muss unterschieden werden zwischen Dampfmaschinen (welche über die Verbrennung ausserhalb eines Kessels in diesem Hitze und damit Dampf erzeugen) und Verbrennungskraftmaschinen (welche durch innere Verbrennung mechanische Arbeit verrichten). Nur letztere sind in Ziffer 82-83 der LRV geregelt und fallen damit unter das vorliegende Inventar. Die GuD-Kombikraftwerke sind eine Kombination aus beidem – die Abwärme aus der Gasturbine wird für den Antrieb einer Dampfturbine genutzt, welche ebenfalls Strom erzeugt. Diese Kraftwerke werden im vorliegenden Inventar berücksichtigt. Es ist i.d.R. nicht möglich, die Emissionen der Gasturbine von den Emissionen allfälliger Zusatzfeuerungen zu trennen, da die

Abgase durch den gleichen Kamin abziehen; daher enthält das Emissionsinventar in diesen Fällen einen kleinen Anteil von Feuerungs-Emissionen. Abbildung 7 visualisiert die Kategorisierung der involvierten Maschinentypen und die diesbezügliche Abgrenzung des vorliegenden Emissionsinventars.

Abbildung 7: Abgrenzung des vorliegenden Emissionsinventars nach Maschinentyp.



Erfassung im Emissionsinventar  
„Stationäre Verbrennungsmotoren und Gasturbinen“

Grafik INFRAS.

### 2.3. Zielgrößen und Systemgrenzen

Die Zielgrößen des vorliegenden Emissionsinventars sind die folgenden:

- Bestand: Dieser wird in Anzahl Aggregaten, also einzelnen Generatoren, BHKW oder Gasturbinen ausgedrückt.  
BEACHTET: Im Unterschied dazu entspricht eine «Anlage» einem Standort und kann eines oder mehrere Aggregate umfassen; s. auch Kaufmann (2021).
- Installierte Leistung (hier: Inputleistung bzw. Feuerungswärmeleistung)
- Jährliche Betriebsstunden
- Endenergieverbrauch
- Emissionen der in Tabelle 7 aufgelisteten Treibhausgase und Luftschadstoffe.

Das vorliegende Inventar quantifiziert Energieverbrauch und Emissionen im Betrieb der Anlagen, d.h. Endenergieverbrauch und direkte Emissionen. Die Vorkette, d.h. Primärenergieverbrauch, Emissionen der Energieträger-Bereitstellung oder der Herstellung der Aggregate, ist nicht Teil der Betrachtung.

Tabelle 7: Im vorliegenden Inventar berechnete Schadstoffe

Kürzel	Bezeichnung	Treibhausgas	Luftschadstoff	Berichterstattung in*	NFR-Kategorie*	Rapportierung
CO <sub>2</sub> (total)	Kohlenstoffdioxid (total)	X		-	(keine)	fakultativ
CO <sub>2</sub> (fossil)	Kohlenstoffdioxid (fossil)	X		NIR		obligatorisch
CH <sub>4</sub>	Methan	X		NIR		obligatorisch
N <sub>2</sub> O	Lachgas	X		NIR		obligatorisch
NO <sub>x</sub>	Stickoxide	X		IIR + NIR	Main Pollutants	obligatorisch
HC	Kohlenwasserstoffe (=VOC, volatile organic compounds)	X		IIR + NIR		obligatorisch: NMVOC als Diff. HC – CH <sub>4</sub>
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid	X	X	IIR + NIR		obligatorisch (als SO <sub>2</sub> )
NH <sub>3</sub>	Ammoniak		X	IIR		obligatorisch
PM2.5	Partikelmasse (Partikelgrößen bis 2.5 µm)		X	IIR	Particulate Matter	obligatorisch (mit Zusatz «exhaust»)
PM10	Partikelmasse (Partikelgrößen bis 10 µm)		X	IIR		
TSP	Gesamtschwebepartikel (Partikelgrößen bis ca. 50 µm): Annahme: = PM10		X	IIR		
BC	Black Carbon	(X)	X	IIR		
CO	Kohlenstoffmonoxid	(X)	X	IIR + NIR	(keine)	obligatorisch
Pb	Blei		X	IIR	Priority Heavy Metals	obligatorisch
Cd	Cadmium		X	IIR		obligatorisch
Hg	Quecksilber		X	IIR		obligatorisch
As	Arsen		X	IIR	Additional Heavy Metals	fakultativ
Cr	Chrom		X	IIR		fakultativ
Cu	Kupfer		X	IIR		fakultativ
Ni	Nickel		X	IIR		fakultativ
Se	Selen		X	IIR		fakultativ
Zn	Zink		X	IIR		fakultativ
PCDD/PCDF	Dioxine und Furane		X	IIR		POPs (Persistent organic pollutants)
BaP	Benzo(a)pyren		X	IIR	obligatorisch	
BbF	Benzo(b)fluoranthen		X	IIR	obligatorisch	
BkF	Benzo(k)fluoranthen		X	IIR	obligatorisch	
IcdP	Indeno(1;2;3-cd)pyren		X	IIR	obligatorisch	
HCB	Hexachlorbenzol		X	IIR	obligatorisch	
PCB	Polychlorierte Biphenyle		X	IIR	obligatorisch	
Benzol	Benzol		X	n/a	(keine)	Nicht rapportiert, aber in EMIS geführt
HF	Fluorwasserstoff		X	n/a		
BaA	Benz(a)anthracen		X	n/a		

\* S. auch Glossar

### 3. Methodik

#### 3.1. Prinzip

Das vorliegende Emissionsinventar wendet eine Bottom-Up-Berechnung von Energieverbrauch und Emissionen an. Der Endenergieverbrauch ergibt sich aus der Multiplikation des Bestandes an Aggregaten mit deren Inputleistung, dem durchschnittlichen Lastfaktor und den jährlichen Betriebsstunden:

$$EV = \frac{N \cdot P_{In} \cdot \lambda \cdot h}{1'000'000} \quad (1)$$

mit:

- EV = Endenergieverbrauch [GWh/a]
- N = Bestand (Anzahl Aggregate)
- P<sub>In</sub> = Input-Leistung (= Feuerungswärmeleistung) [kW]
- λ = effektiver Lastfaktor (dimensionslos)
- h = Jährliche Betriebsstunden pro Aggregat [h/a]

In einigen Fällen liegt die Input-Leistung direkt aus den Datenquellen vor; in anderen Fällen ist die elektrische Nennleistung verfügbar, aus welcher die Inputleistung mittels dem elektrischen Wirkungsgrad berechnet wird:

$$P_{In} = \frac{P_{El}}{WG} \quad (2)$$

mit:

- P<sub>In</sub> = Input-Leistung (= Feuerungswärmeleistung) [kW]
- P<sub>El</sub> = Elektrische Nennleistung [kW]
- WG = Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad ist abhängig von der Leistung eines Aggregats und der Technologie. Die (mit Ausnahme grosser Anlagen, wo tlw. individuelle Werte verfügbar sind) verwendeten Werte sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Verwendete Wirkungsgrade bei kleinen WKK-Anlagen und Generatoren ohne WKK

Nennleistung	Dieselmotoren	Gasmotoren/ Gasturbinen
<18 kW	33.8%	27.5%
18 - 75 kW	33.8%	33.8%
> 75 kW	37.5%	37.5%

Quelle: BAFU 2015

Die Emissionen werden anschliessend basierend auf dem Endenergieverbrauch und energiebezogenen Emissionsfaktoren berechnet:

$$Em = \frac{EV \cdot EF}{1'000'000} \cdot 3600 \quad *$$
 (3)

mit:

Em = Jährliche Emissionen [t/a]

EF = Emissionsfaktor [g/GJ]

3600 = Konversionsfaktor GWh nach GJ

### 3.2. Gliederung

Die in Kapitel 3.1 beschriebenen Berechnungen werden pro Maschinenschicht angewendet. Die Maschinenschicht ergibt sich aus der Kombination der in Tabelle 9 aufgelisteten Gliederungen. Bei der Definition der Gliederungen wurde geachtet auf:

- Möglichst homogene Klassen hinsichtlich Berechnungsgrössen (z.B. Brennstoffverbrauchs- und Emissionsfaktoren);
- Unterscheidung von Klassen gemäss Gesetzen/Bestimmungen (z.B. Abgrenzungen von Grössenklassen);
- Kompatibilität mit der EMIS-Datenbank des BAFU (NFR-Codes, EMIS-Prozesse);
- Vergleichbarkeit und Kompatibilität mit anderen Datenquellen, z.B. der BFE-Statistik der thermischen Stromproduktion oder dem Non-Road-Emissionsinventar des BAFU.

Tabelle 9: Gliederung des Emissionsinventars.

Gliederung	Ausprägungen	Bemerkungen
Anlagentyp	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Generator ohne Abwärmenutzung</li> <li>▪ Kleine WKK-Anlage</li> <li>▪ Grosse Anlage</li> </ul>	Abgrenzung zwischen «Kleiner WKK-Anlage» und «Grosser Anlage» in Anlehnung an BFE-Statistik (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015)
NFR-Code	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 1 A 1 a: Public electricity and heat production</li> <li>▪ 1 A 1 b: Petroleum refining</li> <li>▪ 1 A 1 c: Manufacture of solid fuels and other energy industries</li> <li>▪ 1 A 2 d: Stationary combustion in manufacturing industries and construction: Pulp, paper and print</li> <li>▪ 1 A 2 g viii: Stationary combustion in manufacturing industries and construction: Other</li> <li>▪ 1 A 4 a i: Commercial/institutional stationary combustion</li> <li>▪ 1 A 4 b i: Residential stationary combustion</li> <li>▪ 1 A 4 c i: Agriculture/forestry/fishing stationary combustion</li> </ul>	Relevant für das Reporting ggü. der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zum Klimawandel (UNFCCC) sowie der Genfer Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP)
Maschinentyp	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Motor</li> <li>▪ Gasturbine</li> </ul>	
Brennstoff	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Heizöl extra leicht (HEL) und Diesel</li> <li>▪ Erdgas</li> <li>▪ Biogas (inkl. Klärgas, Deponiegas)</li> <li>▪ LPG (Liquefied petrol gas, z.B. Propan, Butan)</li> <li>▪ Andere fossile (z.B. Benzin)</li> <li>▪ Andere biogene (z.B. Biodiesel, Fett/Öl etc.)</li> </ul>	
Feuerungswärmeleistungsklasse	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ 0 – 100 kW</li> <li>▪ 100 kW – 1 MW</li> <li>▪ 1 – 5 MW</li> <li>▪ 5 – 20 MW</li> <li>▪ 20 – 40 MW</li> <li>▪ &gt;40 MW</li> </ul>	Bei Klein-WKK-Anlagen nicht unterschieden (Begründung s. Kapitel 3.4.3)
Abgastechnologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Magermotor</li> <li>▪ Dreiweg-Katalysator</li> <li>▪ Partikelfilter</li> <li>▪ SCR (Selective catalytic reduction)</li> <li>▪ NO<sub>x</sub>-Speicherkatalysator</li> <li>▪ Oxidations-Katalysator</li> <li>▪ Keine</li> <li>▪ DLE (nur Gasturbinen)</li> <li>▪ Wassereinspritzung (nur Gasturbinen)</li> </ul>	<p>Berücksichtigte Kombinationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Partikelfilter + Magermotor</li> <li>▪ Partikelfilter + SCR</li> <li>▪ Oxidations-Katalysator + SCR</li> </ul> <p>Beim Oxidations-Katalysator wird auch magerer Motorbetrieb angenommen. Weitere Kombinationen (z.B. OxiKat + PF) existieren, kommen aber in den Inputdaten nicht vor und sind entsprechend im Inventar nicht explizit berücksichtigt.</p>

Tabelle INFRAS.

### 3.3. Datenquellen

Das vorliegende Emissionsinventar kombiniert Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen. Sie sind in den folgenden Unterkapiteln beschrieben. Kapitel 6.1 enthält weitere Anmerkungen und Empfehlungen zur Datenqualität.

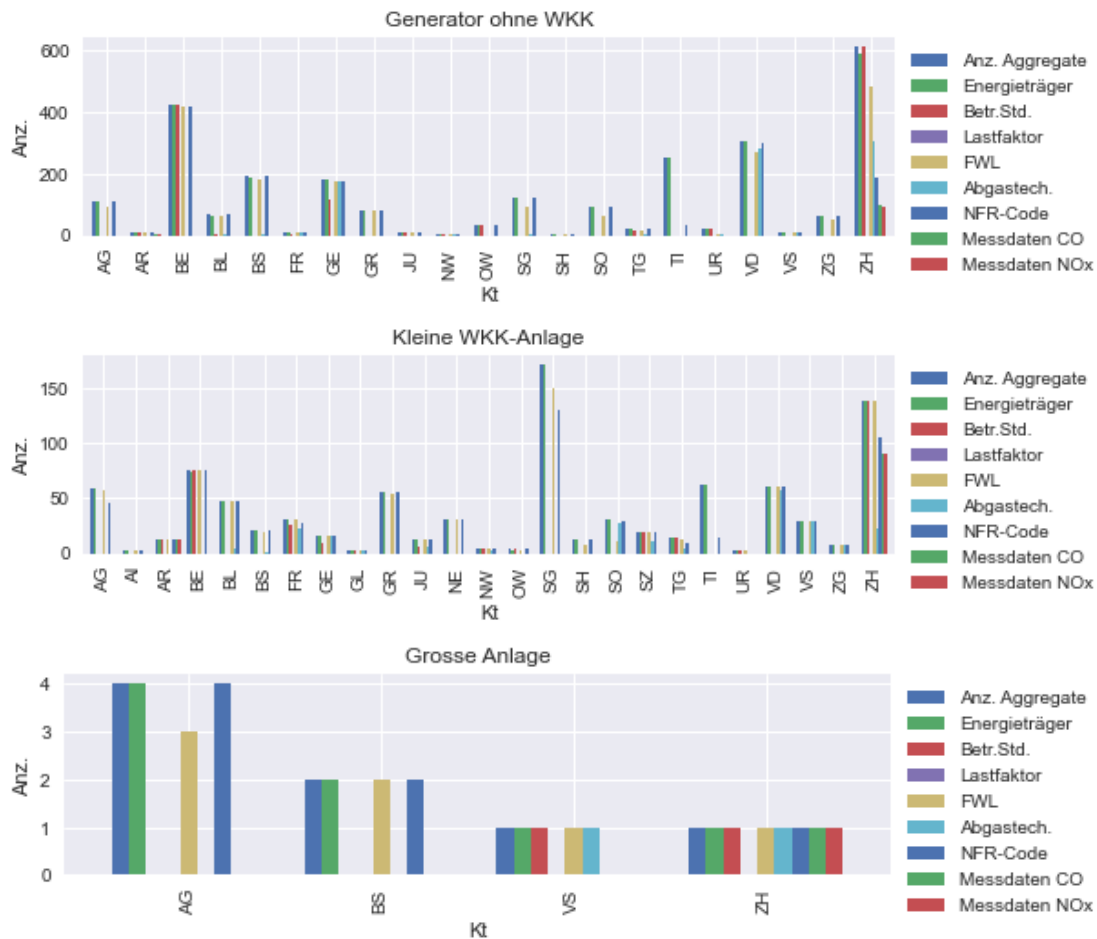
#### 3.3.1. Daten der kantonalen Fachstellen für Luftreinhaltung

Das BAFU führte für das vorliegende Inventar – wie schon für den Standbericht 2014 – eine Umfrage bei den kantonalen Fachstellen für Luftreinhaltung durch, in welcher alle für die Emissionsberechnung relevanten Daten angefragt wurden. Alle Kantone lieferten Auszüge ihrer Datenbestände für das Jahr 2019 (Ausnahme: Der Kanton Luzern konnte keine neuen Daten liefern – hier wurden die bereits für den Standbericht 2014 gelieferten Daten erneut genutzt). Sie beinhalten Stammdaten der Anlagen wie Angaben zum Betreiber und technische Angaben, betriebliche Angaben wie Betriebsstunden oder Treibstoffverbrauch, und teilweise Messresultate der periodischen Kontrollen.

Die Auswahl der vorhandenen Parameter, der Grad der Abdeckung sowie die Qualität der erfassten Angaben variieren von Kanton zu Kanton. Abbildung 8 gibt einen Eindruck der Datenverfügbarkeit. Dabei fällt insbesondere auf, dass Angaben zu den Abgastechnologien in vielen Fällen fehlen. Die Tatsache, dass die mittleren Nenn- oder Feuerungswärmeleistungen aus den Daten der kantonalen Fachstellen im Vergleich zu anderen Quellen (z.B. der WKK-Statistik des BFE, s. unten) höher liegen, deutet ausserdem darauf hin, dass entweder grössere Anlagen bevorzugt erhoben oder kontrolliert werden, oder dass Kantone mit im Schnitt grösseren Anlagen die Kontrolle oder Erfassung konsequenter durchführen.



Abbildung 8: Verfügbarkeit von Inputdaten je Parameter und Kanton, nach Anlagentyp, in den Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen



Grafik INFRAS. Quelle: Kantonale Luftreinhaltefachstellen, eigene Auswertung

### 3.3.2. Verwendungsverpflichtungen HEL des BAZG

Die beim Bundesamt für Zoll und Grenzsicherheit (BAZG) hinterlegten Verwendungsverpflichtungen von Heizöl extraleicht (HEL) für stationäre Stromerzeugungsanlagen stellen die wichtigste Datenquelle für das Mengengerüst der Generatoren ohne WKK dar. Die Verwendungsverpflichtung resultiert in einer Steuerbegünstigung bei der Mineralölsteuer, da sie erlaubt, Heizöl extraleicht – also einen Brennstoff – für den Antrieb eines Motors zu ver-

wenden. In den Genuss solcher Steuererleichterungen kommen Betreiber stationärer (genau genommen: auch transportabler, aber stationär arbeitender) Stromerzeugungsanlagen<sup>3</sup>.

Anders als noch bei der Erarbeitung des Standberichts 2014 liegen die entsprechenden Dossiers heute in digitaler Form als gescannte PDF-Dateien vor; zusätzlich stellte die damalige EZV (heute BAZG) eine Datenbankabfrage in Form einer Excel-Liste zur Verfügung, welche pro Dossier eine Zeile mit ID, Name und Adresse des Betreibers, Branche sowie Erfassungs- und ggf. Löschmodatum enthält. Dank diesen verbesserten Datenformaten konnten erstens mit ähnlichem Aufwand deutlich mehr Dossiers ausgewertet werden als noch für den Standbericht 2014 (über 200 Dossier aktuell ggü. 60 für den Standbericht), und zweitens erlaubte das Verzeichnis mit Branchenzugehörigkeit und den IDs, die Stichprobengrösse pro Branche im richtigen Verhältnis zur Gesamtzahl der Dossiers pro Branche festzulegen.

Die Detailauswertung der Dossiers zielte v.a. auf zwei Grössen:

- Einerseits die Anzahl Aggregate pro Dossier. Eine Verwendungsverpflichtung kann auf eine nicht begrenzte Anzahl Aggregate des Inhabers angewendet werden. Leider ist diese Anzahl aus den Dossiers oft nicht genau ersichtlich und musste aufgrund der vorhandenen Angaben geschätzt werden;
- Andererseits die Leistung der Aggregate. Auch diese ist nicht immer eindeutig ersichtlich, sondern kann teilweise den Schreiben der Inhaber an das BAZG oder beigelegten Kopien von Bedienungsanleitungen, Fotos oder handschriftlichen Dokumenten entnommen werden.

Weiter wurden, falls vorhanden, Gerätetypen, Baujahr und Emissionsstandards erfasst – die Verfügbarkeit dieser Angaben ist aber so heterogen, dass sie nicht ausgewertet werden konnten.

### 3.3.3. WKK-Statistik des BFE

Die Statistik des BFE zur thermischen Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz wird jährlich aktualisiert. Die darin berücksichtigten kleinen Anlagen decken sich grösstenteils mit dem Anlagentyp «kleine WKK-Anlagen» im vorliegenden Emis-

---

<sup>3</sup> Webseite des Bundesamts für Zoll und Grenzsicherheit zu Verwendungsverpflichtungen: <https://www.bazg.admin.ch/bazg/de/home/information-firmen/steuern-und-abgaben/einfuhr-in-die-schweiz/mineraloelsteuer/verpflichtungen/verwendungsverpflichtungen--formular-45-72-.html> (Zugriff am 26.02.2022)

sionsinventar. Bei den grösseren Anlagen berücksichtigt die BFE-Statistik auch Dampfturbinen, welche durch das vorliegende Inventar nicht abgedeckt sind (vgl. Kapitel 2.2). Generatoren ohne Abwärmenutzung) sind hingegen darin nicht enthalten.

Neben den jährlich aktualisierten Publikationen des BFE zur WKK-Statistik (aktuellste Ausgabe: Kaufmann 2021) stand eine Auswertung der zugrundeliegenden Datenbank zur Verfügung, die das BFE dem BAFU via die die Statistik erarbeitende Firma Eicher+Pauli zum Zweck des Emissionsinventars zur Verfügung stellte. Dieser Datensatz enthält Anzahl Aggregate sowie die totale Input-, elektrische und thermische Leistung der meisten Anlagekategorien der kleinen WKK-Anlagen für die Jahre 1990 – 2019, gegliedert nach den meisten Gliederungsebenen des Emissionsinventars (Energieträger, Feuerungswärmeleistungsklasse, Abgastechnologie und zusätzlich Anlagentyp gemäss der BFE-Statistik). Aus Datenschutzgründen wurden aber alle Angaben ausser die Anzahl Aggregate überall dort gelöscht, wo die Anzahl der Aggregate maximal 3 beträgt. Aufgrund dieser Vorgabe konnten bestimmte Gliederungsebenen (z.B. Maschinentyp, d.h. Motor vs. Gasturbine) oder Anlagekategorien mit einer geringen Anzahl Aggregate (insbesondere die Daten zu den grossen Anlagen) nicht sinnvoll mitgeliefert werden. Dies bedeutet, dass die datenschutzbedingten Lücken im Datenaufbereitungsprozess durch Schätzungen auf Basis der restlichen Angaben sowie der aggregierten Angaben in den publizierten Berichten gefüllt werden mussten (s. Kapitel 3.4.3).

Auch für das Mengengerüst der grossen Anlagen konnten den Berichten der WKK-Statistik wertvolle Inputs entnommen werden, trotz der Tatsache, dass zu diesen Anlagen aus Datenschutzgründen nur sehr aggregierte Kennzahlen zur Verfügung stehen und dass deren Systemgrenzen nicht mit dem vorliegenden Emissionsinventar übereinstimmen.

### 3.3.4. Weitere Datenquellen für die Mengengerüste

Weitere für die Mengengerüste verwendete Datenquellen umfassen:

- Die veröffentlichten Berichte und Daten zu den Energieperspektiven 2050+ des Bundesamtes für Energie (BFE 2021a) dienen als Grundlage zur Erstellung der Prognosezeitreihen des vorliegenden Inventars – s. Kap. 3.4.5.
- Ein unveröffentlichter Konzeptbericht des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz (BABS) zur Nachrüstung von Notstromaggregaten in Zivilschutzanlagen mit Diesel-Partikelfiltern (Krähenbühl und Bühlmann 2020). Dieser enthält u.a. ein Inventar der Notstromaggregate in Zivilschutzanlagen mit Aussagen zu deren Altersstruktur, DPF-Ausrüstung und zur laufenden Bestandesreduktion.
- Ein von EnergieSchweiz in Auftrag gegebener Bericht zu Stromverbrauch und Effizienzpotenzial in Schweizer Rechenzentren (Jakob et al. 2021) diene zur Plausibilisierung des

Bestandes der Notstromaggregate in der Dienstleistungs-Branche, an welchem die Rechenzentren einen bedeutenden Anteil haben.

- Die Daten zum Layer «Elektrizitätsproduktionsanlagen» im Bundes-Geoportal [map.geo.admin.ch](http://map.geo.admin.ch) (BFE 2021b) konnten genutzt werden, um grosse Anlagen im Sinne des vorliegenden Emissionsinventars zu identifizieren.
- Für die grossen Anlagen liefern die Webseiten und Geschäftsberichte der Betreiber aufschlussreiche Hinweise auf technische Angaben, Betriebsstunden oder den Brennstoffverbrauch.
- Zeitreihen und Prognosen des Bruttoinlandproduktes (BIP) des SECO (Referenzszenario, SECO 2021) wurden als Proxy für die Entwicklung der Bestände der Generatoren ohne Abwärmenutzung (für die meisten Branchen) verwendet (s. Kapitel 3.4.2).

### 3.3.5. Weitere Datenquellen zu Emissionsfaktoren

Neben den Daten der kantonalen Fachstellen für Luftreinhaltung, welche einige Messdaten enthalten (s. oben), wurden die folgenden Datenquellen zur Herleitung der Emissionsfaktoren benutzt:

- Das EMEP/EEA Guidebook 2019 (EMEP/EEA 2019) enthält Emissionsfaktoren für die betrachteten Anlagen und für eine Mehrheit der hier berechneten Treibhausgase und Luftschadstoffe, allerdings in den meisten Fällen nicht differenziert nach unterschiedlichen Abgastechnologien, sondern nur nach Anlagentyp und Brennstoff.
- Das Umweltbundesamt Deutschland (UBA) veranstaltete am 19.10.2021 einen Online-Workshop zum «Stand der Emissionsminderungstechnik bei kleinen Motoranlagen»<sup>4</sup>. An diesem Anlass wurden viele Messresultate (u.a. in Abhängigkeit verwendeter Abgastechnologien) präsentiert, welche in die hier verwendeten Emissionsfaktoren einfließen.
- Für einige grosse Anlagen standen Messberichte der Betreiber zur Verfügung.
- Die CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktoren wurden der EMIS-Datenbank des BAFU entnommen. Auch für Schadstoffe, für welche keine Quellen gefunden werden konnte, wurden die bisherigen Emissionsfaktoren aus der EMIS-Datenbank des BAFU verwendet.
- Die LCA-Datenbank-Ecoinvent 3.8 (Ecoinvent 2021), welche Emissionsfaktoren für thermische Stromerzeugung und WKK enthält, wurde ebenfalls verwendet. Dafür mussten die auf die Outputs Strom und Wärme allozierten Emissionsfaktoren im richtigen Verhältnis zusammengeführt und mittels Wirkungsgrad-Annahmen (s. Tabelle 3) konvertiert werden.
- Für die Auswirkung von Partikelfiltern wurde das Non-Road-Emissionsinventar des BAFU (BAFU 2015) konsultiert.

---

<sup>4</sup> S. <https://www.umweltbundesamt.de/programm-workshop-stand-der> (Zugriff am 27.02.2022)

- Die NIRs/IIRs anderer europäischer Länder wurden ebenfalls konsultiert.

## 3.4. Herleitung der Mengengerüste

### 3.4.1. Übersicht

Unter dem Begriff «Mengengerüst» werden im vorliegenden Bericht die folgenden Parameter verstanden: Bestand, Leistung/Leistungsverteilung, Verteilung der Abgastechnologien, durchschnittliche Lastfaktoren, Betriebsstunden, und der daraus herleitbare Endenergieverbrauch.

Da die Datenlage für die drei Anlagentypen unterschiedlich ist, differiert auch das Vorgehen bei der Herleitung der Mengengerüste nach den drei Anlagentypen. Es ist in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

Für die Generatoren ohne Abwärmenutzung existiert nur ein Zukunftsszenario, bzw. es wird angenommen, dass sie sich unter beiden betrachteten EP2050+-Szenarien gleich entwickeln; die entsprechenden Annahmen sind in Kapitel 3.4.2 beschrieben. Für die kleinen WKK-Anlagen und die grossen Anlagen werden die Zukunftsszenarien aus den Resultaten der EP2050+ (Prognos et al. 2020, BFE 2021a) hergeleitet. Diese Herleitung ist für beide Anlagentypen gemeinsam in Kap. 3.4.5 beschrieben.

### 3.4.2. Generatoren ohne Abwärmenutzung

Der **Bestand nach Leistungsklassen für das Jahr 2019** wurde mittels der Stichprobe aus der Detailauswertung von über 200 Dossiers hochgerechnet. Dabei wurden die durchschnittliche Anzahl im Jahr 2019 aktiver Aggregate pro Dossier pro Branche und FWL-Klasse mit der Anzahl Dossiers multipliziert (s. auch Abbildung 13). Diese Schätzung ist relativ grob, der Unsicherheitsbereich ist hoch (s. auch Kapitel 6). Plausibilisierungen anhand gewisser Branchen, zu welchen zusätzliche Informationen vorliegen (Rechenzentren, s. Jakob et al. 2021, und Notstromanlagen in Zivilschutzanlagen, s. Krähenbühl und Bühlmann 2020) sowie anhand der Daten der kantonalen Fachstellen, deuten jedoch zumindest nicht darauf hin, dass mit dieser Schätzmethode der Bestand systematisch über- oder unterschätzt würde.

Die **zeitliche Entwicklung des Bestandes zwischen 1990 und 2060** wurde für die meisten Branchen (ausser für die öffentliche Hand und die Landwirtschaft) auf Basis der Entwicklung des Bruttoinlandproduktes (BIP; Zeitreihe inkl. Prognose gemäss Referenzszenario des SECO, SECO 2021) geschätzt. Pro Prozentpunkt Veränderung des BIP gegenüber dem Ausgangswert werden 0.6 Prozentpunkte Veränderung im Bestand der Generatoren geschätzt. Dies wird gestützt durch die Entwicklung der Anzahl beim BAZG hinterlegter Dos-

siers zwischen 2010 und 2019 – was aber mit Vorsicht zu interpretieren ist, da Dossiers teilweise noch weiterbestehen, obwohl die Betreiber die entsprechenden Anlagen nicht mehr betreiben. Für die Branchen öffentliche Hand und Landwirtschaft werden grundsätzlich gleichbleibende Bestände angenommen; bei der öffentlichen Hand wird zusätzlich die laufende Bestandesreduktion der Notstromaggregate in Zivilschutzanlagen gem. Krähenbühl und Bühlmann (2020) berücksichtigt.

Die **durchschnittlichen Inputleistungen** wurden ebenfalls auf Basis der BAZG-Dossier-Detailauswertungen als Durchschnittswerte pro Branche und Feuerungswärmeleistungsklasse hergeleitet.

Die **jährlichen Betriebsstunden** wurden aus den Daten der Umfrage bei den kantonalen Fachstellen geschätzt. Dabei wurden alle Teil-Datensätze ausgeschlossen, bei denen bei sämtlichen Generatoren ohne WKK 50 Betriebsstunden pro Jahr angegeben sind. 50 Stunden pro Jahr sind das Maximum, bis zu welchem ein Einsatz als Notstromaggregat, und damit die Einhaltung weniger strenger Grenzwerte als für häufiger betriebene Aggregate, erlaubt ist. Die effektiven Betriebsstunden für die regelmässigen Tests liegen jedoch laut Betreibern eher um 10 h/a – ein Befund, den die Auswertung unter Ausschluss der 50 h-Werte bestätigt (s. Tabelle 14).

Der durchschnittliche **Lastfaktor** für die monatlichen Lasttests wird gestützt auf Kraemer (2011), Küng und Felder (2006) sowie Herstellerangaben bei 0.7 angesetzt. Diese Lasttests stellen normalerweise den einzigen Einsatz der Generatoren dar.

Die Verteilung der **Abgastechnologien** wurde den Daten bei den kantonalen Fachstellen entnommen. Die meisten Generatoren ohne Abwärmenutzung werden heute noch ohne Abgas-Nachbehandlung betrieben. Gemäss den Daten der kantonalen Fachstellen waren 2014 15% der Aggregate mit einem Dieselpartikelfilter ausgestattet und 2019 18%.

Für die Herleitung der DPF-Anteile der gesamten Zeitreihe wurde von den nach FWL-Klassen differenzierten Anteilen ausgegangen (da grössere Aggregate heute zu höheren Anteilen mit DPF ausgestattet sind). Ausserdem wird angenommen, dass:

- Die Aus- oder Nachrüstung von Generatoren mit DPF im Jahr 2010 einsetzte, und
- Ab 2019 fast alle neuen Generatoren mit DPF ausgestattet sind. Unter der Annahme, dass deren durchschnittliche Lebensdauer rund 50 Jahre beträgt, sind ab 2019 jedes Jahr 1/50 des Bestandes ab einer FWL von 100 kW zusätzlich mit DPF ausgestattet. Bei den kleinen Generatoren bis 100 kW FWL wird der heutige DPF-Anteil konstant angenommen.

Neben den Partikelfiltern sind 0.2% der Generatoren mit SCR-Katalysatoren ausgestattet. Dieser Anteil ist 2014 und 2019 etwa gleich. Zwar erfordern auf Bundesebene keine gesetzlichen Grenzwerte den Einsatz dieser Katalysatoren, im Kanton Zürich wird aber heute ein

SCR-Katalysator für grössere Anlagen gefordert. Daher wird für die Herleitung des SCR-Anteils ein analoger Ansatz verfolgt wie für die Herleitung des DPF-Anteils (s. oben): Es wird angenommen, dass ab 2019 40% der neuen Generatoren ab 1 MW FWL mit SCR ausgestattet sind. Die 40% entsprechen ungefähr dem Bestandesanteil des Kantons Zürich an dieser Grössenklasse gemäss den Daten der kantonalen Fachstellen; es ist möglich, dass der wahre Anteil des Kantons Zürich in diesem Datensatz etwas überschätzt wird, aber es kann gut sein, dass andere Kantone in Zukunft diese Anforderung auch stellen.

Die Verteilung des Anlagenbestandes nach **NFR-Kategorie** basiert auf der Auswertung der BAZG-Dossiers nach Branche (s. Tabelle 10).

**Tabelle 10: Zuordnung der Branchen gem. BAZG-HEL-Verwendungsverpflichtungen zu den NFR-Kategorien**

Branche	NFR-Code	NFR-Bezeichnung
Bauunternehmung	1 A 4 a i	Commercial/institutional stationary combustion
Dienstleistungen		
Elektrizitätswerk/Kraftwerk	1 A 1 a	Public electricity and heat production
Immobilien/Verwaltung	1 A 4 a i	Commercial/institutional stationary combustion
Industrie/Gewerbe		
Land-/Forstwirtschaft	1 A 4 c i	Agriculture/forestry/fishing stationary combustion
Restaurant/Hotel	1 A 4 a i	Commercial/institutional stationary combustion
Schausteller/Zirkus/Vergnügungsbetriebe		
Spital/Altersheim		
Transportunternehmung		
Öffentliche Hand		
Übrige		

### 3.4.3. Kleine WKK-Anlagen, 1990 – 2019

Das Mengengerüst der kleinen WKK-Anlagen für die Jahre 1990 – 2019 basiert grösstenteils auf der Statistik des BFE (Kaufmann 2021, s. Kapitel 3.3.3). Diese Daten wurden wie folgt aufbereitet:

- Die **Bestände** der meisten Anlagentypen (ausser W5 und T3, s. unten), liegen für die gesamte Zeitreihe vollständig und gliedert nach den meisten Gliederungsebenen des Emissionsinventars aus der Spezialauswertung für das BAFU (s. Kapitel 3.3.3) vor.
- Die datenschutzbedingten Lücken in den **Leistungsangaben** (s. Kapitel 3.3.3) wurden iterativ auf der Basis zunehmend aggregierter Durchschnittswerte der vorhandenen Daten gefüllt. Dabei wurde die durchschnittliche Inputleistung jeweils so skaliert, dass das Total des Endenergieverbrauchs gemäss den publizierten Berichten möglichst genau erreicht wird, aber die durchschnittliche Leistung nie ausserhalb der Grenzen der jeweiligen FWL-Klasse liegt.

- **Jährliche Betriebsstunden**, sowie die Bestände der **Anlagentypen W5** (motorgetriebene Wärmepumpen) **und T3** (Deponiegasanlagen, welche WKK-Bedingungen gemäss der Definition der WKK-Statistik des BFE nicht erfüllen), wurden auf Basis der Daten des Anhangs D1.b der publizierten jährlichen Berichte hinzugefügt. Diese Daten enthalten keine Differenzierung nach Leistungsklassen oder Abgastechnologien – diese wird daher auf der Basis der Durchschnitte der restlichen Anlagen mit dem gleichen Energieträger im gleichen Jahr geschätzt.
- Die BFE-Statistik differenziert hinsichtlich **Abgastechnologien** lediglich die Kategorien «Keine», «3-Wege-Kat.», «Magermotor», «SCR», «andere» und «unbekannt». Die Kategorien «andere» und «unbekannt» wurden gesplittet in die restlichen vorkommenden Abgastechnologien (gemäss Tabelle 9) auf Basis der Daten der kantonalen Fachstellen.
- Die **NFR-Kategorien** wurden basierend auf den Anlagentypen der WKK-Statistik gemäss dem Schlüssel in Tabelle 11 zugeordnet. Die Anteile der aufgesplitteten Anlagentypen wurden aus den Daten der kantonalen Fachstellen hergeleitet.

**Tabelle 11: Zuordnung der Anlagentypen gemäss BFE-WKK-Statistik zu den NFR-Kategorien**

Typ gem. BFE-Statistik	Beschreibung	NFR-Code	NFR Beschreibung	Anteil
W4.ARA	Abwasserreinigungsanlage (ARA)	1 A 4 a i	Commercial/institutional stationary combustion	100.0%
W4.BIO.1	Biogas Landwirtschaft	1 A 4 c i	Agriculture/forestry/fishing stationary combustion	100.0%
W4.BIO.2	Biogas Gewerbe und Industrie	1 A 4 a i	Commercial/institutional stationary combustion	100.0%
W4.FOS	fossile WKK-Anlagen	1 A 1 a	Public electricity and heat production	22.4%
W4.FOS	fossile WKK-Anlagen	1 A 4 a i	Commercial/institutional stationary combustion	69.8%
W4.FOS	fossile WKK-Anlagen	1 A 4 b i	Residential stationary combustion	7.8%
W4.DEP	Deponiegasverstromung mit WKK	1 A 4 a i	Commercial/institutional stationary combustion	100.0%
W5	Fossile Wärmepumpen	1 A 4 a i	Commercial/institutional stationary combustion	90.0%
W5	Fossile Wärmepumpen	1 A 4 b i	Residential stationary combustion	10.0%
T3	Deponiegasverstromung ohne WKK	1 A 4 a i	Commercial/institutional stationary combustion	100.0%

#### 3.4.4. Grosse Anlagen, 1990 - 2019

Für die grossen Anlagen – insgesamt 26 Aggregate in der Schweiz im Zeitraum 1990 bis 2019, wovon 17 im Jahr 2019 in Betrieb waren – wurden die verfügbaren Angaben (Anzahl Gasturbinen, Leistung, Betriebsstunden, Abgastechnologie, Energieverbrauch) individuell



pro Anlage zusammengetragen. Sie stammen grösstenteils von den kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen, aus öffentlich zugänglichen Webseiten und Geschäftsberichten, sowie von Direktanfragen bei den Betreibern. Die so gesammelten Angaben wurden mit den aggregierten Daten aus Kaufmann (2021) kombiniert. Aus der installierten elektrischen Leistung pro Aggregat, Annahmen oder, wo vorhanden, Daten zu Wirkungsgrad und Lastfaktor und durchschnittlichen Vollast-Betriebsstunden pro Anlagekategorie, konnten Energieverbrauch und Stromproduktion berechnet werden, die dann wiederum zumindest grob mit den aggregierten Zeitreihen der WKK-Statistik plausibilisiert werden konnten. Zudem konnten bottom-up berechnete CO<sub>2</sub>-Emissionen für die grösste noch bestehende Anlage – die Energiezentrale Forsthaus in Bern – für die Jahre 2013 bis 2019 mit den Angaben aus den entsprechenden Geschäftsberichten plausibilisiert und die Betriebsstunden ermittelt werden.

Als Basis für die Erstellung der prognostischen Zeitreihen (s. nächstes Kapitel) wurden die Daten zu den individuellen Aggregaten nach den Gliederungsebenen in Tabelle 9 aggregiert.

#### 3.4.5. Zukunftsszenarien für kleine WKK- und grosse Anlagen

Für die kleinen WKK- sowie die grossen Anlagen wurden zwei Zukunftsszenarien basierend auf den beiden Hauptszenarien der EP2050+ (BFE 2021a) erarbeitet. Diese sind:

- «WWB» («Weiter wie bisher»), welches aktuellen politischen Rahmenbedingungen entspricht, sowie
- «Zero Basis», ein Zielszenario, bei dem das Netto-Null-Klimaziel im Jahr 2050 erreicht wird.

Die Zukunftsszenarien des hier präsentierten Inventars basieren auf den auf der Website des BFE veröffentlichten Resultaten, sowohl den «Hauptergebnissen» als auch den etwas detaillierteren Ergebnissen zur Energieumwandlung:

- Aus den Zeitreihen zur Stromerzeugung wurden relative Entwicklungsfaktoren für fossile und mit erneuerbaren Energieträgern betriebene Anlagen für die Jahre 2019 bis 2060 hergeleitet, wobei letztere in den EP2050+-Resultaten zusätzlich nach ARA und Rest differenziert sind (Abbildung 9). Diese Entwicklungsfaktoren wurden auf die entsprechenden aggregierten Kategorien des Inventars des Jahres 2019 angewendet. Die relativen Anteile der feiner differenzierten Kategorien wurden, wo keine Zusatzinformation besteht, konstant weitergezogen.

Verschiebungen ergeben sich dennoch bei den biogasbetriebenen Anlagen: Von diesen

existieren bisher keine als «gross» kategorisierten Anlagen. Für die Zukunft wird angenommen, dass sich neue Biogas-Anlagen gemäss dem heutigen Verhältnis der mit fossil betriebenen Anlagen auf «grosse» und «kleine» Anlagen verteilen.

Beachte: Die Corona-Pandemie war bei der Erarbeitung der prognostischen Zeitreihen der EP2050+ noch nicht bekannt und ist daher nicht berücksichtigt.

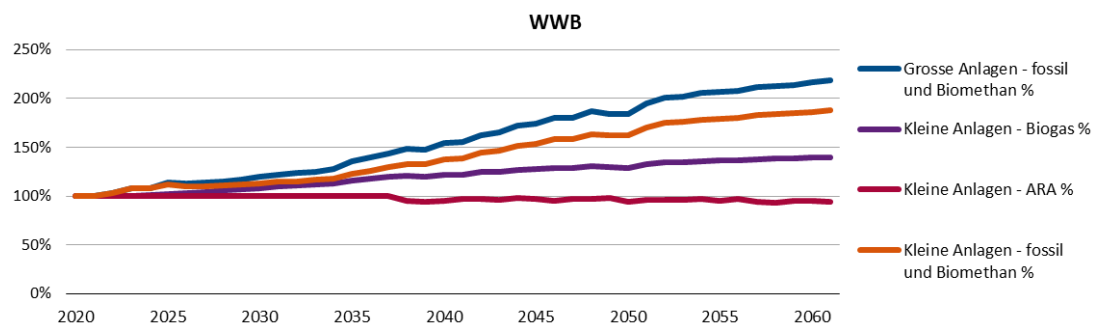
- Auch bei den heute (grösstenteils) fossil mit Erdgas aus dem Gasnetz betriebenen Anlagen wird ein gewisser Anteil beigemishtes, zu Biomethan aufbereitetes Biogas unterstellt. Bis 2060 beträgt dieser unter dem Szenario «WWB» rund 10%, unter «Zero Basis» über 90%. Diese Energieträgermische werden ebenfalls übernommen, so dass auch die als «fossil» bezeichneten Anlagen teilweise erneuerbar betrieben werden.

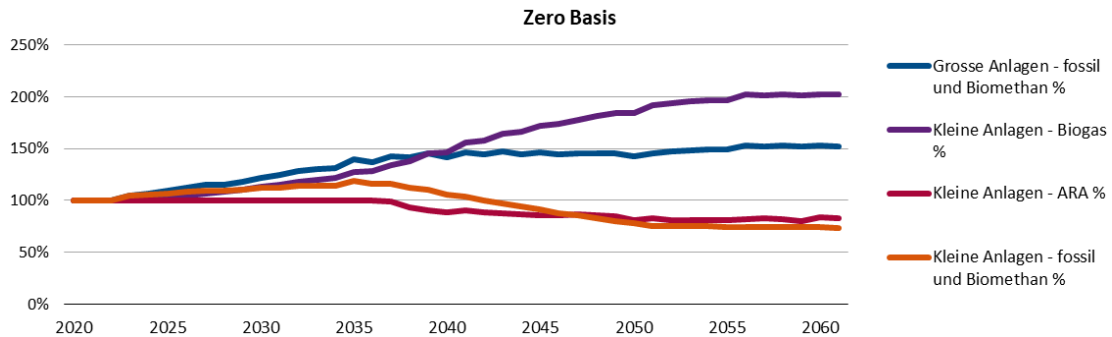
Eine Beimischung synthetischen Gases (PtG) wird in den EP2050+ nicht unterstellt; auch für HEL wird kein Mix mit biogenen oder synthetischen Brennstoffen angenommen.

- Die Anteile der Abgastechnologien am Bestand werden in Zukunft nicht gleich bleiben, sondern es wird angenommen, dass sich die heute modernen Technologien im Bestand mehr und mehr durchsetzen werden. Bei den kleinen WKK-Anlagen wird angenommen, dass sich die Kombination Oxidationskatalysator + SCR bis 2050 bei 75% des Bestandes durchsetzen wird; die Fortsetzung dieses Trends resultiert bis 2060 sogar in gut 95% des Bestandes, der mit diesen Technologien betrieben wird (Abbildung 10).

Für die grossen Anlagen werden keine derartigen Annahmen getroffen, da sich kein diesbezüglicher Trend feststellen lässt – und aufgrund der Messwerte auch kein eindeutiges Bild zu deren Wirkung. Das liegt daran, dass es sich um wenige Anlagen handelt, welche individuell gebaut und eingestellt werden. Es wird daher angenommen, dass die Verteilung der Abgastechnologien gleich bleibt wie heute.

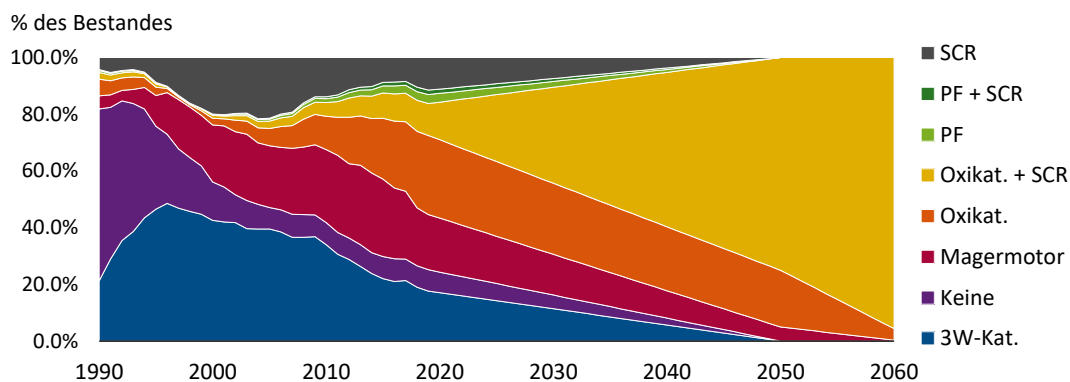
**Abbildung 9: Entwicklungsfaktoren 2020-2060 unter den EP2050+-Szenarien «WWB» (oben) und «Zero Basis» (unten).**





Grafik INFRAS. Quellen: BFE 2021a, eigene Berechnungen

**Abbildung 10: Verteilung der Abgastechnologien bei den kleinen WKK-Anlagen über die gesamte Zeitreihe.**



Grafik INFRAS. Quellen: Kaufmann 2021, kantonale Lufthygienefachstellen, eigene Berechnungen

## 3.5. Emissionsberechnung

### 3.5.1. Herleitung der Emissionsfaktoren

Die Emissionsfaktoren wurden aus den in Kapitel 3.3.5 genannten Quellen nach den folgenden Prinzipien hergeleitet:

- Eine Differenzierung nach Maschinentyp und (Abgas-)technologie wurde überall da angewendet, wo sie möglich und plausibel ist. Dies führt dazu, dass v.a. für die regulierten Schadstoffe CO, NO<sub>x</sub> und PM, für welche die meisten Messwerte vorliegen und auf welche verschiedene Abgastechnologien einen eindeutigen Einfluss haben, differenzierte Emissionsfaktoren vorliegen. In einigen Fällen wurden auch gesetzliche Grenzwerte, die

nur mit einer bestimmten Technologie erreicht werden können, als Emissionsfaktoren verwendet.

- Bei der Herleitung der Emissionsfaktoren aus Messwerten wurden die Emissionsfaktoren als Mittelwert aller vorhandenen Messungen für den entsprechenden Maschinentyp, Brennstoff und die entsprechende Abgastechnologie berechnet. Ausreisser, welche auf schlecht gewartete Maschinen schliessen lassen, wurden bewusst nicht ausgeschlossen, da solche schlecht gewarteten Maschinen ja tatsächlich vorkommen und im Inventar repräsentiert sein sollten.
- Die Umrechnung von  $\text{mg/m}^3$  in  $\text{g/GJ}$  (und umgekehrt) erfolgt nach der in EMEP/EEA (EMEP/EEA 2016) beschriebenen Methodik über das spezifische theoretische (stöchiometrische) Volumen des Abgases nach Brennstoff und Maschinentyp. Die Volumenangaben stammen aus den Messanleitungen des Lufthygieneamts beider Basel (LHA 2008a, 2008b) und sind in Tabelle 18 (Annex A1) aufgelistet.
- Eine Verschlechterung der Emissionen zwischen Wartungen wird nicht explizit berücksichtigt, obwohl es Hinweise auf eine solche gibt (z.B. in Ebertsch 2021). Dafür müssten aber einerseits deutlich mehr Messungen in Abhängigkeit der Zeit seit der letzten Wartung sowie auch durchschnittliche Wartungsintervalle verfügbar sein, was nicht der Fall ist. Anstatt dessen wurden die Ergebnisse der Langzeitmessungen von Ebertsch (2021) bei der Festlegung der durchschnittlichen Emissionsfaktoren berücksichtigt.
- Die energiebasierten  $\text{CO}_2$ -Emissionsfaktoren wurden der EMIS-Datenbank des BAFU, also der Grundlage für das offizielle Emissionsreporting der Schweiz, für das Jahr 2020 entnommen.
- Das EMEP/EEA Guidebook 2019 (EMEP/EEA 2019) wurde als Standardquelle für die meisten weiteren Schadstoffe verwendet, differenziert allerdings nur nach Maschinentyp (Motor vs. Gasturbine) und Diesel- vs. Gasmotoren.
- Die verbleibenden Lücken wurden aus anderen Quellen gefüllt (Ecoinvent 3.8, National/Informative Inventory Reports von Deutschland und Norwegen, EMIS-Datenbank des BAFU).

Die resultierenden Emissionsfaktoren sind im Anhang A2, Tabelle 19 bis Tabelle 21, aufgelistet.

### 3.5.2. Berechnung der Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionen

Die Emissionen werden nach Formel (3) in Kapitel 3.1 berechnet.

Für die Energieträger «Rest biogen» und «Rest fossil» werden die folgenden Emissionsfaktoren verwendet:

- «Rest biogen»: Diese Kategorie umfasst gemäss Kaufmann (2021) v.a. Biodiesel sowie Fette und Öle. Es werden daher Emissionsfaktoren für Biodiesel angewendet, welche als identisch mit denjenigen von HEL bzw. Diesel angenommen werden; die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen werden aber auf 0 gesetzt.
- «Rest fossil»: Hier wird basierend auf Kaufmann (2021) angenommen, dass es sich meist um LPG handelt, und die entsprechenden Emissionsfaktoren werden angewendet.

## 4. Mengengerüste

### 4.1. Übersicht

Insgesamt umfasst das vorliegende Inventar im Jahr 2019 knapp 8'000 Aggregate mit rund 12'800 MW Inputleistung, welche während rund 4.8 Millionen Stunden pro Jahr betrieben werden und rund 9.8 PJ Energie verbrauchen (Tabelle 12 und Abbildung 11).

Die drei **Anlagentypen** des Emissionsinventars unterscheiden sich stark hinsichtlich der Mengengerüst-Parameter Bestand, Betriebsstunden, installierte Leistung und Energieverbrauch:

- Hinsichtlich **Bestand** dominieren klar die Generatoren ohne WKK. Sie machen im Stichjahr 2019 gut 6'500 Aggregate aus. Gefolgt werden sie von den kleinen WKK-Anlagen mit knapp 1'200 Aggregaten. Die grossen Anlagen weisen dagegen mit 17 Aggregaten im Jahr 2019 einen sehr geringen Bestand auf. Über die Zeitreihe 1990-2060 hinweg bleibt dieses Verhältnis in etwa stabil.
- Auch hinsichtlich **installierter Inputleistung** sind die Generatoren ohne WKK aufgrund der hohen Anzahl Aggregate die wichtigste Anlagekategorie. 2019 weisen sie rund 10'000 MW installierte Inputleistung auf. An zweiter Stelle folgen bezüglich installierter Leistung die grossen Anlagen mit knapp 1'800 MW im Jahr 2019 – dies aufgrund ihrer hohen individuellen Inputleistung, die von durchschnittlich 36 MW im Jahr 1990 auf geschätzte 150 MW im Jahr 2060 steigt. Die kleinen WKK-Anlagen erreichen hingegen 2019 nur ein Total von knapp 400 MW, bei einer individuellen durchschnittlichen Inputleistung von rund 300 kW. Auch diese Rangreihenfolge bleibt über die ganze Zeitreihe erhalten.
- Hinsichtlich **Betriebsstunden** dominieren klar die kleinen WKK-Anlagen, denn sie werden für Strom- und Wärmeproduktion einen Grossteil des Jahres dauerhaft betrieben. Gegen die total 4.6 Mio. Betriebsstunden dieses Anlagentyps im Jahr 2019 erscheinen die rund

86'000 Stunden der Generatoren ohne WKK (welche als Notstromaggregate im Normalfall nur testweise für wenige Stunden pro Jahr betrieben werden) und die rund 20'000 Betriebsstunden der grossen Anlagen (aufgrund ihrer geringen Anzahl) verschwindend klein. Auch dieser Befund gilt für die ganze Zeitreihe.

- Bezüglich **Endenergieverbrauch** liegen ebenfalls die kleinen WKK-Anlagen mit rund 5.4 PJ im Jahr 2019 an erster Stelle. Die grossen Anlagen liegen aber mit 4.0 PJ in einer ähnlichen Grössenordnung. Beim Endenergieverbrauch fallen die Generatoren ohne WKK aufgrund ihrer geringen Betriebsstunden bei gleichzeitig kleiner Anlagengrösse wenig ins Gewicht.

**Tabelle 12: Bestand, Betriebsstunden, installierte Inputleistung und Endenergieverbrauch stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp im Jahr 2019.**

Anlagentyp	Anzahl Aggregate	Betr.Std. [1000 h]	Betr.Std. pro Aggregat und Jahr	Installierte Inputleistung [MW]	Inputleistung pro Aggregat [MW]	Endenergieverbrauch [PJ]
Generator ohne Abwärmennutzung	6'544	86	13	10'604	1.62	0.4
Kleine WKK-Anlage	1'188	4'645	3'910	386	0.32	5.4
Grosse Anlage	17	24	1'384	1'807	106.28	4.0
<b>Summe/Mittelwert</b>	<b>7'749</b>	<b>4'755</b>	<b>614</b>	<b>12'796</b>	<b>1.65</b>	<b>9.8</b>

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

Betrachtet man die Mengengerüste **nach Energieträger**, so ist Erdgas historisch der bedeutendste Energieträger für stationäre Motoren und Gasturbinen. Es macht 2019 53% des Endenergieverbrauchs aus. Dazu kommt Biogas mit 41%. HEL folgt mit knapp 6%; andere Energieträger (z.B. LPG) machen weniger als 1% des Energieverbrauchs aus (Tabelle 13).

In der Vergangenheit war die relative Bedeutung von HEL grösser – 1990 war es für 17% des Endenergieverbrauchs verantwortlich. In der Zukunft nimmt die Bedeutung von HEL weiter leicht ab (obwohl wir annehmen, dass es der einzige Brennstoff für Notstromanlagen bleibt). Das Verhältnis zwischen Erdgas und Biogas (bzw. Biomethan) in der Zukunft variiert je nach Szenario: Unter dem Szenario «WWB» bleibt die relative Bedeutung von Erdgas ähnlich hoch wie heute bzw. nimmt leicht zu (auf 57% des Endenergieverbrauches im Jahr 2060). Unter «Zero Basis» hingegen wird Erdgas viel stärker durch Biogas (inkl. Biomethan) ersetzt – bis 2060 macht letzteres ca. 93% des Endenergieverbrauches aus (s. auch Abbildung 12).

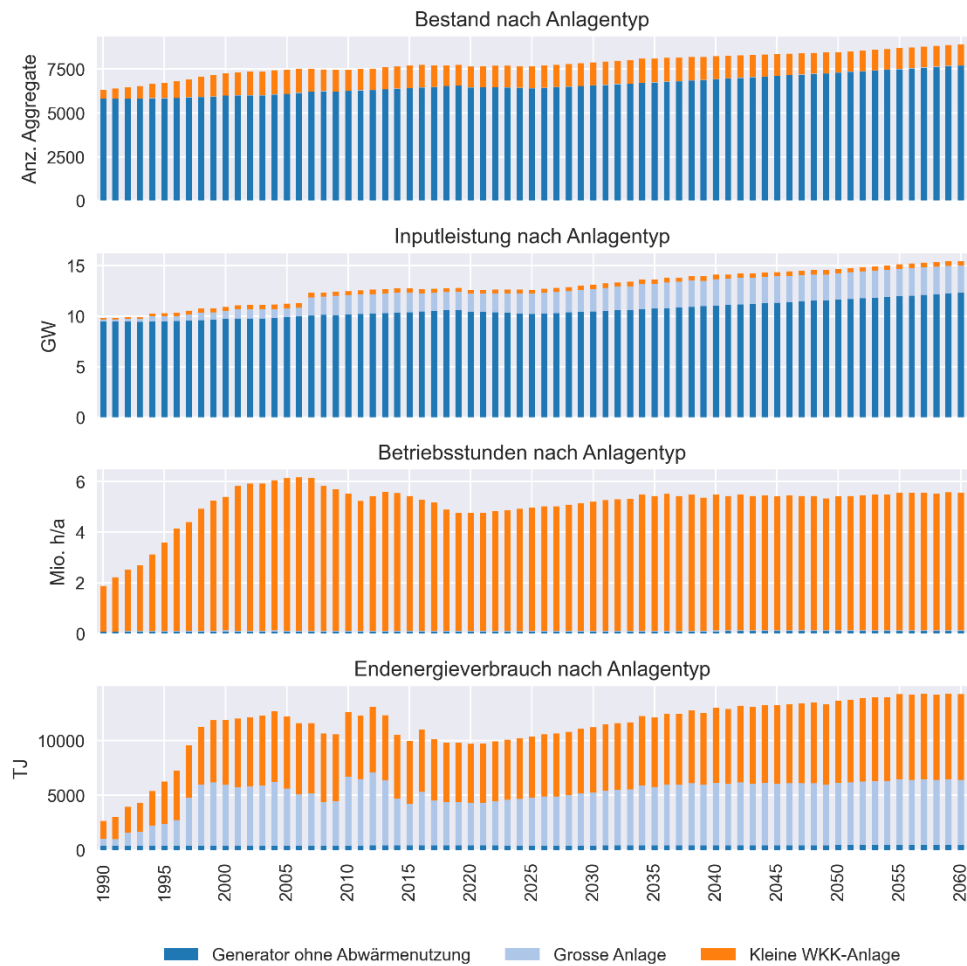
**Tabelle 13: Bestand, Betriebsstunden, installierte Inputleistung und Endenergieverbrauch stationärer Motoren und Gasturbinen nach Energieträger im Jahr 2019.**

Energieträger	Anzahl Aggregate	Betr.Std. [1000 h]	Betr.Std. pro Aggregat und Jahr	Installierte Inputleistung [MW]	Inputleistung pro Aggregat [MW]	Endenergieverbrauch [PJ]
Biogas	537	2'861	5'328	207	0.38	3.8
CNG	578	1'564	2'706	1'754	3.03	5.4
HEL	6'598	220	33	10'828	1.64	0.5
Rest biogen	8	33	4'184	4	0.52	0.0
Rest fossil	28	76	2'720	4	0.13	0.0
<b>Summe/Mittelwert</b>	<b>7'749</b>	<b>4'755</b>	<b>614</b>	<b>12'796</b>	<b>1.65</b>	<b>9.8</b>

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

Die zeitliche Entwicklung der Mengengerüste ist in Abbildung 11 und Abbildung 12 visualisiert; in den folgenden Unterkapiteln wird näher darauf eingegangen. Weitere Tabellen zu den Mengengerüsten finden sich in Annex A3.

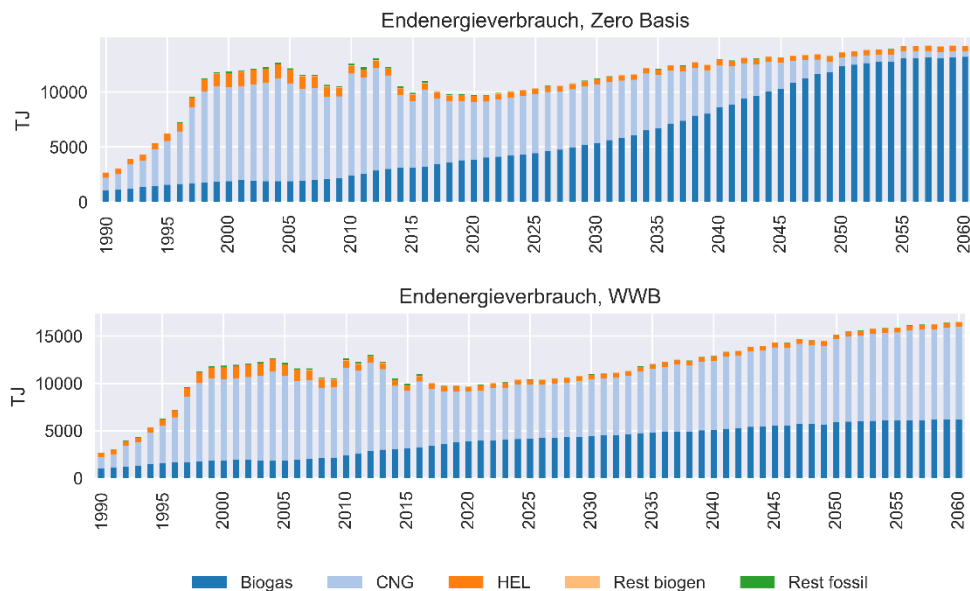
**Abbildung 11: Bestand, Betriebsstunden, installierte Inputleistung und Endenergieverbrauch stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp über die Zeitreihe 1990-2060 (Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Auswertung



**Abbildung 12: Endenergieverbrauch stationärer Motoren und Gasturbinen nach Energieträger, 1990-2060 im Vergleich der beiden Szenarien «Zero Basis» und «WWB».**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

## 4.2. Generatoren ohne Abwärmenutzung

### 4.2.1. Bestand

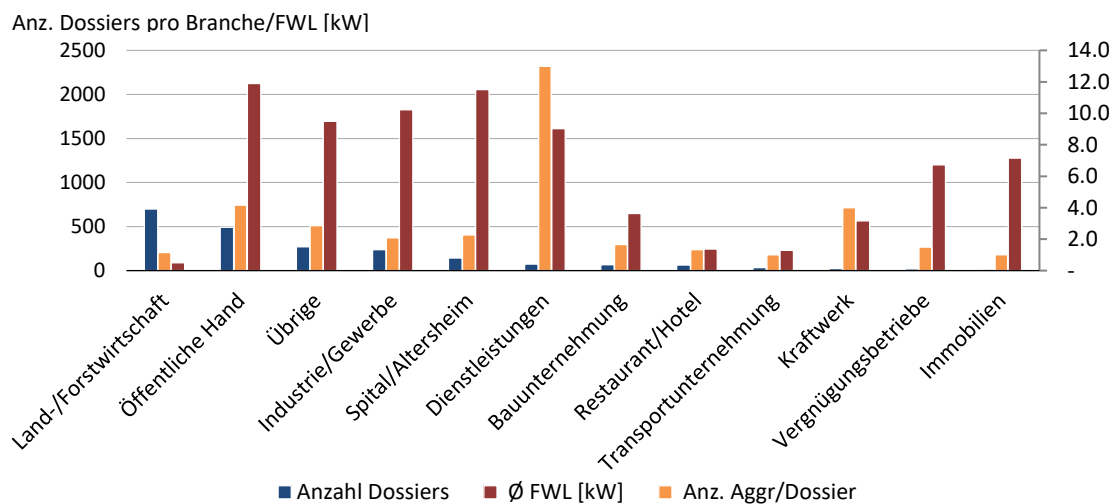
Der Bestand an Generatoren ohne Abwärmenutzung, welche fast ausschliesslich als Notstromaggregate eingesetzt werden, bewegt sich zwischen 1990 und 2060 zwischen 5'800 (1990) und 7'700 (2060) Aggregaten, mit rund 6'500 Aggregaten im Stichjahr 2019 (Abbildung 14). Diese verteilen sich auf verschiedene Branchen, unter denen die Land- und Forstwirtschaft sowie die öffentliche Hand (namentlich Zivilschutzanlagen) den grössten Anteil aufweisen (Abbildung 13). Aufgrund der Annahme, dass sich die Anzahl Notstromaggregate in den meisten Branchen (ausser Land-/Forstwirtschaft und öffentlicher Hand) parallel zum BIP entwickelt (s. Kap. 3.4.2), nimmt der Bestand kontinuierlich zu. Nur zwischen 2020 und 2025 ist er aufgrund der laufenden Reduktion der Notstromanlagen in Zivilschutzanlagen (Krähenbühl und Bühlmann 2020) leicht rückläufig.

Die Unsicherheit des Bestandes ist aufgrund der Datenlage hoch. Ein Teil der Unsicherheit liegt in der Anzahl Aggregate pro HEL-Verwendungsverpflichtungs-Dossier aus der Stichprobe der Detailauswertung begründet. Die durchschnittliche Anzahl Aggregate pro Dossier variiert stark zwischen den Branchen (s. Abbildung 13): In gewissen Branchen, wie der Dienstleistungsbranche, in der die Rechenzentren eine wichtige Rolle spielen, oder der

öffentlichen Hand mit den Zivilschutzanlagen, steht ein Dossier für 4 oder sogar über 10 Aggregate; in der Land- und Forstwirtschaft (mit einer hohen Anzahl Dossiers) hingegen deckt ein Dossier meist nur ein Aggregat ab. Dies ist ein Grund, warum der Bestand an Generatoren ohne WKK im Standbericht 2014 (INFRAS 2016) nur auf rund die Hälfte der jetzigen Werte angesetzt wurde – die damalige Stichprobe war nicht ausreichend, um diese Unterschiede festzustellen. Zur Unsicherheit der Anzahl Aggregate pro Dossiers hinzu kommt die Unsicherheit, ob die BAZG-Dossiers alle stationären Notstromaggregate abdecken (s. auch Kap. 3.4.2). Daher ist es gut möglich, dass der reale Bestand um 1'000 oder mehr Aggregate von den hier geschätzten Zahlen abweicht.

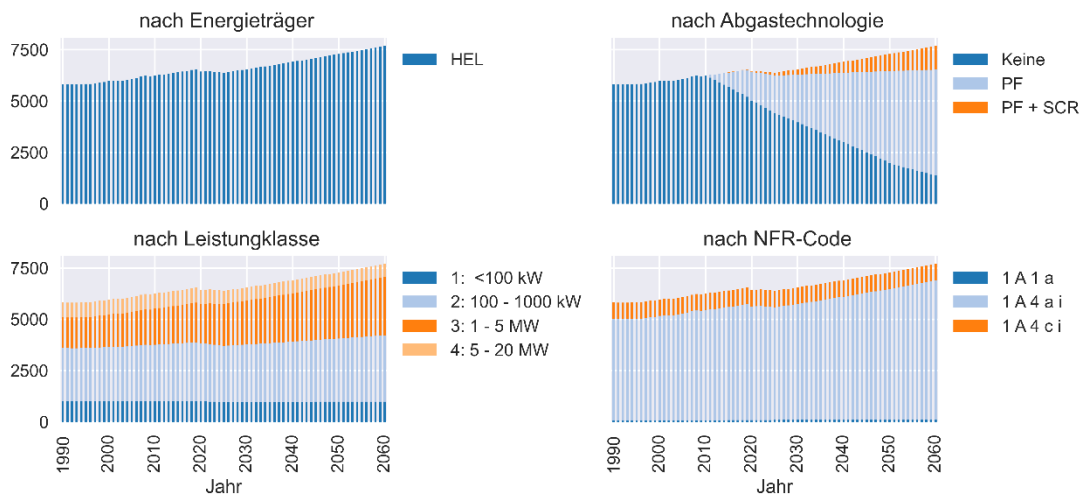
Auch die zeitliche Entwicklung ist unsicher. Direkte Daten dazu liegen keine vor, sie basiert ausschliesslich auf einer Korrelation zwischen der Anzahl BAZG-Dossiers und der BIP-Entwicklung. Die Daten der kantonalen Fachstellen geben keinen Hinweis auf die Bestandesentwicklung der Generatoren zwischen den Zeitständen der beiden durchgeführten Umfragen (2014 und 2019): Der Unterschied zwischen rund 1'200 Generatoren in den Daten von 2014 und den 2'600 Stück in den aktuellen Daten ist der verbesserten Datenverfügbarkeit geschuldet und lässt keinen Schluss auf den realen Zuwachs zu.

**Abbildung 13: Anzahl Dossiers, durchschnittliche Feuerungswärmeleistung und durchschnittliche Anzahl Aggregate pro Verwendungsverpflichtungs-Dossier, nach BAZG-Branche**



Grafik INFRAS. Quelle: BAZG, eigene Auswertung

**Abbildung 14: Bestand an Generatoren ohne WKK nach verschiedenen Gliederungsebenen des Emissionsinventars**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

#### 4.2.2. Leistung

Die Generatoren ohne WKK im vorliegenden Inventar weisen eine durchschnittliche Feuerungswärmeleistung von 1.6 MW auf. Bei mehr als der Hälfte der Aggregate liegt sie aber unter 1 MW (s. Abbildung 14). Branchen mit einer hohen Anzahl Aggregate, aber niedriger durchschnittlicher Leistung (wie Land- und Forstwirtschaft) stehen anderen Branchen mit deutlich weniger, aber grossen Aggregaten (wie z.B. Spitälern, Industrie oder der Dienstleistungsbranche mit den Rechenzentren, s. Abbildung 13) gegenüber.

#### 4.2.3. Betriebsstunden

Die durchschnittliche jährliche Betriebsdauer der HEL-betriebenen Generatoren liegt je nach Leistungsklasse zwischen knapp 10 und 19 Stunden und im Gesamtdurchschnitt bei 13 Stunden (Tabelle 14). Das gesetzliche Maximum liegt bei 50 Stunden Testbetrieb, damit ein Generator als Notstromaggregat (NSA) im Sinne der LRV gilt und dadurch weniger strenge Emissionsgrenzwerte erfüllen muss als länger betriebene Anlagen<sup>5</sup>. In Zivilschutzanlagen werden vom Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) bspw. folgende Betriebsstunden zum Unterhalt vorgegeben:

<sup>5</sup> Die LRV schreibt ein Grenzwert von 50 mg/m<sup>3</sup> für die staubförmigen Emissionen sowie ein Dieselruss-Grenzwert von 5 mg/m<sup>3</sup> ab Erreichen eines Massenstroms von 50 g/h vor. Weitere vorsorgliche Emissionsbegrenzungen kann die Behörde festlegen. Mit der Cerc'l'Air-Empfehlung Nr. 32 haben sich die Kantone u.a. auf die Emissionsbegrenzungen von NO<sub>x</sub> und CO geeinigt.

- 6h pro Jahr (3x2h periodischer Unterhalt «klein»)
- 2h pro Jahr (periodischer Unterhalt «gross»)
- 24h alle 10 Jahre (Überprüfung der Betriebsbereitschaft – 24h-Probelauf)
- Inbetriebnahme (einmalig): 72h
- Revision (unregelmässig): 24h

Dies ergibt je nach Annahme zur Lebenserwartung eines Generators und der Anzahl Revisionen um 12-14 h/a, was gut zu den Werten in Tabelle 14 passt.

Die Betriebsstunden werden im vorliegenden Inventar vereinfachend als konstant über die Zeitreihe angenommen. Es gibt zwar Hinweise, dass der Durchschnitt früher etwas höher lag (u.a. der etwas höhere Durchschnittswert von 19 h/a aus dem Standbericht 2014), sie reichen jedoch nicht aus für eine Quantifizierung einer solchen Entwicklung über die ganze Zeitreihe.

**Tabelle 14: Durchschnittliche jährliche Betriebsstunden pro Generator und Jahr, nach FWL-Klasse**

FWL-Klasse	Betr.Std./Jahr	Stichprobengrösse
<100 kW	9.9	40
100 - 1000 kW	12.9	175
1 - 5 MW	13.3	168
5 - 20 MW	18.8	19

Tabelle INFRAS. Quellen: Kantonale Luftreinhaltefachstellen, eigene Auswertung

#### 4.2.4. Abgastechnologien

Die meisten heizölbetriebenen Generatoren – über 80% – verfügen über keine Massnahme zur Abgasreinigung. Die am häufigsten eingesetzte Abgastechnologie ist der Partikelfilter, bei gut 18% der Aggregate im Jahr 2019. 2014 lag dieser Prozentsatz noch bei 15%, und es wird angenommen, dass er von 2010 an kontinuierlich steigt (s. Abbildung 14 sowie Kapitel 3.4.2).

Bei sehr wenigen Aggregaten (<1%) kommen SCR-Katalysatoren zum Einsatz. In den Daten der kantonalen Fachstellen aus dem Jahr 2014 kamen auch Magermotoren vor, in der deutlich umfangreicheren analogen Datengrundlage für 2019 fehlen diese jedoch.

Diese Verteilung ist dadurch zu erklären, dass die als Notstromaggregate eingesetzten Generatoren gemäss LRV nur die im vorangehenden Kapitel erwähnten Feinstaub- und Dieselschluss-Grenzwerte einhalten müssen. Die Anforderungen gemäss Cercl’Air-Empfehlung Nr.

32 (Beschränkung der CO- und NO<sub>x</sub>-Emissionen) können mit einem emissionsoptimierten Motor der Abgasstufe IIIa auch ohne SCR-Katalysator eingehalten werden.

#### 4.2.5. Energieverbrauch

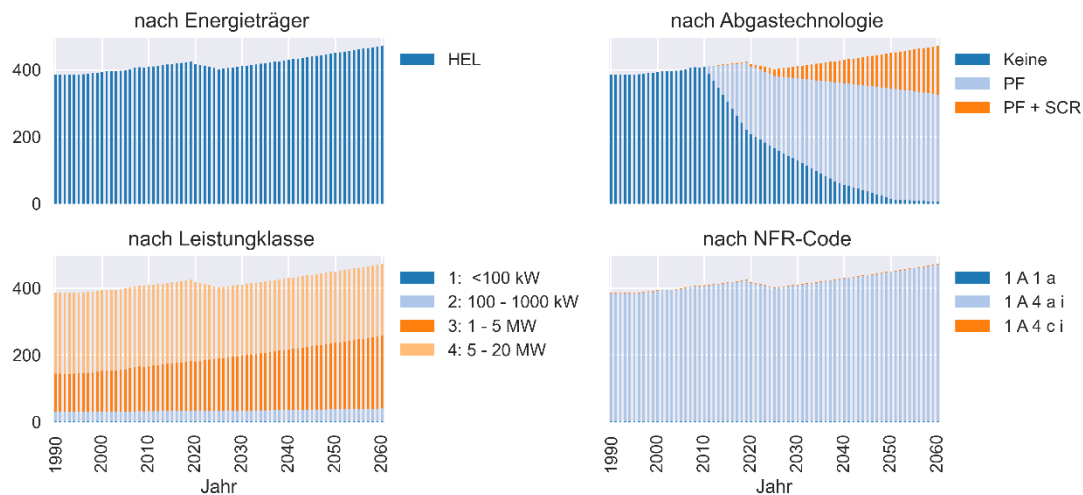
Der Endenergieverbrauch der Generatoren ohne WKK liegt gemessen an ihrem Bestand mit rund 400 TJ/a vergleichsweise tief (Abbildung 15). Dies liegt an der niedrigen durchschnittlichen Einsatzdauer (s. vorangehende Kapitel). Zeitlich folgt der Energieverbrauch einem Verlauf parallel zur Bestandesentwicklung, da sowohl Betriebsstunden als auch Leistungsverteilung praktisch konstant angenommen werden. Aus der Unsicherheit des Bestandes (s. Kap. 4.2.1) folgt auch eine ähnlich hohe Unsicherheit des Energieverbrauchs.

Wie in Kap. 2.2 erwähnt, wird vereinfachend angenommen, dass alle Generatoren ohne WKK mit HEL betrieben werden. Tatsächlich wird ein nicht bezifferbarer Anteil mit Diesel betrieben<sup>6</sup>, was aber kaum Einfluss auf Energieverbrauch und Emissionen hat, da HEL physisch praktisch das Gleiche ist wie Diesel; nur der höhere Schwefelanteil von HEL (max. 10 g/kg ggü. 10 mg/kg beim Diesel gem. LRV Anhang 5) führt zu höheren SO<sub>2</sub>-Emissionen beim HEL-Betrieb. Die hier geltende Annahme, dass nur HEL verwendet wird, führt also tendenziell zu einer Überschätzung der SO<sub>2</sub>-Emissionen. Ausser HEL und Diesel werden auch einzelne Notstromaggregate mit anderen (z.B. gasförmigen) Brennstoffen betrieben; es sind jedoch so wenige, dass sie für den Zweck des vorliegenden Inventars ausgeklammert werden können.

---

<sup>6</sup> Die Daten der kantonalen Luftreinhaltefachstellen enthalten zwar meist eine Angabe zum verwendeten Brennstoff, aber die Unterscheidung zwischen Diesel und HEL ist nicht zuverlässig: Es konnten zahlreiche Notstromaggregate identifiziert werden, bei welchen laut Daten der Kantone Diesel verwendet wird, deren Betreiber aber über eine Verwendungsverpflichtung des BAZG für HEL verfügen. Auch Fachverantwortliche der Kantone bestätigen, dass zwischen Diesel und HEL nicht zuverlässig unterschieden werden kann, aber deutlich öfter HEL eingesetzt wird.

**Abbildung 15: Endenergieverbrauch der Generatoren ohne WKK nach verschiedenen Gliederungsebenen des Emissionsinventars**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

## 4.3. Kleine WKK-Anlagen

### 4.3.1. Bestand

Der Bestand kleiner WKK-Anlagen lag im Jahr 1990 bei rund 500 Aggregaten und nahm anschliessend rasch zu bis in die Nullerjahre, als knapp 1'400 Aggregate in Betrieb waren. Der Ersatz von älteren, kleineren mit neueren grösseren Aggregaten, aber auch ersatzlose Stilllegungen, führten in der Mitte der Nullerjahre zu einer Stagnation und Trendwende. Ende 2019 waren noch 1'190 Aggregate in Betrieb, welche gemäss WKK-Statistik in 867 Anlagen zusammengefasst sind<sup>7</sup> (Kaufmann 2021) (Abbildung 16).

Die historischen Bestandeszahlen weisen aufgrund der Methodik und der jährlichen Aktualisierung der BFE-Statistik, auf denen sie basieren, eine niedrige Unsicherheit auf – zumindest die direkt auf der BFE-Statistik basierenden Aggregationsebenen. Auf der detailliertesten Ebene des Inventars nimmt die Unsicherheit aufgrund der datenschutzbedingten Lücken und den auf einer eher dünnen Datengrundlage beruhenden Aufteilung in zusätzliche Abgastechnologien zu.

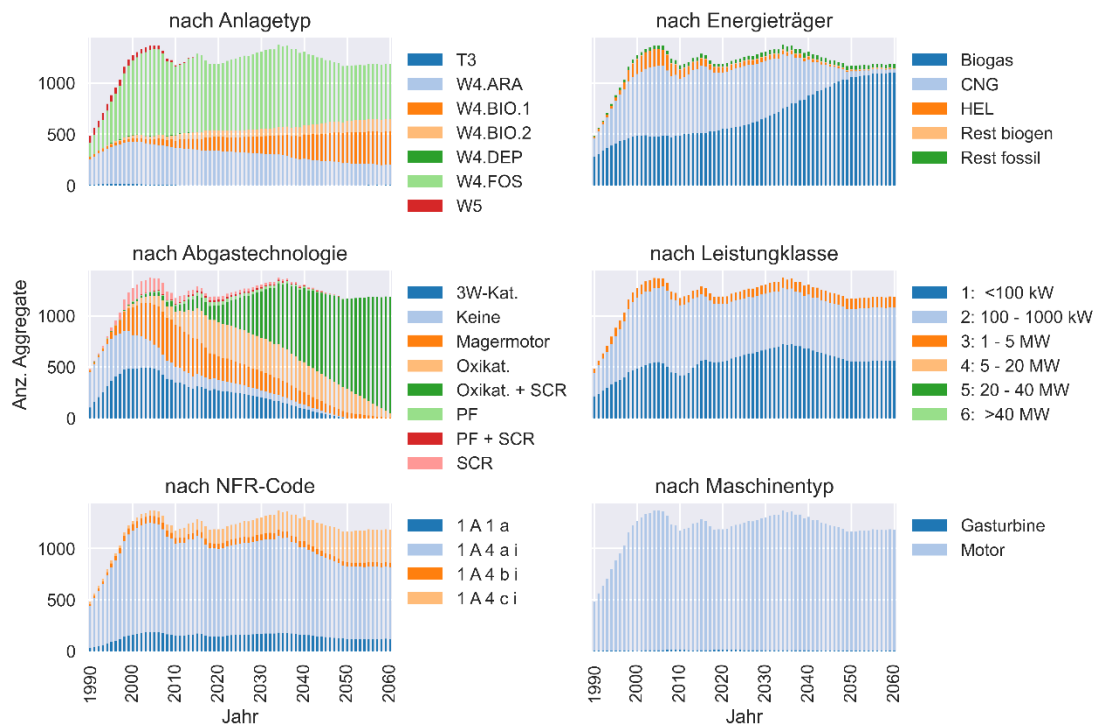
Die zukünftige Bestandesentwicklung ist unklar – die gleiche Strom- und Wärmeproduktion kann mit weniger grösseren oder mehr kleineren Aggregaten erzielt werden. Unter den hier verwendeten Annahmen kommt es im Szenario «Zero Basis» bis ca. Mitte der

<sup>7</sup> Für das vorliegende Emissionsinventar ist die Anzahl einzelner Aggregate relevant, nicht die in der BFE-Statistik ebenfalls geführte Anzahl „Anlagen“. Bei einer „Anlage“ handelt es sich in den meisten Fällen um Heizzentralen mit mehreren Aggregaten, welche manchmal auch „Module“ genannt werden (Kaufmann 2021).

2030er-Jahre zu einem leichten Bestandesanstieg. Anschliessend sinkt der Bestand wieder, weil dann der Anteil Biogasanlagen zunimmt und diese (bis heute) im Durchschnitt grösser sind und somit die gleiche Strom- und Wärmeproduktion mit weniger Aggregaten erreicht werden kann. Im Szenario «WWB», welches keinen solchen Ersatz von fossilen mit Biogas-Anlagen vorsieht, nimmt der Bestand parallel zur Stromproduktion gemäss EP2050+ zu.

Hinsichtlich Maschinentyp sind fast sämtliche kleinen WKK-Anlagen Motoren. Es gibt jedoch einige wenige Gasturbinen, v.a. in ARAs.

**Abbildung 16: Bestand kleiner WKK-Anlagen nach verschiedenen Gliederungsebenen des Emissionsinventars (zukünftige Entwicklung für das Szenario «Zero Basis»).**



Bedeutung der NFR-Codes s. Tabelle 9, für die Bedeutung der Anlagentypen gem. WKK-Statistik s. Tabelle 11

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

### 4.3.2. Leistung

Die durchschnittliche Inputleistung (Feuerungswärmeleistung) kleiner WKK-Aggregate beträgt 325 kW (s. auch Kapitel 4.1). Die durchschnittliche Leistung variiert je nach Einsatzgebiet. Tabelle 15 zeigt die durchschnittlichen Leistungen für das Jahr 2019: Die grössten Ag-

gregate heutzutage gehören zu Biogasanlagen in Industrie und Gewerben mit einer durchschnittlichen FWL von fast 800 kW – deutlich grösser als fossile BHKW mit durchschnittlichen 275 kW FWL.

Diese Verhältnisse blieben aber über die historische Zeitreihe hinweg nicht gleich – die Biogasanlagen «überholten» die fossilen Anlagen erst um 2010 hinsichtlich durchschnittlicher Leistung, da erstere über die Zeit in der Grösse zunahmten und zweitere stagnierten.

Die zukünftige Entwicklung der Leistung ist unklar; eine weitere leichte Zunahme der Durchschnittsleistung, wie im vorliegenden Inventar unterstellt, ist wahrscheinlich (s. dazu auch das vorangehende Kapitel).

Wie auch bei den Bestandesangaben sind diejenigen Leistungsangaben und Bestandeszahlen pro Leistungsklasse, die direkt auf den Daten der WKK-Statistik beruhen, ziemlich robust, während die Unsicherheit bei den geschätzten Kategorien höher liegt.

**Tabelle 15: Bestand, Durchschnittliche installierte Inputleistung (FWL) und durchschnittliche jährliche Betriebsstunden kleiner WKK-Aggregate nach Anlageart und Einsatzgebiet im Jahr 2019. Für die Bedeutung der NFR-Codes s. Tabelle 9.**

Typ gem. WKK-Statistik BFE	NFR-Code	Bestand	Durchschnittl. FWL [kW]	Betr.Std [h/a]
T3 (Deponiegasverstromung ohne WKK)	1 A 4 a i	2	160	8'038
W4.ARA (BHKWs und Gasturbinen in ARAs)	1 A 4 a i	338	266	4'466
W4.BIO.1 (Biogasanlagen Landwirtschaft)	1 A 4 c i	138	496	7'254
W4.BIO.2 (Biogasanlagen Industrie und Gewerbe)	1 A 4 a i	64	774	5'647
W4.FOS (fossile BHKW)	1 A 1 a, 1 A 1 a i, 1 A 4 b i	646	275	2'720

Tabelle INFRAS. Quellen: Kaufmann 2021, eigene Auswertungen

### 4.3.3. Betriebsstunden

Klein-WKK-Anlagen werden heutzutage während durchschnittlich knapp 4'000 Stunden pro Jahr betrieben (s. auch Kapitel 4.1). Zwischen den einzelnen Typen gemäss WKK-Statistik variiert dieser Wert zwischen rund 2'700 h bei fossilen BHKW und über 7'200 Stunden bei Biogasanlagen in der Landwirtschaft. Dies hat beim Erdgas (wie auch beim LPG und HEL) mutmasslich mit den tiefen Strompreisen und den im Verhältnis dazu hohen Preisen für den Brennstoff zu tun; beim Bio-, Klär- und Deponiegas hingegen ist primär die Verfügbarkeit des Brennstoffes ausschlaggebend, da das anfallende Gas nach Möglichkeit verwertet werden muss.



Es handelt sich bei den Angaben im vorliegenden Bericht nicht um Volllast-Betriebsstunden wie in der WKK-Statistik des BFE (Kaufmann 2021), sondern um effektive Betriebsstunden resultierend aus den Volllast-Betriebsstunden gem. Kaufmann (2021) und einem angenommenen Lastfaktor von 0.9. Letzterer ist gemäss Gesprächen mit Fachleuten realistisch (und wurde bereits im Standbericht 2014 angewendet), eine harte Datengrundlage dafür ist jedoch nicht verfügbar.

Über die historische Zeitreihe nahmen die durchschnittlichen jährlichen Betriebsstunden von rund 3'600 h/a in den frühen 1990er-Jahren auf ca. 4'600 h/a um 2010 zu, um anschliessend bis 2019 wieder zu sinken (Abbildung 11). Die zukünftige Entwicklung ist nicht gesichert, und hängt im vorliegenden Emissionsinventar unter den beiden Szenarien vor allem von den zukünftig unterstellten Anteilen der Anlagentypen und deren jeweiligen Betriebsstunden ab.

#### 4.3.4. Abgastechnologien

Der Einsatz von Technologien zur Abgasreinigung ist bei kleinen WKK-Anlagen grundsätzlich deutlich weiter verbreitet als bei Generatoren ohne Abwärmenutzung, da wegen im Vergleich höheren Anzahl Betriebsstunden gemäss LRV strengere Grenzwerte (auch für  $\text{NO}_x$  und CO) einzuhalten sind (s. Abbildung 17).

Im Bestand ist heute der Oxidations-Katalysator die häufigste Massnahme – er reduziert CO- und HC-Emissionen und kommt bei 28% der Anlagen meist in Kombination mit magerem Motorbetrieb (zur Reduktion der  $\text{NO}_x$ -Emissionen) vor; zusätzlich kombinieren 11% der Anlagen einen Oxidations- mit einem SCR-Katalysator, was die  $\text{NO}_x$ -Emissionen noch stärker reduziert (vgl. Emissionsfaktoren in Annex A2).

In früheren Jahren (bis ca. 2013) war der Dreiwege-Katalysator die häufigste Abgastechnologie. Er reduziert  $\text{NO}_x$ , CO und HC bei Lambda-1-Betrieb.

Partikelfilter werden fast ausschliesslich bei HEL-betriebenen WKK-Anlagen eingesetzt, da Partikel v.a. bei der Verbrennung von Heizöl (wie auch Diesel) entstehen. Bei Gasbrennstoffen sind die spezifischen Partikelemissionen hingegen vergleichsweise tief (s. z.B. UVEK 2014).

In Zukunft wird, basierend auf dem seit 2010 beobachteten Trend, angenommen, dass sich der Oxidationskatalysator, v.a. in Kombination mit SCR, fast im ganzen Bestand kleiner WKK-Anlagen durchsetzen wird (s. auch Kap. 3.4.3).

#### 4.3.5. Energieverbrauch

Hinsichtlich Energieträgern sind bei den kleinen WKK-Anlagen Gasbrennstoffe dominant. Der im Jahr 2019 mit 70% (bezogen auf die verbrauchte Energiemenge) am häufigsten verwendete Brennstoff ist Biogas (inkl. Klär- und Deponiegas) (Abbildung 17). Es wird v.a. in der Landwirtschaft und im Gewerbe produziert und verwendet, und fällt in ARAs als Klär- und Faulgas an. Deponiegas fällt ebenfalls bei Gärungsprozessen an und wird teilweise in kleinen WKK-Anlagen verwertet, macht aber nur rund 1% der von kleinen WKK-Anlagen insgesamt verbrauchten Energiemenge aus.

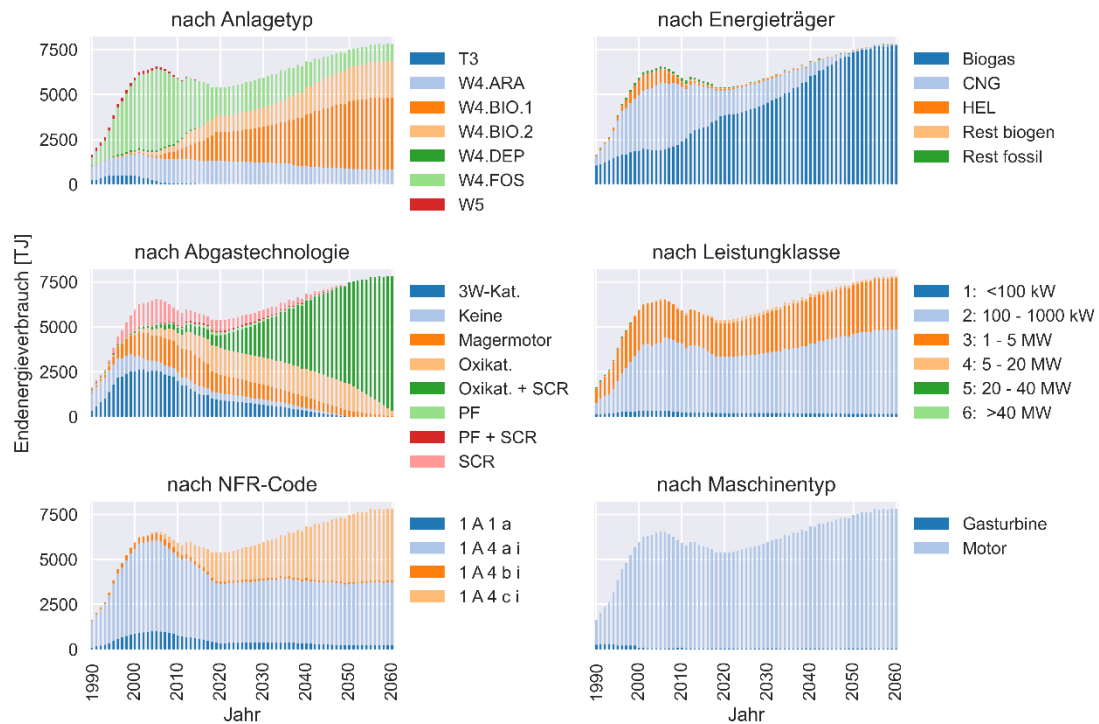
Am zweitmeisten verbraucht wird CNG (Erdgas) mit 27% der verbrauchten Energiemenge 2019. Bis 2011 war dies der meistverwendete Energieträger.

HEL erreichte seinen höchsten Verbrauch innerhalb der kleinen WKK-Anlagen um die Jahrtausendwende mit fast 14% des Energieverbrauches, seine Anwendung hat jedoch seither auf gut 1% abgenommen.

Weitere verwendete Brennstoffe sind etwa Flüssiggas (LPG), Benzin, oder Biodiesel oder andere Fette und Öle. Sie machen zusammen im Jahr 2019 gut 1% des Endenergieverbrauchs aus.

Die zeitliche Entwicklung des Endenergieverbrauchs folgt historisch gesehen in etwa dem Bestandesverlauf – die Spitze wurde im Jahr 2005 mit 6.5 PJ erreicht. Seither ist der Endenergieverbrauch leicht geschrumpft, auf 5.4 PJ. Beide betrachteten Zukunftsszenarien sehen einen erneuten Anstieg vor – in «Zero Basis» etwas stärker auf 7.8 PJ als in «WWB» mit ca. 7.5 PJ, wobei unter «Zero Basis» Biogas eine klar wichtigere Rolle spielt als unter «WWB» (s. auch Abbildung 12).

**Abbildung 17: Endenergieverbrauch kleiner WKK-Anlagen nach verschiedenen Gliederungsebenen des Emissionsinventars (zukünftige Entwicklung für das Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

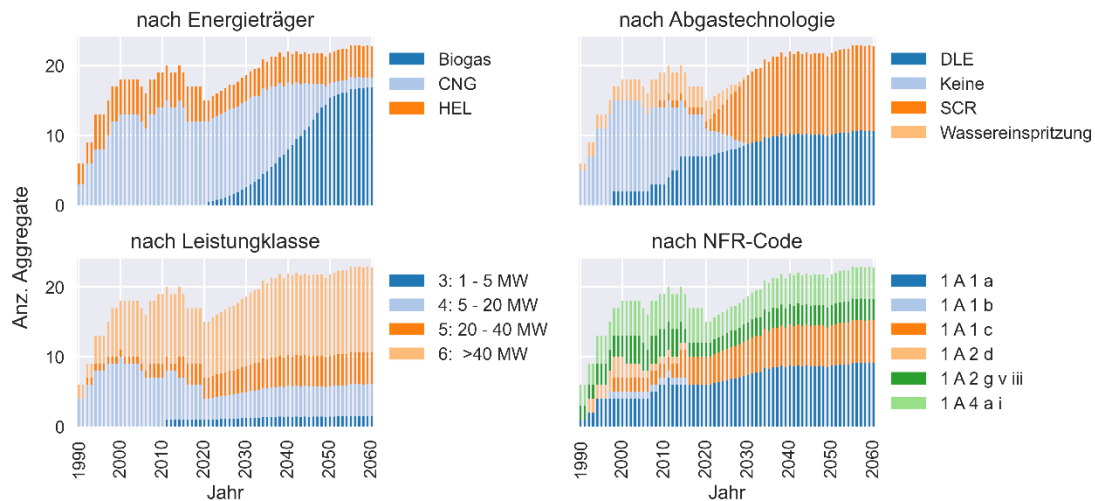
## 4.4. Grosse Anlagen

### 4.4.1. Bestand

Der Bestand grosser Anlagen – es handelt sich bei allen entweder um Gasturbinen oder GuD (kombinierte Gas- und Dampfturbinen) – ist gering; es waren in der Schweiz nie mehr als 20 Aggregate gleichzeitig in Betrieb. Insgesamt haben bisher 26 verschiedene Aggregate existiert. Zwischen 2000 und 2004 sowie zwischen 2009 und 2015 waren jeweils 18 oder mehr Aggregate gleichzeitig in Betrieb.

Sie sind in verschiedenen Branchen anzutreffen resp. dienen verschiedenen Einsatzzwecken. Der heute wichtigste ist die Erzeugung von Strom und Wärme für die Öffentlichkeit (NFR-Code 1A1a, «Public energy and heat production»). Ebenfalls noch vorkommend, aber in früheren Jahren deutlich bedeutender, ist der Einsatz in der Industrie, v.a. der Papier- oder chemischen Industrie oder der Mineralölverarbeitung (z.B. ehemalige Raffinerien, Gasnetz-Kompressorstation Ruswil).

**Abbildung 18: Bestand grosser Gasturbinen und GuD-Kraftwerke nach verschiedenen Gliederungsebenen des Emissionsinventars (zukünftige Entwicklung für das Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quellen: Kaufmann 2021, eigene Recherchen und Auswertungen

#### 4.4.2. Leistung

Die durchschnittliche Inputleistung der Gasturbinen und GuD in grossen Anlagen beträgt im Jahr 2019 106 MW. Sie ist auf diesen Wert angestiegen von gut 36 MW im Jahr 1990. Seit 2007 verursachen die Aggregate in der Leistungsklasse >40 MW FWL den grössten Teil des Energieverbrauchs der grossen Anlagen.

#### 4.4.3. Betriebsstunden

Im Gesamtdurchschnitt wurde eine grosse Gasturbine oder GuD im Jahr 2019 knapp 1'400 Stunden betrieben (s. auch Kapitel 4.1). Dieser Durchschnitt sagt aber relativ wenig aus, da er Werte zwischen 10 h/a und über 5'000 h/a mittelt.

Am höchsten lagen die jährlichen Betriebsstunden im Durchschnitt um die Jahrtausendwende mit rund 2'700 h/a (Abbildung 11).

Die Jahreswerte schwanken relativ stark, schon nur, weil wegen des geringen Bestandes die Einzelanlage stark ins Gewicht fällt; dazu kommen schwankende Gas- und Strompreise, welche die Stromproduktion mehr oder weniger rentabel machen.

Die Betriebsstundenangaben sind eher unsicher, da teilweise rückgerechnet auf Basis der Stromproduktion oder der CO<sub>2</sub>-Emissionen gemäss Geschäftsberichten oder der WKK-Statistik des BFE (Kaufmann 2021).

#### 4.4.4. Abgastechnologien

Die meisten Gasturbinen verfügen nicht über eine Abgasnachbehandlung im klassischen Sinn, sondern minimieren die Entstehung von Abgasen direkt in der Brennkammer. Dies geschieht entweder durch Wassereinspritzung (angewendet bei mindestens fünf Gasturbinen im Inventar) oder durch die sogenannte DLE-Technologie<sup>8</sup> (s. Abbildung 19).

Nur bei einer Gasturbine im Inventar kommt im Jahr 2019 mit SCR eine eigentliche Abgasnachbehandlungstechnologie zum Einsatz.

Für die zukünftige Entwicklung wird angenommen, dass sich DLE für Gasturbinen bis 40 MW FWL bzw. SCR für grössere Gasturbinen graduell (in linearer Entwicklung ab dem Ist-Zustand 2019 bis 2030) durchsetzen. Mit diesen Technologien sollten sich die Grenzwerte der LRV-Revision 2015 zumindest theoretisch einhalten lassen. Für SCR ist dies der Fall. Für DLE zeigen die vorliegenden Messungen, dass der Durchschnitt der Gasturbinen mit dieser Technologie den Grenzwert von 40 mg/m<sup>3</sup> mit 40.6 mg/3 (entspricht 34.7 g/GJ) ganz knapp überschreitet. Dieser Wert wird im vorliegenden Inventar als Emissionsfaktor für die DLE-Technologie verwendet (s. Tabelle 20). Dagegen kann zwar argumentiert werden, dass Gasturbinen mit DLE durchaus geringere Emissionen erreichen können – andererseits unterschätzen die Kontrollmessungen aber den realen Betrieb oft, da in diesem oft niedrigere Lastbereiche gefahren werden, bei denen die spezifischen Emissionen höher ausfallen.

#### 4.4.5. Energieverbrauch

Bei den in grossen Anlagen eingesetzten Gasturbinen stammt 99% der verbrauchten Energie aus Erdgas. Einige Gasturbinen werden jedoch zeitweise mit HEL betrieben.

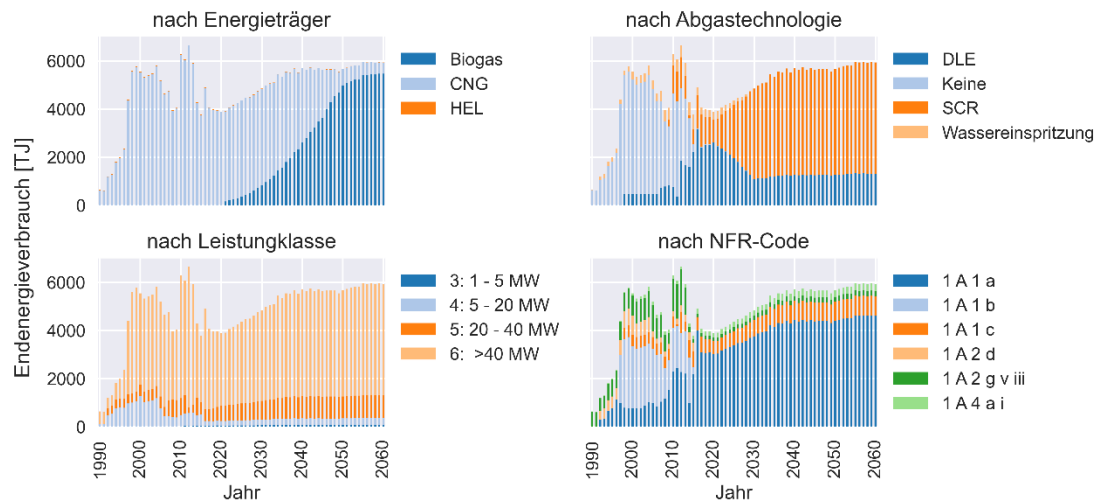
Generell hat der Energieverbrauch der grossen Anlagen seit 1990 stark zugenommen, auf zeitweise fast 6 PJ; heute liegt er bei knapp 4.0 PJ. Wie die Betriebsstunden schwankt auch der Energieverbrauch von Jahr zu Jahr stark aufgrund der geringen Anzahl der Anlagen und der schwankenden Rentabilität der Stromproduktion (Abbildung 19). Die heute grösste Anlage, die Energiezentrale Forsthaus, war bspw. 2019 für fast die Hälfte des Energieverbrauchs der grossen Anlagen verantwortlich.

Für die Zukunft wird unter beiden EP2050+-Szenarien ein steigender Energieverbrauch grosser Gasturbinen und GuD-Anlagen angenommen. Unter «WWB» ist er etwas ausgeprägter; dafür wird unter «Zero Basis» angenommen, dass das heute fast ausschliesslich verwendete Erdgas zu über 90% durch Biomethan ersetzt wird (Abbildung 9, BFE 2021a).

---

<sup>8</sup> Bei der DLE («dry low emissions»)-Technologie wird die Reduktion der Emissionen durch ein mageres vorgemischtes Brennstoff-Luft-Gemisch, eine niedrigere Verbrennungstemperatur und eine optimierte Brennkammer-Geometrie erreicht.

**Abbildung 19: Endenergieverbrauch grosser Gasturbinen und GuD-Kraftwerke nach verschiedenen Gliederungsebenen des Emissionsinventars (zukünftige Entwicklung für das Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quellen: Kaufmann 2021, eigene Recherchen und Auswertungen

## 5. Emissionen

### 5.1. Übersicht

Die Emissionen der stationären Motoren und Gasturbinen sind abhängig vom Endenergieverbrauch und vom verwendeten Energieträger. Tabelle 16 und Tabelle 17 zeigen die Gesamtemissionen der wichtigsten Schadstoffe im Jahr 2019.

Abbildung 20 zeigt einen Vergleich der relativen Entwicklung von Energieverbrauch, Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen der wichtigsten Schadstoffe, zwischen den beiden Szenarien der EP2050+. Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen fallen unter dem Szenario «Zero Basis» deutlich geringer aus. Aufgrund des höheren Biogasanteils am Energieverbrauch sind die Emissionen der Luftschadstoffe  $\text{NO}_x$  und HC jedoch unter «Zero Basis» höher als unter «WWB». Letztere Befund muss jedoch mit Vorsicht interpretiert werden, da die Emissionen von Biogas sich denjenigen des fossilen CNG annähern, wenn das Biogas zu Biomethan aufbereitet wird.

Die folgenden Unterkapitel gehen näher auf die wichtigsten Schadstoffe, deren zeitliche Entwicklung und die Gründe für die unterschiedlichen Emissionen ein. Wo nichts anderes erwähnt ist, zeigen sie die zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis».

Weitere Tabellen und Abbildungen zu den Emissionen finden sich in Annex A4.

**Tabelle 16: Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp im Jahr 2019.**

Anlagentyp	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
Generator ohne Abwärmennutzung	31'304	397	58	7
Kleine WKK-Anlage	89'351	545	622	14
Grosse Anlage	225'849	142	47	1
<b>Summe</b>	<b>346'504</b>	<b>1'084</b>	<b>727</b>	<b>22</b>

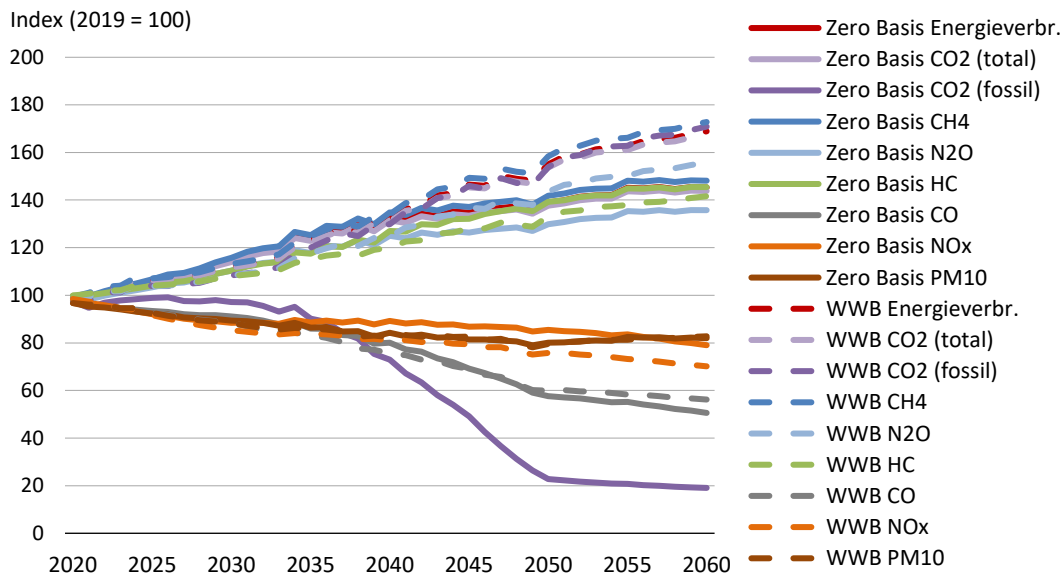
Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

**Tabelle 17: Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Energieträger im Jahr 2019.**

Energieträger	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
Biogas	0	406	521	7
CNG	304'569	248	129	4
HEL	39'771	411	69	10
Rest biogen	0	14	6	1
Rest fossil	2'164	4	2	0
<b>Summe</b>	<b>346'504</b>	<b>1'084</b>	<b>727</b>	<b>22</b>

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung 20: Vergleich der relativen Entwicklung von Energieverbrauch, Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen der wichtigsten Schadstoffe, zwischen den Szenarien der EP2050+**



«Zero Basis» = ausgezogene Linien  
 «WWB» = unterbrochene Linien

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

## 5.2. Treibhausgase

Das gesamte ausgestossene CO<sub>2</sub> korreliert direkt mit dem Energieverbrauch pro Energieträger (s. Abbildung 27 in Annex 4). Gas verursacht allerdings mit 56'700 g CO<sub>2</sub>/GJ einen niedrigeren CO<sub>2</sub>-Ausstoss für die gleiche Energiemenge als HEL oder Diesel mit 73'700 g CO<sub>2</sub>/GJ.

Relevanter als das gesamte CO<sub>2</sub> ist das fossile CO<sub>2</sub>, also der Anteil aus fossilen Brennstoffen, welcher hauptverantwortlich ist für die Klimaerwärmung. Dieses ist für die biogenen Energieträger per Definition 0, da die gleiche Menge CO<sub>2</sub>, die bei ihrer Verbrennung ausgestossen ist, beim Wachstum der pflanzlichen Rohstoffe der Atmosphäre entzogen wurde. Die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen 1990-2060 (zukünftige Entwicklung gemäss «Zero Basis») sind in Abbildung 21 dargestellt.

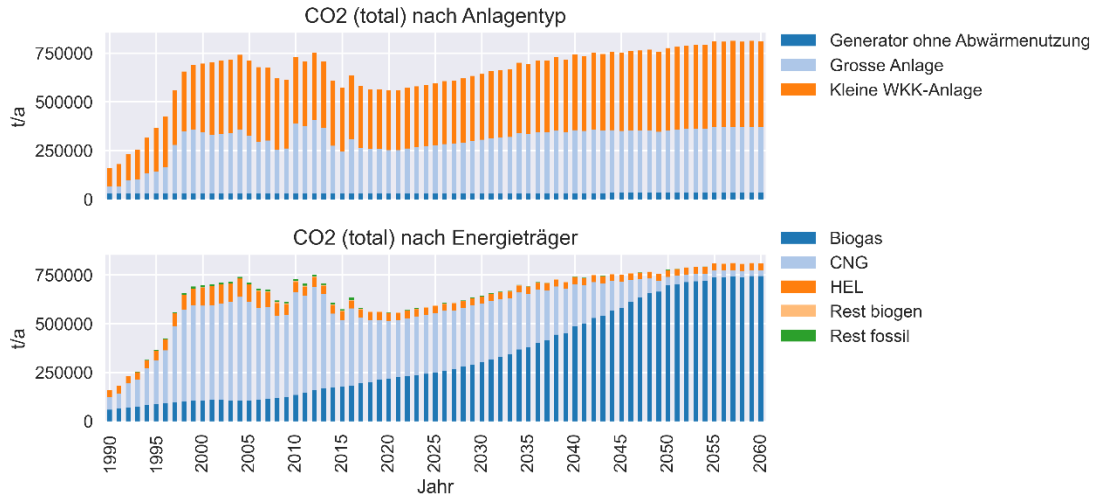
Entsprechend den Verhältnissen beim Energieverbrauch verursachen die kleinen WKK-Anlagen aktuell die höchsten Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen, gefolgt in ähnlicher Grössenordnung von den grossen Anlagen (Abbildung 21). Beim fossilen CO<sub>2</sub> ist das Verhältnis umgekehrt (s. auch Tabelle 16), weil der Anteil Biogas ohne fossilen CO<sub>2</sub>-Ausstoss bei den kleinen WKK-Anlagen hoch ist (Abbildung 22). Die Generatoren ohne Abwärmenutzung verursachen aufgrund ihrer geringen Betriebsstunden und des daher geringen Energieverbrauchs aktuell weniger als einen Zehntel der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Die zukünftige Entwicklung ist vom gewählten Szenario abhängig. Unter «Zero Basis» setzen sich bei den kleinen WKK-Anlagen Biogasanlagen ggü. den fossilen Anlagen stärker durch, und auch das Gas im Gasnetz enthält bis 2060 über 90% Biomethan; daher sinken die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis ca. 2050 stark ab und stagnieren anschliessend auf einem tiefen Restniveau (Abbildung 22). In diesem machen dann die Notstromaggregate fast die Hälfte aus, weil wir unterstellen, dass sie weiterhin mit HEL betrieben werden und diesem keine biogenen oder synthetischen Brennstoffe beigemischt werden.

Unter «WWB» nehmen die fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen in Zukunft hingegen kontinuierlich zu (s. Abbildung 20 sowie Abbildung 30 in Annex A4).

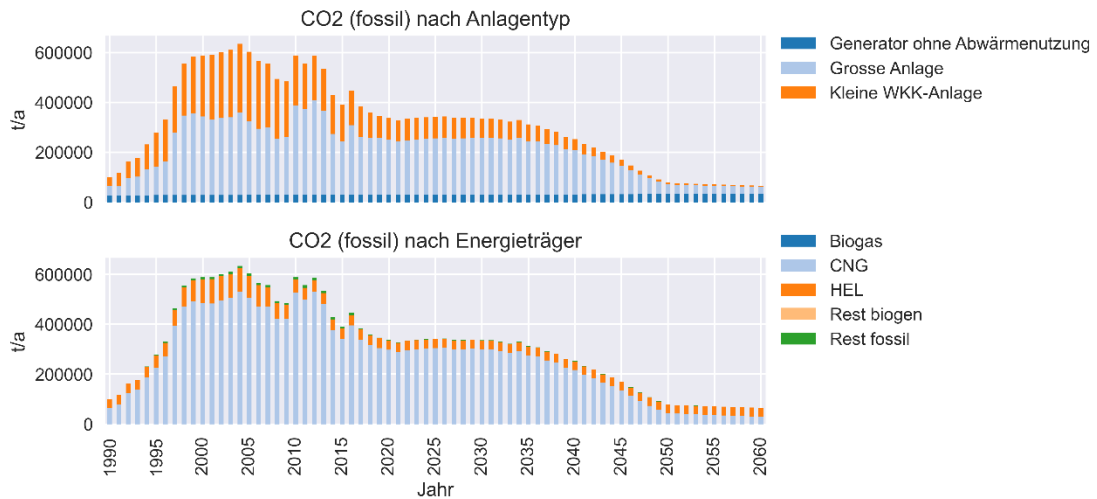


**Abbildung 21: Gesamte CO<sub>2</sub>-Emissionen (aus fossilen und biogenen Quellen) stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp sowie nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung 22: Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp sowie nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

Zu den Treibhausgasen zählen neben CO<sub>2</sub> auch die Schadstoffe CH<sub>4</sub> (Methan) und N<sub>2</sub>O (Lachgas). Ihre Treibhaus-Wirkung beträgt pro emittierte Tonne zwar ein Vielfaches von CO<sub>2</sub> (der entsprechende als «Global Warming Potential» oder GWP bezeichnete Faktor liegt

beim CH<sub>4</sub> je nach Quelle zwischen 20 und 30 und für N<sub>2</sub>O gar bei knapp 300), durch die viel geringeren ausgestossenen Mengen tragen sie jedoch je nach Energieträger typischerweise ca. 2% (HEL, LPG) bis ca. 6% (Erdgas) der gesamten Treibhauswirkung bei (CEN 2012; wobei die konkreten Anteile von der verwendeten Abgastechnologie abhängig sind).

Die Emissionen von CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O unter «Zero Basis» sind Annex A4.3.3 und A4.3.4 visualisiert. Beim CH<sub>4</sub> haben die gasbetriebenen Anlagen einen grossen Anteil – auch die biogas-betriebenen – weil CH<sub>4</sub> unverbranntes Gas ist. An N<sub>2</sub>O haben die HEL-betriebenen Anlagen im Verhältnis zu ihrem Energieverbrauch den höheren Anteil.

### 5.3. NO<sub>x</sub>, CO und Feinstaub

Die in der LRV für stationäre Motoren und Gasturbinen regulierten Schadstoffe NO<sub>x</sub>, CO und Feinstaub (PM10, PM2.5)<sup>9</sup> sind neben Energieverbrauch und Energieträger auch stark von der eingesetzten Abgastechnologie abhängig, da sie mittels dieser minimiert werden sollen.

Die Entwicklungen der drei Schadstoffe zeigen denn auch einen deutlichen Peak im Zeitraum 2000-2005 (s. Abbildung 23 bis Abbildung 25). Dieser kommt teilweise durch die Mengenentwicklung zustande; die Abnahme nach 2005 ist jedoch auch dem zunehmenden Einsatz von Abgastechnologien geschuldet.

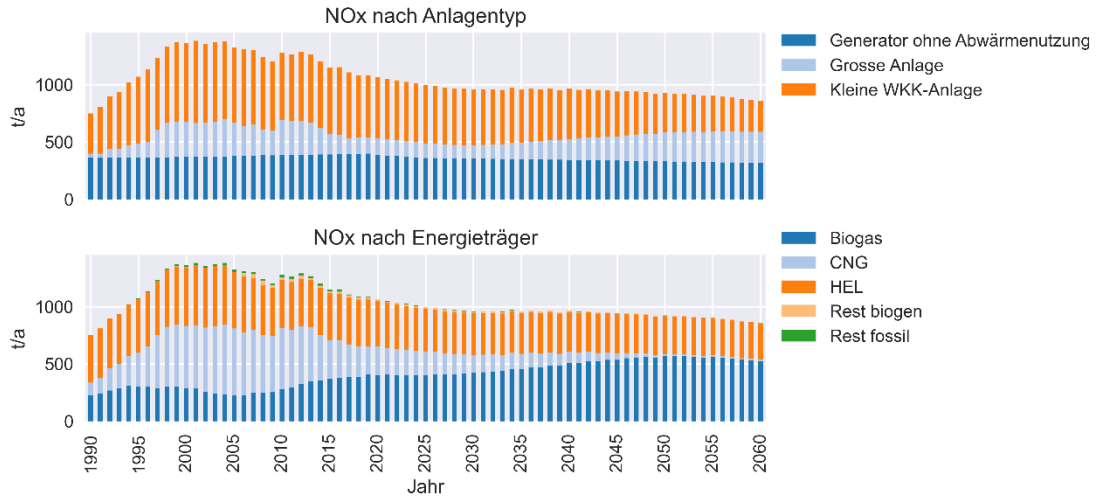
Bei allen drei Schadstoffen spielen die grossen Anlagen gemessen an ihrem Energieverbrauch eine untergeordnete Rolle, da sie aufgrund individueller Einstellung und teilweise vorhandenen zusätzlichen Abgasreduktionsmassnahmen niedrige Emissionsfaktoren aufweisen.

Die Generatoren ohne Abwärmenutzung weisen umgekehrt überproportionale Emissionen gemessen am Energieverbrauch auf, weil die meisten aktuell über keine Abgasnachbehandlung verfügen. Beim Feinstaub ändert sich dies in der Zukunft, da eine zunehmende Durchdringung des Bestandes mit Partikelfiltern angenommen wird (s. Abbildung 25).

Die kleinen WKK-Anlagen dominieren klar bei den CO-Emissionen, da gerade Biogasanlagen ohne Oxidations- oder 3-Wege-Katalysator recht hohe CO-Emissionen aufweisen. Die in Zukunft unterstellte zunehmende Verbreitung von Oxidationskatalysatoren führt jedoch zu einer deutlichen Abnahme der CO-Emissionen (Abbildung 24). Der parallel dazu zunehmende Einsatz von SCR-Katalysatoren sorgt auch für eine Abnahme der Stickoxide (Abbildung 23).

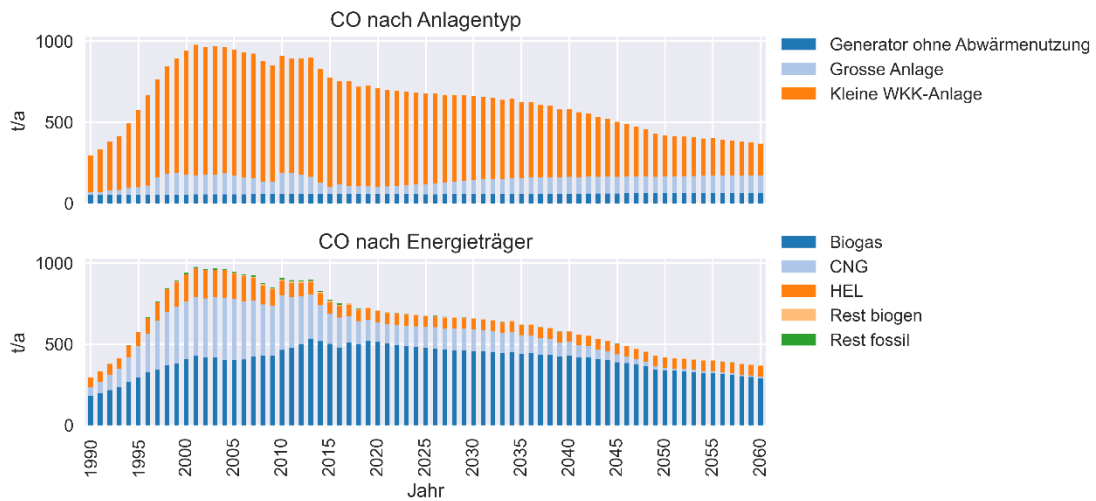
<sup>9</sup> Neben NO<sub>x</sub>, CO und Feinstaub reguliert die LRV auch NH<sub>3</sub> bei mit Entstickungsanlagen (d.h. NO<sub>x</sub> reduzierenden Katalysatoren) betriebenen Anlagen, sowie mittels Anforderungen an Brennstoffe indirekt auch SO<sub>2</sub>.

**Abbildung 23: NO<sub>x</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp sowie nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



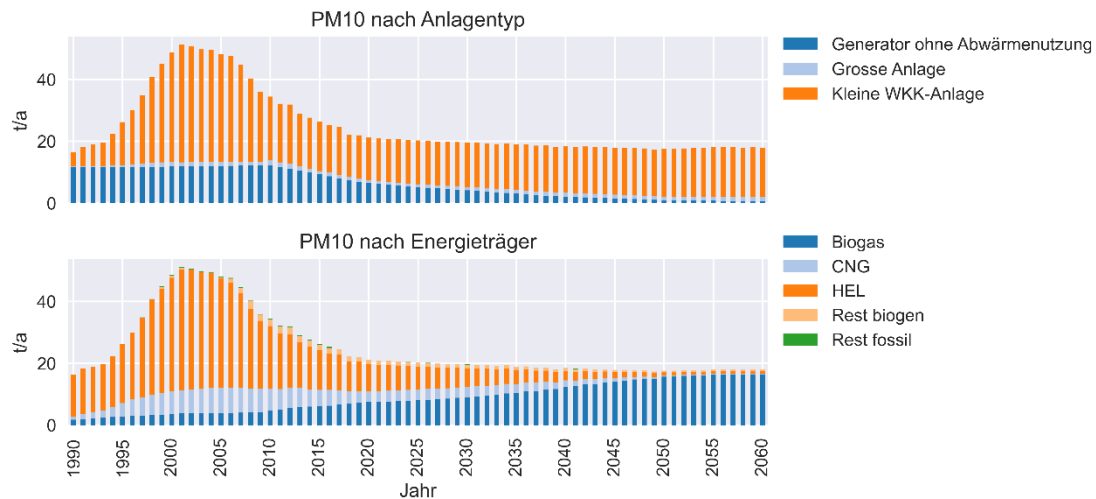
Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung 24: CO-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp sowie nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung 25: PM10-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp sowie nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

## 5.4. Weitere Schadstoffe

Die Emissionen aller weiteren Schadstoffe gem. Tabelle 7 stehen in Excel-Dateien für beide Szenarien zur Verfügung. Folgende Punkte sind dazu erwähnenswert:

- Einflüsse der Abgastechnologien auf die Emissionen der meisten nicht-regulierten Schadstoffe sind nicht quantifizierbar, da differenzierte Emissionsfaktoren oder Messwerte, aus denen sich solche herleiten liessen, fehlen. Die berechneten Emissionen stellen jedoch auf aggregierter Ebene (Maschinentyp, Energieträger) solide Schätzungen basierend auf dem aktuellen Wissensstand dar.
- $\text{NH}_3$  ist eine teilweise Ausnahme von der obenstehenden Aussage: Da bekannt ist, dass die  $\text{NH}_3$ -Emissionen mit dem Einsatz von SCR-Katalysatoren zunehmen können und diese Emissionen gleichzeitig in der LRV, aber auch in der deutschen 44. BimSchV begrenzt sind, wurden die entsprechenden Grenzwerte für  $\text{NH}_3$  und SCR-Katalysatoren als Emissionsfaktoren übernommen. Diese liegen höher als die weniger differenzierten Emissionsfaktoren aus Ecoinvent 3.8 und dem IIR 2020 von Norwegen, welche für die restlichen Kategorien verwendet werden. Somit ergibt sich mit der unterstellten zunehmenden Verbreitung von SCR bei kleinen WKK-Anlagen eine Zunahme der  $\text{NH}_3$ -Emissionen in der Zukunft. Es ist unklar, ob diese Zunahme effektiv zu erwarten oder ein Artefakt der Methodik ist.
- $\text{SO}_2$  und Pb sind abhängig von den zugelassenen S- und Pb-Gehalten in den Brennstoffen. Sie wurden im vorliegenden Inventar nach den konstanten Emissionsfaktoren gemäss

EMEP/EEA (2019) berechnet, welche für aktuelle Energieträger-Eigenschaften in Europa repräsentativ sind. Werden die Vorschriften für die Brennstoffe angepasst (oder eine solche Anpassung für die Zukunft unterstellt), so müssen die Emissionsberechnungen für SO<sub>2</sub> und Pb ebenfalls angepasst werden.

## 6. Ergänzende Anmerkungen

### 6.1. Datenqualität

Das vorliegende Inventar führt die verfügbaren Datenquellen zur Berechnung von Energiebedarf und Emissionen der stationären Motoren und Gasturbinen in der Schweiz zusammen. Die Datenqualität variiert dabei stark nach Anlagentyp, Aggregationsniveau, Zeitpunkt und Berechnungsparameter.

Die Datenqualität der Mengengerüste wird wie folgt eingeschätzt:

- Zu den **Generatoren ohne Abwärmenutzung**, welche fast ausschliesslich als Notstromaggregate eingesetzt werden, ist die Datenlage am dünnsten. Der Gesamtbestand kann nur grob auf aktuell 6'500 Aggregate geschätzt werden, es könnten jedoch auch bedeutend mehr oder weniger sein. Auch die Leistungsverteilung basiert nach wie vor auf einer begrenzten Stichprobe, auch wenn diese aktuell deutlich grösser ist als noch für den Standbericht 2014.

Die (sehr niedrigen) Betriebsstunden erscheinen hingegen für die aktuelle Situation belastbar. Auch die aktuelle Verteilung der Abgastechnologien scheint zumindest in der Hinsicht robust, dass die Daten der kantonalen Luftreinhaltefachstellen für 2019 diesbezüglich ein konsistentes Bild mit dem Datenstand von 2014 ergeben.

Die zeitliche Entwicklung ist wiederum als grobe Schätzung zu interpretieren. Direkte Daten zur Plausibilisierung existieren nicht. Aufgrund der niedrigen Betriebsstunden und des daraus folgenden niedrigen absoluten Energieverbrauchs der Notstromaggregate werden diese in vielen anderen Studien (so z.B. auch den EP2050+) ignoriert oder nicht explizit quantifiziert.

- Bei den **kleinen WKK-Anlagen** besteht mit der BFE-Statistik (Kaufmann 2021) eine anerkannte Grundlage von Eckwerten zu Beständen, installierter Leistung und Energieverbrauch. Da für das aktuelle Inventar auch Daten differenziert nach Leistungsklassen und zumindest einigen Abgastechnologien zur Verfügung gestellt werden konnten (wenn auch mit datenschutzbedingten Limitationen), so basiert das historische Mengengerüst

für diese Anlagenkategorie für die direkt auf der BFE-Statistik übernommenen Kategorien und Differenzierungen auf einer robusten Datenbasis. Bei den durch Analogieschlüsse, oder den Daten der kantonalen Fachstellen gefüllten Lücken besteht hingegen eine höhere Unsicherheit.

- Das historische Mengengerüst der **grossen Anlagen** schätzen wir hinsichtlich Bestand und installierter Leistung als belastbar ein, obwohl nicht ausgeschlossen werden kann, dass eine oder mehrere Anlagen existieren oder existiert haben, welche wir nicht identifiziert haben. Die tatsächlichen jährlichen Schwankungen von Betriebsstunden und damit Energieverbrauch konnten jedoch kaum abgebildet werden.
- Die **Zukunftsszenarien**, basierend auf den EP2050+, beinhalten natürlich die allen Zukunftsszenarien inhärente Prognose-Unsicherheit. Zusätzliche Unsicherheit für das vorliegende Emissionsinventar ergibt sich dadurch, dass die EP2050+, wie auch die WKK-Statistik des BFE, einerseits nicht die gleichen System- bzw. Kategoriengrenzen aufweisen, und andererseits «nur» auf Ex-Post-Daten bis 2017 basieren – d.h. die Jahre ab 2018 sind darin schon Prognose. Die Unschärfe zeigt sich in Abweichungen des absoluten Endenergieverbrauchs fürs Jahr 2019 zwischen den EP2050+ und dem Emissionsinventar in den Kategorien, für welche die hier verwendeten relativen Entwicklungsfaktoren hergeleitet wurden. Insgesamt liegt der absolute Endenergieverbrauch im vorliegenden Emissionsinventar für die ganze Zeitreihe 2020-2060 etwas tiefer – was zumindest teilweise durch die unterschiedlichen Systemgrenzen erklärt werden kann.

Hinsichtlich **Emissionsfaktoren und Emissionen** wird die Datenqualität wie folgt eingeschätzt:

- Emissionsfaktoren, welche in dieser Studie aus Messwerten hergeleitet wurden: Die Streuung der Messwerte ist gross und die Anzahl der vorliegenden Messwerte mit den benötigten Angaben zur gemessenen Anlage (z.B. Abgastechnologie) begrenzt. Dies ist jedoch für viele Abgasmessungen der Fall. Ausreisser, welche mutmasslich von schlecht gewarteten Maschinen stammen, wurden bewusst nicht ausgeschlossen, da auch die schlecht gewarteten Maschinen in der Population vertreten sind.  
Für die regulierten Schadstoffe konnten auf diese Weise nach den wichtigsten Abgastechnologien differenzierte Emissionsfaktoren hergeleitet werden. Die Verhältnisse sind plausibel; die absoluten Grössenordnungen liessen sich ebenfalls in vielen Fällen durch den Vergleich mehrerer Quellen verifizieren.
- Emissionsfaktoren aus bestehenden Quellen (wie das EMEP/EEA Guidebook 2019) differenzieren in den meisten Fällen nicht nach Abgastechnologien. Für die meisten nicht-re-

gulierten Schadstoffe musste auf solche Quellen zurückgegriffen werden, da keine Messwerte zur Verfügung standen. Auf aggregierter Ebene (Maschinentyp, Energieträger) stellen die berechneten Emissionen jedoch solide Schätzungen basierend auf dem aktuellen Wissensstand dar.

Für eine **zukünftige Verbesserung der Datenqualität** des Inventars sind folgende **Massnahmen** zu erwägen:

- Die im Standbericht 2014 empfohlene Vereinbarung mit dem BFE für eine Daten-Mitverwendung der WKK-Statistik wurde für das vorliegende Inventar teilweise umgesetzt. Sie könnte für zukünftige Aktualisierungen institutionalisiert werden. Idealerweise würde bei der Datenerhebung für die Statistik der thermischen Stromproduktion die Verwendung für das vorliegende Emissionsinventar als Verwendungszweck mitdeklariert. So könnten die Daten für das Emissionsinventar ohne die datenschutzbedingten Lücken vom BAFU verwendet werden.
- Die Datenbestände vieler kantonaler Luftreinhalte-Fachstellen haben sich in Umfang und Vollständigkeit deutlich verbessert gegenüber dem Stand 2014. Aktuell sehen wir Verbesserungspotential v.a. in zwei Hinsichten:
  - Konsequenter Erfassung der verwendeten Abgastechnologie(n) bei Kontrollen und Messungen. Leider fehlen diese Angaben aktuell oft oder sind nicht vollständig. Dies ist besonders dort schade, wo Messwerte vorhanden sind – ohne zuverlässige Information zur Abgastechnologie können diese Messdaten aber nicht zur Herleitung von Emissionsfaktoren verwendet werden.
  - Die Tatsache, dass die mittleren Nenn- oder Feuerungswärmeleistungen aus den Daten der kantonalen Fachstellen im Vergleich zu anderen Quellen (z.B. der WKK-Statistik des BFE) höher liegen, könnte ein Indiz sein, dass entweder grössere Anlagen bevorzugt erhoben oder kontrolliert werden, oder dass Kantone mit im Schnitt grösseren Anlagen die Kontrolle oder Erfassung konsequenter durchführen. Der erstere Fall wäre ein Resultat eines möglichst effizienten Einsatzes begrenzter Vollzugsressourcen, was grundsätzlich zu begrüssen ist. Aus Daten-/Inventarsicht kann trotzdem empfohlen werden, kleinere Anlagen, soweit in der Praxis möglich, «gleichberechtigt» zu erfassen.
- Emissionsmessungen sind, wo immer möglich, zu fördern. Bei Messprogrammen lohnt sich internationale Zusammenarbeit, da durch den gegenseitigen Austausch von Messdaten Synergien genutzt werden können. Ein entsprechendes Netzwerk besteht bereits für

das Strassenverkehrs-Emissionsinventar und wird zunehmend auch für den Bereich mobiler Maschinen und Geräte im Non-Road-Sektor genutzt. Die Schweiz ist eine treibende Kraft hinter dem Aufbau solcher Kooperationen.

- Eine deutliche Reduktion der Unsicherheit des Bestandes der Notstromaggregate wäre nur mit grösserem Aufwand erreichbar: Mit zusätzlichen Anforderungen an Betreiber und zuständige Behörden könnten die Datengrundlagen zu neu in Betrieb genommenen oder stillgelegten Aggregaten verbessert werden, indem z.B. beim BAZG die Angabe der genauen Anzahl von Aggregaten bei der Beantragung einer Verwendungsverpflichtung, oder deren periodische Erneuerung gefordert würde, oder indem die kantonalen Luftreinhaltfachstellen ihre Kontrolltätigkeit vertiefen und die Datenhaltung erweitern und vereinheitlichen würden. Angesichts des grossen Bestandes und der hohen Lebensdauern der Notstromanlagen würde es aber lange dauern, bis sich die Datenlage zum gesamten Bestand grundlegend verbessert. Eine solche «Wartezeit» liesse sich nur durch eine zusätzliche, einmalige, grösser angelegte Erhebung zu den bestehenden Aggregaten umgehen.

## 6.2. Vergleich mit dem Standbericht 2014

Abbildung 26 zeigt einen Vergleich der aktuellen Mengengerüst-Parameter und der Emissionen der wichtigsten Schadstoffe auf Ebene Anlagentyp für das Jahr 2014 mit dem Standbericht 2014 (INFRAS 2016). Dabei zeigt sich folgendes:

- Bei den Generatoren ohne WKK wird der Bestand heute über doppelt so hoch eingeschätzt. Die höhere aktuelle Einschätzung ist v.a. eine Folge der grösseren und repräsentativeren Stichprobe der im Detail ausgewerteten Verwendungsverpflichtungen des BAZG. Dies war möglich dank der seither durchgeführten Digitalisierung der Dossiers (s. Kap. 3.3.2). Die durchschnittliche Anzahl von Aggregaten pro Dossier wurde somit deutlich höher eingeschätzt, was in einer höheren Bestandesschätzung resultiert.

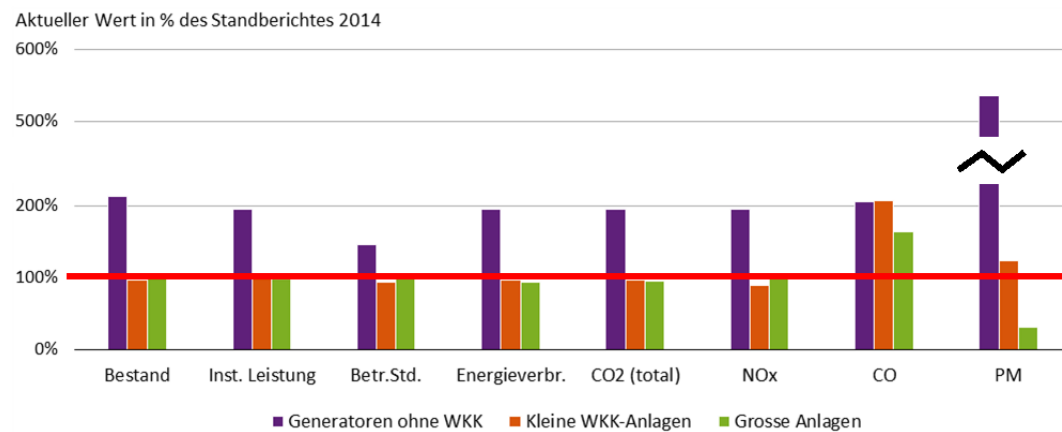
Die Verdoppelung der Bestandesschätzung pflanzt sich fort auf die weiteren Resultate und wird nur leicht gemindert durch aktuell leicht tiefer eingeschätzte jährliche Betriebsstunden.

Beim Feinstaub ergibt sich zudem aufgrund eines aktuell rund dreimal so hohen Emissionsfaktors für Anlagen ohne Partikelfilter ein total über fünfmal so hoher Emissionswert wie im Standbericht 2014. Der aktuelle Wert stammt aus dem EMEP/EEA Guidebook 2019 und wird (u.a. basierend auf einem Vergleich mit den entsprechenden Emissionsfaktoren aus dem Non-Road-Emissionsinventar, BAFU 2015) als plausibler eingestuft als der Emissionsfaktor aus dem Standbericht 2014, welcher auf Messdaten der kantonalen Fachstellen beruhte.



- Bei den kleinen WKK-Anlagen liegen die Mengengerüst-Parameter sowie die CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen mit 89% - 100% aktuell nur leicht tiefer als im Standbericht 2014. Dies ist wenig erstaunlich, denn die Datenquelle ist grundsätzlich die Gleiche wie damals, abgesehen von möglichen nachträglichen Korrekturen der WKK-Statistik des BFE und von dem heute höheren verfügbaren Detaillierungsgrad. Die fast doppelt so hohen CO-Emissionen gehen auf höhere aktuelle Emissionsfaktoren zurück, welche wiederum v.a. auf aktueller Literatur zu Messungen in Deutschland beruhen (Aschmann et al. 2019, Ebertsch 2021).
- Auch bei den grossen Anlagen liegen die Mengengerüst-Parameter sowie die CO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen mit 94% - 102% in der Nähe der Werte des Standberichtes 2014. Die stärker abweichenden CO- und PM-Emissionen sind aktualisierten Emissionsfaktoren geschuldet, welche aktuell auf einer grösseren Messwerte-Basis beruhen und nach den Gliederungsebenen des Inventars gemittelt werden (während im Standbericht 2014 noch individuelle Werte für die grossen Anlagen verwendet wurden, was für die aktuelle Zeitreihe nicht möglich ist).

**Abbildung 26: Vergleich von Mengengerüsten und Emissionen für das Jahr 2014 mit dem Standbericht 2014 (INFRAS 2016). Beachte die unterbrochene y-Achse aufgrund des hohen Wertes für PM-Emissionen der Generatoren ohne WKK.**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

## 7. Fazit und Ausblick

Das vorliegende Emissionsinventar führt die verfügbaren Datenquellen zu Beständen, betrieblichen Parametern, Energieverbrauch und Emissionen von stationären Motoren und Gasturbinen in der Schweiz zusammen und leitet daraus eine bestmögliche Schätzung von Energieverbrauch und Emissionen dieser Anlagen für die Zeitreihe 1990-2060 her. Es aktualisiert somit den Standbericht zum Jahr 2014 (INFRAS 2016) und ergänzt ihn um die Dimension der zeitlichen Entwicklung; zudem werden die Emissionsberechnungen um die gesamte Auswahl der ggü. den internationalen Konventionen CLRTAP und UNFCCC zu rapportierenden Schadstoffe erweitert. Insgesamt liegt also erstmals ein vollständiges, auf allen verfügbaren Quellen beruhendes und dokumentiertes Emissionsinventar der stationären Motoren und Gasturbinen in der Schweiz vor.

Die Resultate werden für die kleinen WKK- und die grossen Anlagen und den historischen Zeitraum als robust eingeschätzt. Bei den Generatoren ohne WKK (Notstromaggregaten) ist die Unsicherheit v.a. hinsichtlich des realen Bestandes weiterhin gross. Für den Energieverbrauch spielt diese Anlagekategorie keine grosse Rolle, bei den Luftschadstoffemissionen fällt sie aber durchaus ins Gewicht. Eine (nachhaltige) Reduktion dieser Unsicherheit würde aber einen höheren Erhebungsaufwand wie auch zusätzliche Rapportierungsaufgaben an Betreiber und zusätzlichen Kontrollaufwand seitens Behörden erfordern.

Die Zukunftsszenarien des vorliegenden Inventars sollten als mögliche Entwicklungen und nicht als Vorhersagen interpretiert werden. Der künftige Treibhausgas-Absenkepfad der Schweiz ist gegenwärtig Gegenstand politischer Debatten. Gerade die mögliche zukünftige Rolle von Gaskraftwerken ist angesichts von Plänen zur Sicherstellung der Vermeidung kurzfristiger Strommangellagen mittels solcher Gaskraftwerke auf der einen Seite, und Überlegungen, die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu verringern, auf der anderen Seite, höchst unsicher.

Für künftige Aktualisierung des Inventars sollten die am Schluss von Kapitel 6.1 aufgelisteten Empfehlungen zur Verbesserung der Datenqualität berücksichtigt werden.

## Annex

### A1. Energieträger-Eigenschaften

Tabelle 18: Eigenschaften der Energieträger.

Energieträger	CO <sub>2</sub> fossil [g/GJ]	CO <sub>2</sub> total [g/GJ]	Abgasvolumen pro Einheit			Unterer Heizwert [MJ/kg]	Dichte	Einheit Dichte
			Motor*	Gastur- bine**	Einheit			
HEL	73'700	73'700	14	38	m3/kg	42.9	0.839	kg/l
CNG	56'700	56'700	11.5	31	m3/m3	45.7	0.795	kg/Nm3
Bio-, Klär-, De- poniegas	0	56'450	7.67	21	m3/m3	20.2	1.2	kg/Nm3
LPG	65'500	65'500	n/a	n/a	n/a	46.0	0.54	kg/l
Biodiesel	0	73'700	14	38	m3/kg	42.9	0.839	kg/l

\* bei 5 Vol.% O<sub>2</sub>

\*\* bei 15 Vol.% O<sub>2</sub>

Tabelle INFRAS. Quellen EMIS-Datenbank BAFU, HBEFA 4.2, LHA 2008a, LHA 2008b

## A2. Emissionsfaktoren

Tabelle 19: Emissionsfaktoren regulierter Schadstoffe für Motoren nach Abgastechnologie.

Energie-träger	Abgastechnologie	NO <sub>x</sub> [g/GJ]	CO [g/GJ]	PM10 [g/GJ]
CNG	3W-Kat.	74.4	76.0	2.0
	Keine	310.2	76.0	2.0
	Magermotor	74.4	76.0	2.0
	NO <sub>x</sub> -Speicherkat.	74.4	76.0	2.0
	Oxikat.*	74.4	24.1	2.0
	Oxikat. + SCR*	31.7	24.1	2.0
	PF	310.2	76.0	1.0
	PF + Magermot.	74.4	76.0	1.0
	PF + SCR	31.7	76.0	1.0
	SCR	31.7	76.0	2.0
Biogas	3W-Kat.	135.0	56.0	2.0
	Keine	310.1	253.1	2.0
	Magermotor	85.4	253.1	2.0
	NO <sub>x</sub> -Speicherkat.	135.0	253.1	2.0
	Oxikat.*	85.4	24.0	2.0
	Oxikat. + SCR*	31.6	24.0	2.0
	PF	310.1	253.1	1.0
	PF + Magermot.	85.4	253.1	1.0
	PF + SCR	31.6	253.1	1.0
	SCR	31.6	253.1	2.0
HEL	Keine	942.0	137.1	30.0
	PF	942.0	137.1	1.0
	SCR	58.7	137.1	30.0
LPG	Alle	135.0	56.0	2.0

\*Annahme: Kombiniert mit magerem Betrieb

Tabelle INFRAS. Quellen: Kantonale Luftreinhaltefachstellen, Aschmann et al. 2019, EMEP/EEA 2019, Ebertsch 2021, BAFU 2015

**Tabelle 20: Emissionsfaktoren regulierter Schadstoffe für Gasturbinen nach Abgastechnologie.**

Energie-träger	Abgastechnologie	NO <sub>x</sub> [g/GJ]	CO [g/GJ]	PM10 [g/GJ]
CNG	Keine*	52.5	25.2	0.2
	DLE	34.7	8.4	0.2
	SCR	13.7	21.1	0.2
	Wassereinspritzung	118.3	5.8	0.2
HEL	Keine*	83.0	2.6	9.5
	DLE	83.0	2.6	9.5
	SCR	83.0	2.6	9.5
	Wassereinspritzung	83.0	4.8	9.5

\* «Keine» Abgastechnologie bedeutet bei Gasturbinen, dass keine Information verfügbar ist, dass eine der hier aufgeführten Technologien eingesetzt wird. Es schliesst jedoch einen optimierten Brennprozess nicht aus.

Tabelle INFRAS. Quelle für Emissionsfaktoren CNG: Kantonale Luftreinhaltefachstellen; Quelle für Emissionsfaktoren HEL: EMEP/EEA 2019

Tabelle 21: Emissionsfaktoren nicht-regulierter Schadstoffe nach Maschinentyp und Energieträger.

Schadstoff	Gasturbine [g/GJ]		Motor [g/GJ]	
	Gas	Diesel	Gas	Diesel
As	0.00012	0.000002	0.00005	0.00006
BaA	0.00002	0.00003	0.00002	0.00003
BaP	5.6E-07	0	0.0000012	0.0000019
BbF	8.4E-07	0	0.000009	0.000015
BC	0.0005	0.31825	0.00365	2.34
Benzol	0.0009331	0.0374336	0.0009331	0.0374336
BkF	8.4E-07	0	0.0000017	0.0000017
Cd	2.5E-07	0.000001	0.000003	0.00001
CH <sub>4</sub>	5.22	1.24	5.22	1.24
Cr	7.6E-07	0.0002	0.00005	0.0002
Cu	7.6E-08	0.00013	0.00001	0.0003
HCB	0	0	0	2.2E-07
HC	1.6	0.18	89	50
HF	0	0.037309	0	0.037309
Hg	0.0001	0.00012	0.0001	0.00011
IcdP	8.4E-07	0	0.0000018	0.0000015
N <sub>2</sub> O	0.69	2.89	0.69	2.89
NH <sub>3</sub>	0	0.1005362	2.8487676	3.0074383
Ni	5.1E-07	0.000005	0.00005	0.00001
Pb	0.0000015	0.000012	0.00004	0.00015
PCB	0	0	0	1.1E-10
PCDD/PCDF	5E-10	1.8E-09	5.7E-10	9.9E-10
PM2.5	0.2	9.5	2	30
Se	0.000011	0.000002	0.0002	0.00022
SO <sub>2</sub>	0.5	46	0.5	48
TSP	0.2	9.5	2	30
Zn	0.0000015	0.00042	0.0029	0.058

Tabelle INFRAS. Quellen: EMEP/EEA 2019, Aschmann et al. 2019, UBA 2020, Norwegian Environment Agency 2020, Ecoinvent 2021, EMIS-Datenbank BAFU

## A3. Mengengerüste

### A3.1. Generatoren

**Tabelle 22: Mengengerüst der Generatoren ohne WKK 1990-2060 (zukünftige Entwicklung ist für beide EP2050+-Szenarien identisch)**

Jahr	Energieträger	Anz. Aggregare	Inputleistung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endenergieverbr. [TJ]
1990	HEL	5'828	1.6	0.70	13	386
1995	HEL	5'834	1.6	0.70	13	387
2000	HEL	5'977	1.6	0.70	13	394
2005	HEL	6'074	1.6	0.70	13	399
2010	HEL	6'251	1.6	0.70	13	409
2015	HEL	6'403	1.6	0.70	13	417
2020	HEL	6'441	1.6	0.70	13	417
2025	HEL	6'391	1.6	0.70	13	402
2030	HEL	6'555	1.6	0.70	13	411
2035	HEL	6'727	1.6	0.70	13	420
2040	HEL	6'911	1.6	0.70	13	430
2045	HEL	7'100	1.6	0.70	13	440
2050	HEL	7'291	1.6	0.70	13	450
2055	HEL	7'488	1.6	0.70	13	461
2060	HEL	7'701	1.6	0.70	13	472

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

### A3.2. Kleine WKK-Anlagen

**Tabelle 23: Mengengerüst der kleinen WKK-Anlagen 1990-2060 (zukünftige Entwicklung gem. Szenario «Zero Basis»)**

Jahr	Energieträger	Anz. Aggregare	Inputleistung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endenergieverbr. [TJ]
1990	HEL	16	0.5	0.90	2'644	63
	CNG	178	0.4	0.90	2'440	536
	Biogas	281	0.2	0.90	4'592	1'045
	Rest fossil	11	0.1	0.90	2'102	4
1995	HEL	34	0.6	0.90	3'608	240
	CNG	413	0.4	0.90	3'592	2'002
	Biogas	412	0.2	0.90	4'382	1'560
	Rest fossil	24	0.2	0.90	3'539	55
2000	HEL	145	0.4	0.90	4'216	823
	CNG	603	0.4	0.90	4'214	3'069

Jahr	Energieträger	Anz. Ag- gregate	Inputleis- tung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endenergie- verbr. [TJ]
2005	Biogas	485	0.3	0.90	4'046	1'874
	Rest fossil	33	0.3	0.90	4'167	153
	Rest biogen	5	0.7	0.90	2'463	26
	HEL	158	0.3	0.90	4'453	774
	CNG	691	0.4	0.90	4'453	3'740
	Biogas	481	0.3	0.90	4'259	1'888
	Rest fossil	36	0.3	0.90	4'454	137
2010	Rest biogen	2	0.4	0.90	4'370	11
	HEL	86	0.2	0.90	4'512	256
	CNG	554	0.4	0.90	4'512	3'040
	Biogas	488	0.3	0.90	4'726	2'380
	Rest fossil	36	0.3	0.90	4'510	158
2015	Rest biogen	9	0.5	0.90	4'566	70
	HEL	72	0.1	0.90	3'394	111
	CNG	654	0.3	0.90	3'396	2'300
	Biogas	515	0.3	0.90	5'233	3'147
	Rest fossil	35	0.3	0.90	3'394	125
2020	Rest biogen	8	0.6	0.90	4'558	60
	HEL	48	0.2	0.90	2'720	79
	CNG	546	0.3	0.90	2'723	1'370
	Biogas	557	0.4	0.90	5'229	3'860
	Rest fossil	29	0.1	0.90	2'720	32
2025	Rest biogen	8	0.5	0.90	4'201	45
	HEL	45	0.2	0.90	2'720	72
	CNG	578	0.3	0.90	2'722	1'391
	Biogas	586	0.4	0.90	5'155	4'077
	Rest fossil	35	0.1	0.90	2'720	31
2030	Rest biogen	8	0.5	0.90	4'267	42
	HEL	40	0	0.9	2'720	60
	CNG	554	0	0.9	2'722	1'279
	Biogas	662	0	0.9	4'999	4'541
	Rest fossil	40	0	0.9	2'720	29
2035	Rest biogen	8	0	0.9	4'410	39
	HEL	34	0	0.9	2'720	47
	CNG	495	0	0.9	2'721	1'099
	Biogas	770	0	0.9	4'809	5'120
	Rest fossil	45	0	0.9	2'720	25
2040	Rest biogen	8	0	0.9	4'573	36
	HEL	24	0	0.9	2'720	28
	CNG	348	0	0.9	2'721	743
	Biogas	881	0	0.9	4'758	6'009
	Rest fossil	44	0	0.9	2'720	19
2045	Rest biogen	9	0	0.9	4'876	30
	HEL	15	0	0.9	2'720	13
	CNG	196	0	0.9	2'721	403
	Biogas	963	0	0.9	4'721	6'652
	Rest fossil	40	0	0.9	2'720	13



Jahr	Energieträger	Anz. Ag- gregate	Inputleis- tung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endenergie- verbr. [TJ]
2050	Rest biogen	9	0	0.9	5'119	24
	HEL	9	0	0.9	2'720	1
	CNG	57	0	0.9	2'720	113
	Biogas	1057	0	0.9	4'685	7'344
	Rest fossil	37	0	0.9	2'720	9
2055	Rest biogen	9	0	0.9	5'307	18
	HEL	4	0	0.9	2'720	1
	CNG	46	0	0.9	2'720	89
	Biogas	1089	0	0.9	4'707	7'677
	Rest fossil	38	0	0.9	2'720	9
2060	Rest biogen	10	0	0.9	5'369	18
	HEL	1	0	0.9	2'720	0
	CNG	38	0	0.9	2'720	73
	Biogas	1099	0	0.9	4'693	7'713
	Rest fossil	38	0	0.9	2'720	9
	Rest biogen	10	0	0.9	5'415	17

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

**Tabelle 24: Mengengerüst der kleinen WKK-Anlagen 2020-2060 gem. Szenario «WWB»**

Jahr	Energieträger	Anz. Ag- gregate	Inputleis- tung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endenergie- verbr. [TJ]
2020	HEL	48	0.2	0.90	2'720	79
	CNG	551	0.3	0.90	2'723	1'380
	Biogas	553	0.4	0.90	5'249	3'849
	Rest fossil	29	0.1	0.90	2'720	32
	Rest biogen	8	0.5	0.90	4'201	45
2025	HEL	46	0.2	0.90	2'720	73
	CNG	615	0.3	0.90	2'722	1'479
	Biogas	559	0.4	0.90	5'256	3'984
	Rest fossil	35	0.1	0.90	2'720	32
	Rest biogen	8	0.5	0.90	4'244	43
2030	HEL	41	0.2	0.90	2'720	61
	CNG	644	0.3	0.90	2'722	1'487
	Biogas	571	0.4	0.90	5'277	4'203
	Rest fossil	41	0.1	0.90	2'720	29
	Rest biogen	8	0.4	0.90	4'362	39
2035	HEL	37	0.2	0.90	2'720	51
	CNG	717	0.3	0.90	2'721	1'590
	Biogas	591	0.4	0.90	5'303	4'496
	Rest fossil	49	0.1	0.90	2'720	27
	Rest biogen	8	0.4	0.90	4'459	36
2040	HEL	32	0.1	0.90	2'720	38
	CNG	795	0.2	0.90	2'721	1'695
	Biogas	598	0.4	0.90	5'297	4'649

Jahr	Energieträger	Anz. Aggregat	Inputleistung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endenergieverbr. [TJ]
2045	Rest fossil	59	0.0	0.90	2'720	25
	Rest biogen	8	0.4	0.90	4'541	33
	HEL	27	0.1	0.90	2'720	23
	CNG	915	0.2	0.90	2'720	1'875
	Biogas	623	0.4	0.90	5'263	4'915
	Rest fossil	73	0.0	0.90	2'720	24
2050	Rest biogen	8	0.3	0.90	4'629	29
	HEL	19	0.0	0.90	2'720	3
	CNG	989	0.2	0.90	2'720	1'949
	Biogas	648	0.4	0.90	5'212	5'117
	Rest fossil	84	0.0	0.90	2'720	20
2055	Rest biogen	8	0.3	0.90	4'766	23
	HEL	11	0.0	0.90	2'720	2
	CNG	1'062	0.2	0.90	2'720	2'069
	Biogas	660	0.4	0.90	5'212	5'252
	Rest fossil	91	0	0.9	2'720	21
2060	Rest biogen	8	0	0.9	4'852	22
	HEL	1	0	0.9	2'720	0
	CNG	1'131	0	0.9	2'720	2'180
	Biogas	663	0	0.9	5'216	5'336
	Rest fossil	97	0	0.9	2'720	23
	Rest biogen	8	0	0.9	4'944	21

### A3.3. Grosse Anlagen

Tabelle 25: Mengengerüst der grossen Anlagen 1990-2060 (zukünftige Entwicklung gem. Szenario «Zero Basis»)

Jahr	Energie-träger	Anz. Aggregat	Inputleistung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endenergie-verbr. [TJ]
1990	HEL	3	11.0	0.99	207	8
	CNG	3	62.1	0.95	1'419	616
1995	HEL	5	43.0	0.95	130	12
	CNG	8	39.1	0.93	3'128	1'817
2000	HEL	5	43.0	0.95	130	12
	CNG	13	42.9	0.87	3'692	4'794
2005	HEL	5	43.0	0.95	130	12
	CNG	12	56.2	0.90	3'177	4'514
2010	HEL	5	43.0	0.95	130	12
	CNG	13	130.3	0.95	2'554	5'243
2015	HEL	5	43.0	0.95	130	12
	CNG	13	130.4	0.92	2'038	3'279
2020	HEL	3	65.7	0.91	17	6

Jahr	Energie-träger	Anz. Ag-gregate	Inputlei-stung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endener-gie-verbr. [TJ]
2025	CNG	11	143.2	0.95	1'748	3'434
	HEL	2	91.0	0.92	15	7
	CNG	9	166.0	0.96	1'847	3'524
2030	Biogas	1	166.0	0.96	1'847	315
	HEL	2	91.0	0.92	15	8
	CNG	9	166.0	0.96	1'847	3'535
2035	Biogas	2	166.0	0.96	1'847	738
	HEL	3	91.0	0.92	15	9
	CNG	9	166.0	0.96	1'847	3'323
2040	Biogas	4	166.0	0.96	1'847	1'391
	HEL	3	91.0	0.92	15	9
	CNG	7	166.0	0.96	1'847	2'723
2045	Biogas	6	166.0	0.96	1'847	2'311
	HEL	3	91.0	0.92	15	9
	CNG	5	166.0	0.96	1'847	1'750
2050	Biogas	8	166.0	0.96	1'847	3'215
	HEL	3	91.0	0.92	15	9
	CNG	2	166.0	0.96	1'847	590
2055	Biogas	12	166.0	0.96	1'847	4'410
	HEL	3	91.0	0.92	15	10
	CNG	1	166.0	0.96	1'847	489
2060	Biogas	12	166.0	0.96	1'847	4'766
	HEL	3	91.0	0.92	15	10
	CNG	1	166.0	0.96	1'847	400
	Biogas	13	166.0	0.96	1'847	4'831

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Auswertung

**Tabelle 26: Mengengerüst der grossen Anlagen 2020-2060 gem. Szenario «WWB»**

Jahr	Energie-träger	Anz. Ag-gregate	Inputlei-stung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endener-gie-verbr. [TJ]
2020	HEL	3	65.7	0.91	17	7
	CNG	12	132.6	0.95	1'922	3'889
2025	HEL	3	65.7	0.91	17	8
	CNG	13	132.6	0.95	1'922	4'205
	Biogas	1	132.6	0.95	1'922	184
2030	HEL	4	65.7	0.91	17	9
	CNG	14	132.6	0.95	1'922	4'478
	Biogas	1	132.6	0.95	1'922	253
2035	HEL	4	65.7	0.91	17	10
	CNG	16	132.6	0.95	1'922	5'090
	Biogas	1	132.6	0.95	1'922	339
2040	HEL	5	65.7	0.91	17	11
	CNG	17	132.6	0.95	1'922	5'589

Jahr	Energie-träger	Anz. Ag-gregate	Inputleis-tung pro Aggr. [MW]	Lastfaktor	Betr.Std/a und Aggr.	Endener-gie-verbr. [TJ]
2045	Biogas	1	132.6	0.95	1'922	442
	HEL	5	65.7	0.91	17	13
	CNG	20	132.6	0.95	1'922	6'400
2050	Biogas	2	132.6	0.95	1'922	617
	HEL	6	65.7	0.91	17	14
	CNG	21	132.6	0.95	1'922	6'817
2055	Biogas	2	132.6	0.95	1'922	771
	HEL	6	65.7	0.91	17	15
	CNG	22	132.6	0.95	1'922	7'236
2060	Biogas	3	132.6	0.95	1'922	827
	HEL	7	65.7	0.91	17	16
	CNG	23	132.6	0.95	1'922	7'601
	Biogas	3	132.6	0.95	1'922	881

## A4. Emissionen

### A4.1. Emissionssummen tabellarisch, historisch und Szenario «Zero Basis»

Tabelle 27: Emissionen der wichtigsten Schadstoffe nach Jahr, 1990 – 2060, mit zukünftiger Entwicklung nach Szenario «Zero Basis».

Jahr	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
1990	100'458	749	293	16
1991	117'267	810	333	18
1992	162'950	897	379	19
1993	177'472	933	414	20
1994	231'679	1'018	493	22
1995	277'742	1'070	577	26
1996	330'388	1'131	666	30
1997	464'160	1'236	764	35
1998	554'837	1'334	846	41
1999	584'728	1'371	894	45
2000	588'685	1'365	941	49
2001	589'244	1'382	977	51
2002	601'197	1'355	964	51
2003	610'376	1'373	968	50
2004	634'466	1'381	963	50
2005	603'353	1'322	946	48
2006	565'178	1'309	931	48

Jahr	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
2007	557'264	1'300	923	45
2008	494'116	1'244	878	40
2009	484'721	1'204	852	36
2010	589'177	1'279	908	34
2011	557'269	1'265	895	32
2012	585'992	1'291	895	32
2013	533'660	1'267	898	29
2014	429'235	1'201	830	28
2015	392'092	1'151	774	26
2016	447'991	1'153	752	25
2017	383'659	1'107	754	25
2018	359'148	1'084	718	22
2019	346'504	1'084	727	22
2020	337'388	1'067	710	21
2021	328'162	1'049	699	21
2022	335'722	1'038	693	21
2023	338'891	1'025	688	21
2024	340'763	1'011	683	20
2025	342'752	997	678	20
2026	343'541	991	676	20
2027	338'076	977	669	20
2028	337'740	970	666	20
2029	339'282	966	666	20
2030	336'780	958	663	20
2031	336'263	960	658	20
2032	331'298	959	649	19
2033	322'822	955	638	19
2034	329'827	972	644	19
2035	312'462	960	625	19
2036	307'967	969	625	19
2037	291'892	959	606	19
2038	283'388	968	603	19
2039	261'382	951	579	18
2040	252'767	966	582	18
2041	232'879	955	561	18
2042	219'624	961	555	18
2043	200'912	950	534	18
2044	186'904	951	523	18
2045	170'172	941	503	18
2046	147'615	942	489	18
2047	126'827	940	472	18
2048	108'526	936	455	18
2049	91'609	920	430	17
2050	78'951	926	419	18
2051	76'902	921	415	18
2052	75'374	918	412	18
2053	73'955	911	406	18
2054	72'317	902	400	18

Jahr	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
2055	71'827	905	401	18
2056	70'258	894	393	18
2057	69'178	887	388	18
2058	67'918	874	379	18
2059	67'027	867	375	18
2060	66'061	856	368	18

Tabelle INFRAS. Quelle: Eigene Berechnung

## A4.2. Emissionssummen tabellarisch, Szenario «WWB»

Tabelle 28: Emissionen der wichtigsten Schadstoffe nach Jahr, 2020-2060, nach Szenario «WWB»

Jahr	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
2020	338'003	1'067	710	21
2021	338'582	1'055	702	21
2022	351'276	1'045	697	21
2023	350'512	1'025	687	21
2024	365'866	1'018	687	21
2025	360'008	993	675	20
2026	359'993	977	667	20
2027	362'887	963	660	20
2028	364'833	949	653	20
2029	371'153	937	648	20
2030	375'509	924	643	19
2031	378'455	917	632	19
2032	381'965	910	621	19
2033	387'466	905	612	19
2034	406'281	911	612	19
2035	415'962	909	606	19
2036	426'059	906	597	19
2037	437'007	900	584	19
2038	432'667	884	565	18
2039	448'741	886	561	18
2040	449'936	877	549	18
2041	467'807	880	544	18
2042	472'459	871	530	18
2043	487'997	873	526	18
2044	490'836	863	511	18
2045	505'827	861	502	18
2046	501'624	847	485	18
2047	517'028	847	478	18
2048	509'998	830	457	18
2049	507'022	814	437	17

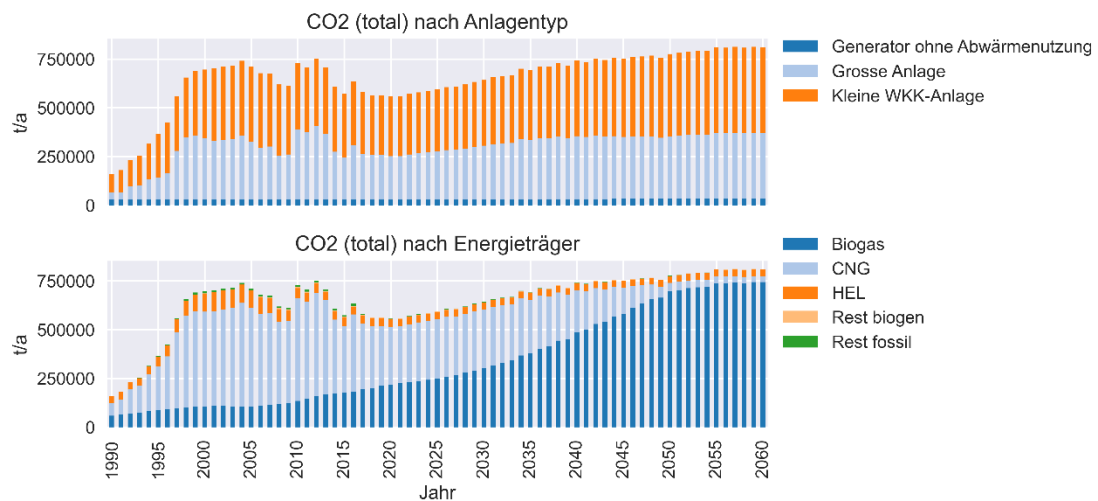
Jahr	CO <sub>2</sub> (fossil) [t/a]	NO <sub>x</sub> [t/a]	CO [t/a]	PM10 [t/a]
2050	532'798	821	435	17
2051	547'113	821	437	18
2052	550'750	814	433	18
2053	559'127	810	432	18
2054	563'121	802	428	18
2055	564'137	794	424	18
2056	575'090	790	422	18
2057	578'853	782	418	18
2058	580'330	773	414	18
2059	586'903	767	412	18
2060	592'049	760	408	18

Tabelle INFRAS. Quelle: Eigene Berechnung

## A4.3. Emissionen grafisch nach Anlagentyp und Energieträger

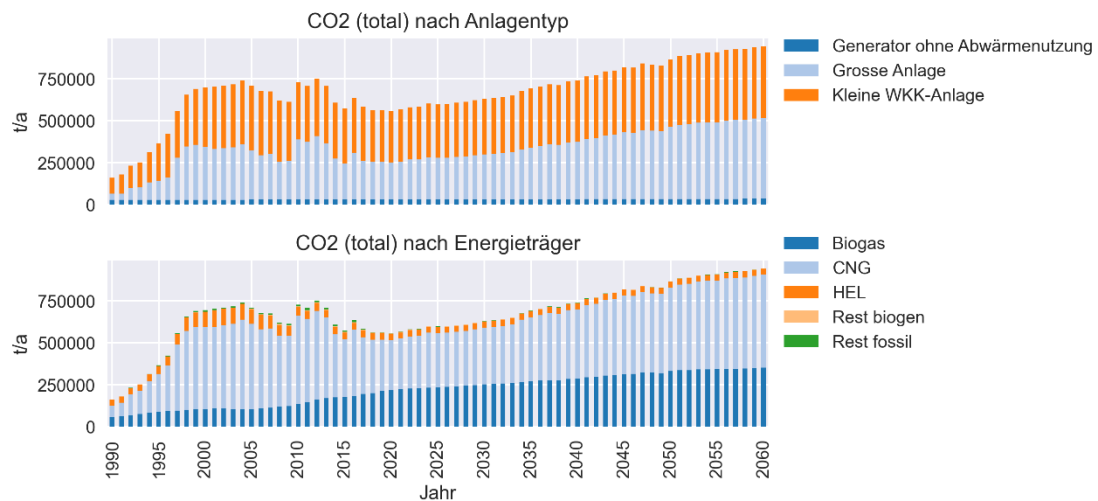
### A4.3.1. CO<sub>2</sub> (total)

**Abbildung 27: Totale CO<sub>2</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung 28: Totale CO<sub>2</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «WWB»).**

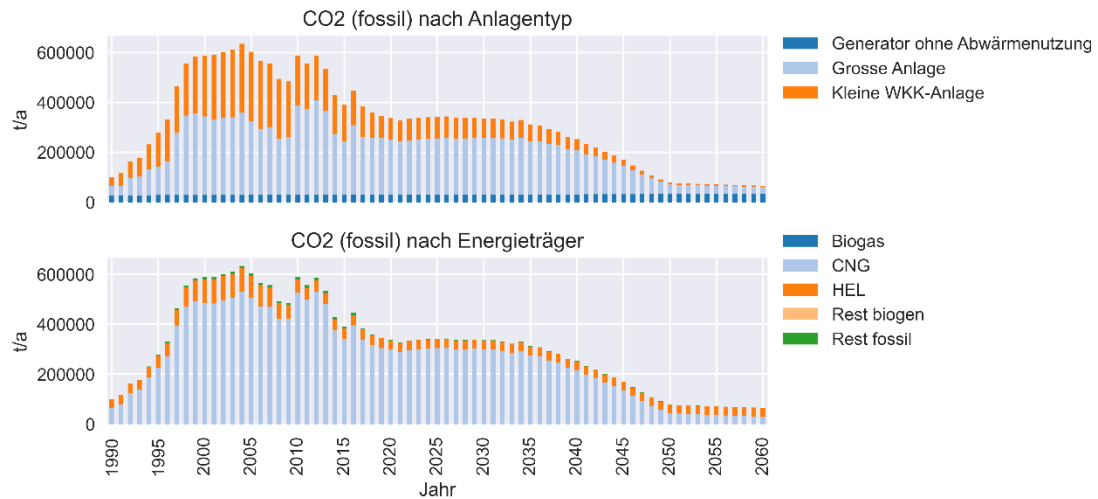


Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung



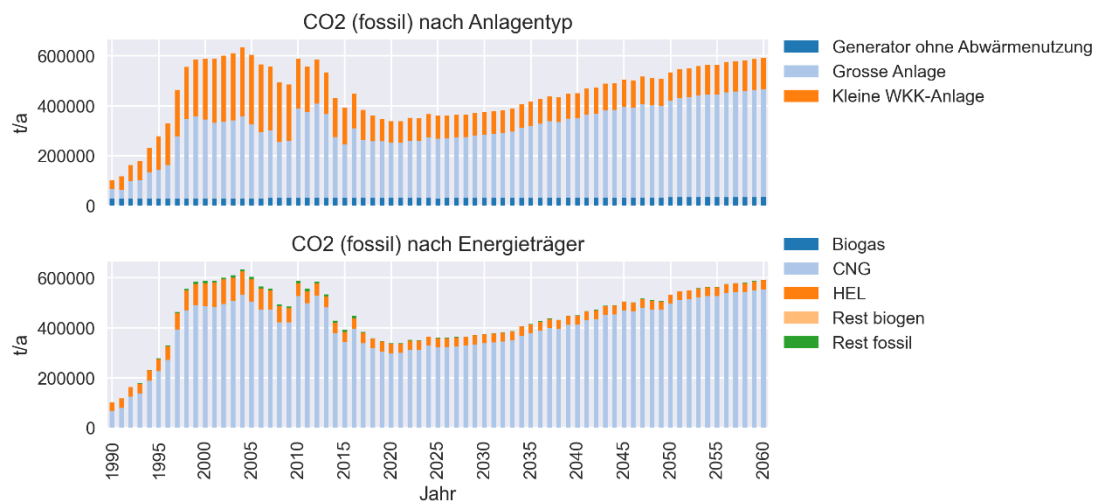
### A4.3.2. CO<sub>2</sub> (fossil)

**Abbildung 29: Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

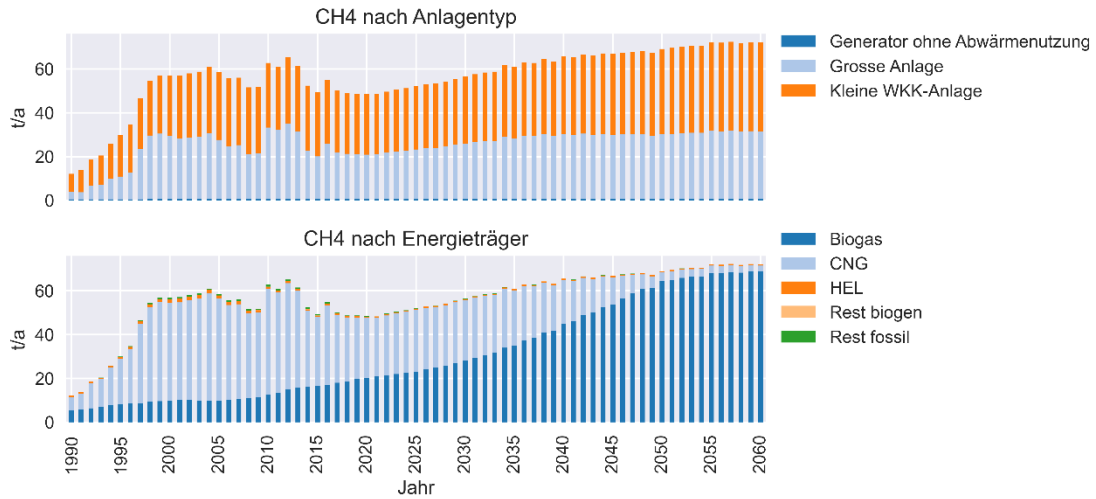
**Abbildung 30: Fossile CO<sub>2</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «WWB»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

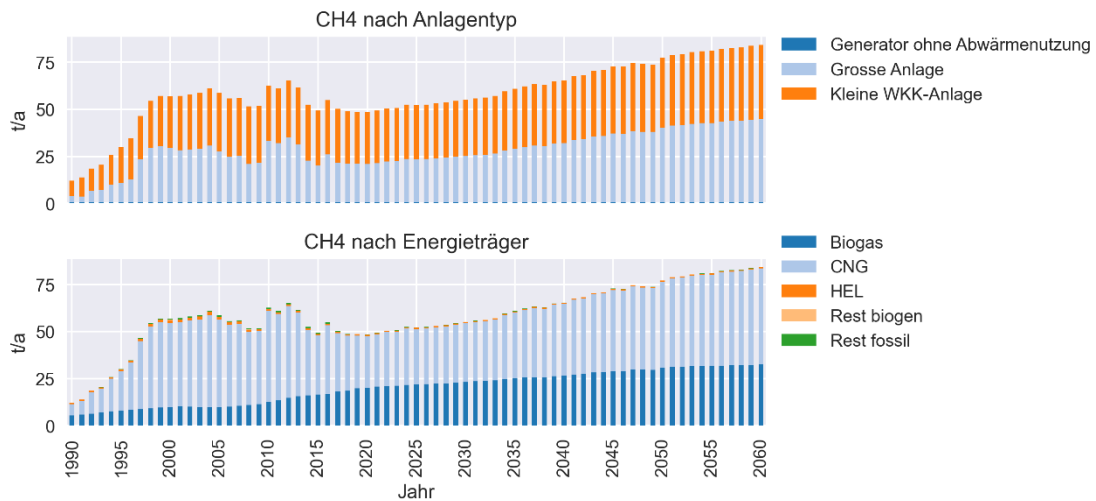
### A4.3.3. CH<sub>4</sub>

**Abbildung 31: CH<sub>4</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

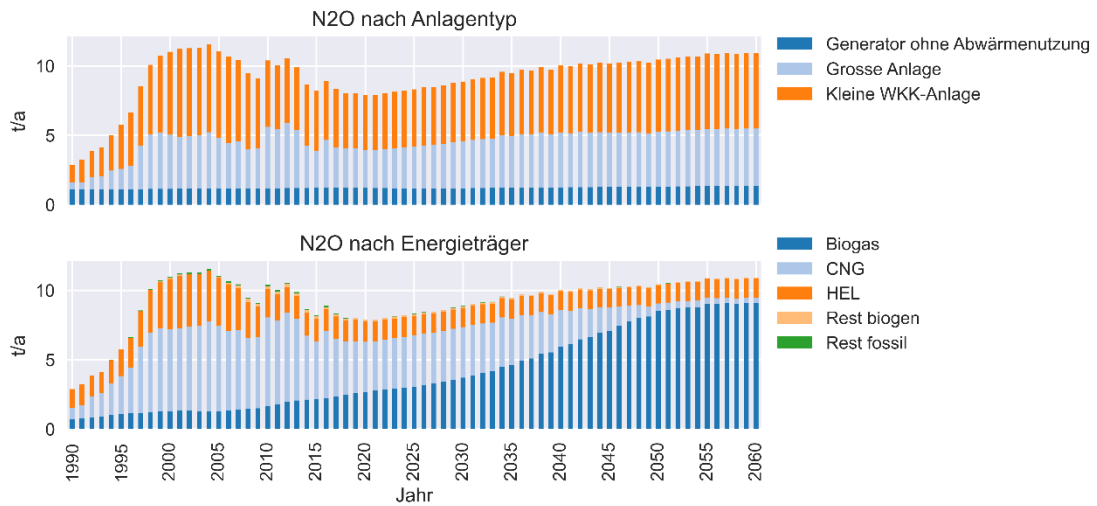
**Abbildung 32: CH<sub>4</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «WWB»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

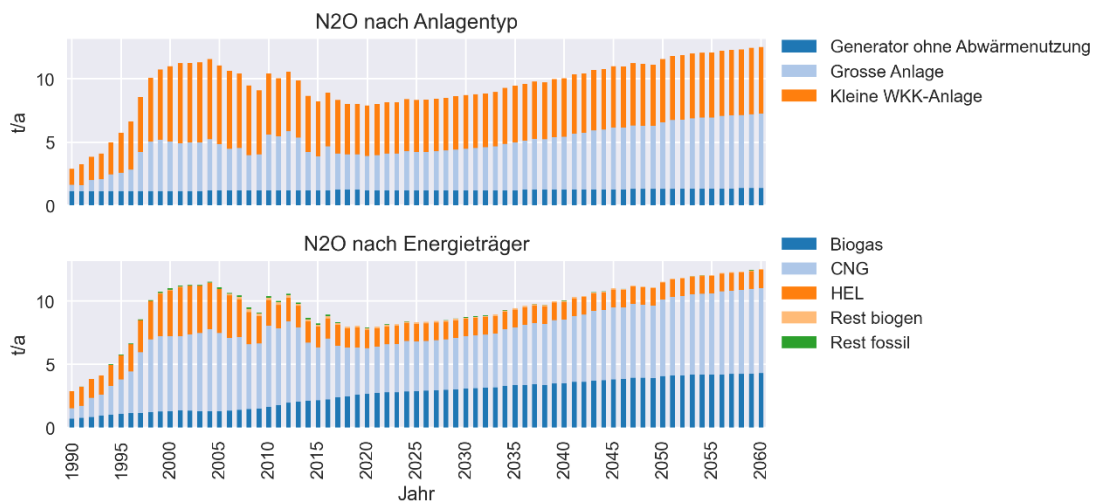
### A4.3.4. N<sub>2</sub>O

**Abbildung 33: N<sub>2</sub>O-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

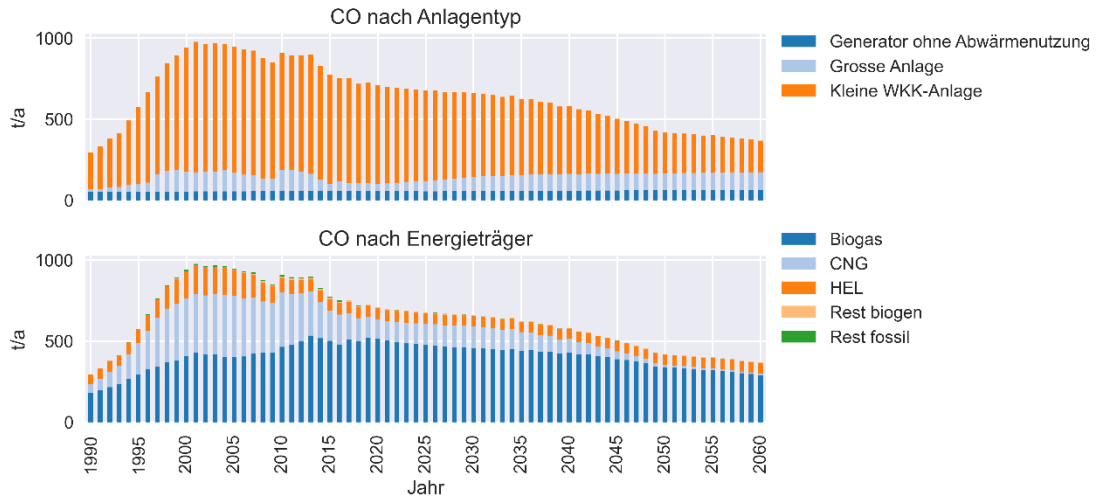
**Abbildung 34: N<sub>2</sub>O-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «WWB»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

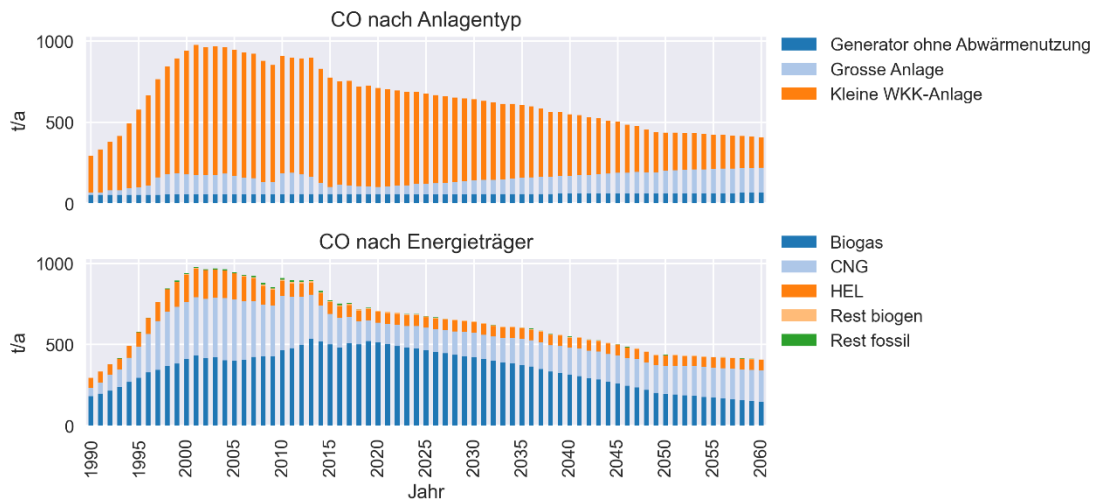
### A4.3.5. CO

**Abbildung 35: CO-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

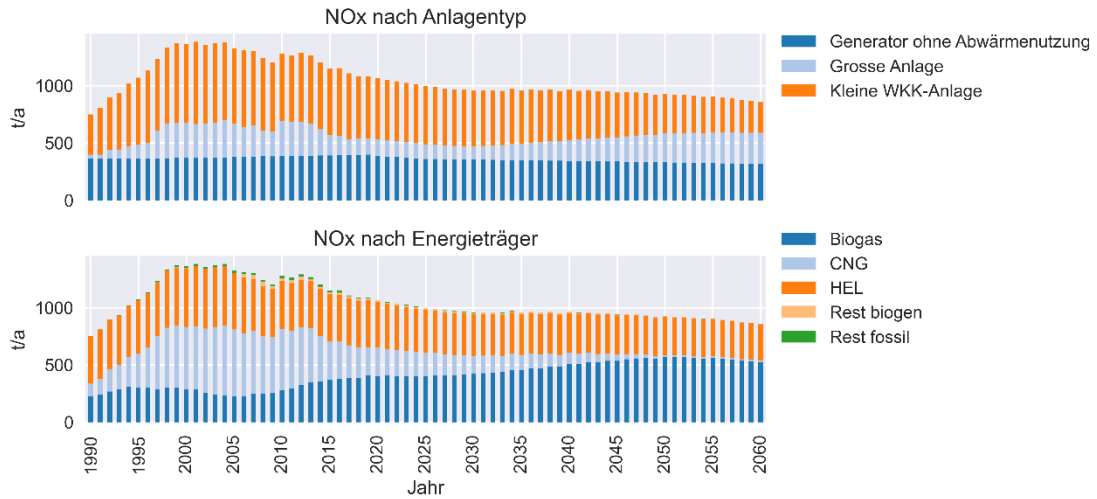
**Abbildung 36: CO-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «WWB»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

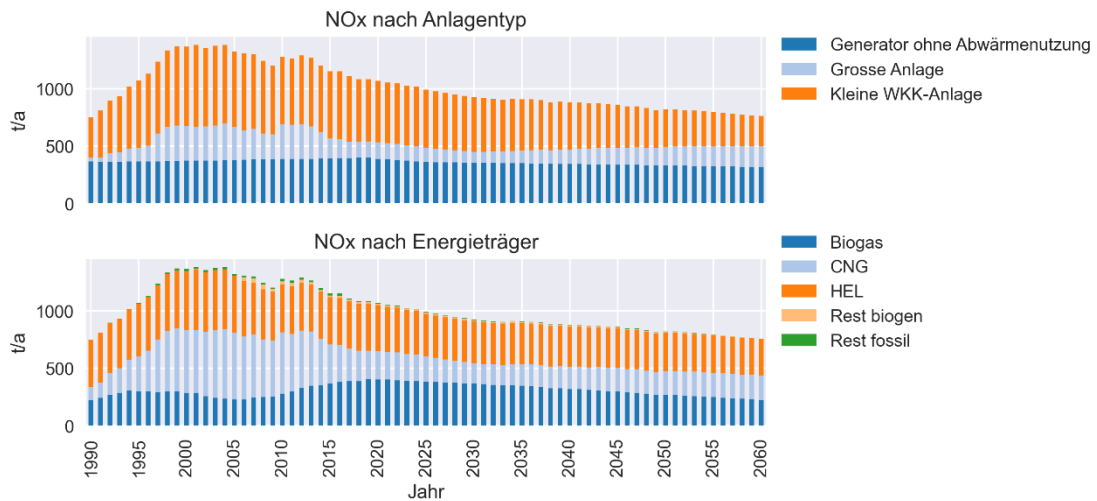
### A4.3.6. NO<sub>x</sub>

**Abbildung 37: NO<sub>x</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

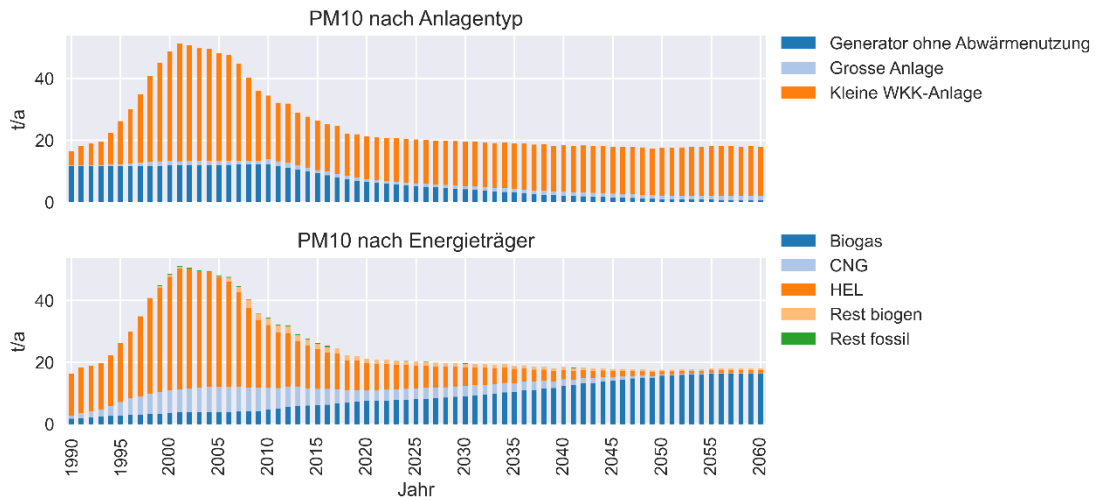
**Abbildung 38: NO<sub>x</sub>-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «WWB»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

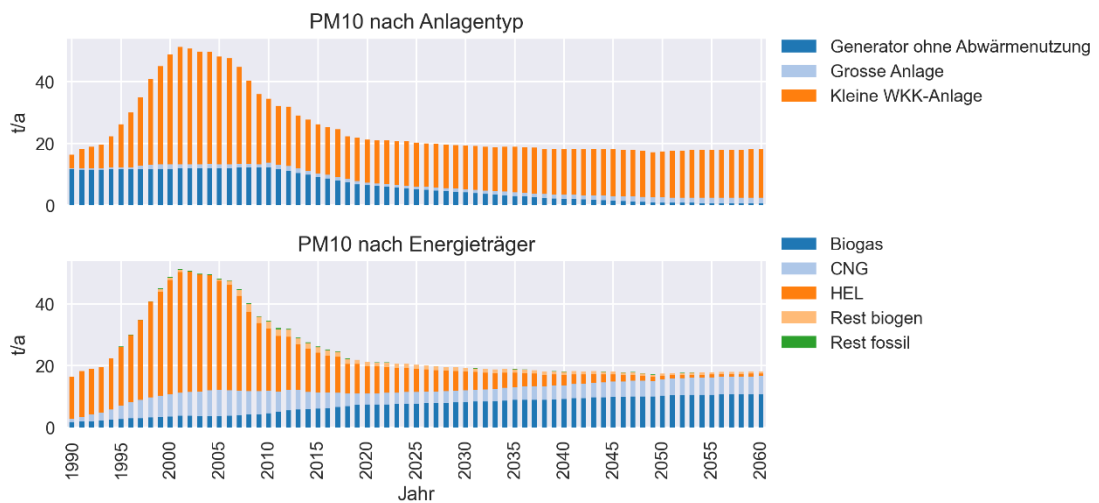
### A4.3.7. PM10

**Abbildung 39: PM10-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «Zero Basis»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

**Abbildung 40: PM10-Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp und nach Energieträger, 1990-2019 (zukünftige Entwicklung gemäss Szenario «WWB»).**



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

## Literatur

**Aschmann, V., Effenberger, M., Prager, M., Tappe, S. J. 2019:** Emissionsarmer Betrieb von Biogasmotoren. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL). [https://www.ktbl.de/fileadmin/user\\_upload/Artikel/Energie/Biogasmotoren/Biogasmotoren-.pdf](https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Artikel/Energie/Biogasmotoren/Biogasmotoren-.pdf) [Zugegriffen 2. März 2022].

**BAFU 2010:** Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990-2035. Aktualisierung 2010. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/luftschadstoff-emissionen-des-strassenverkehrs-1990-2035.html> [Zugegriffen 12. März 2017].

**BAFU 2015:** Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-Road-Sektors. Studie für die Jahre 1980-2050. Umwelt-Wissen Nr. 1519. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/energieverbrauch-und-schadstoffemissionen-des-non-road-sektors.html>.

**BFE 2021a:** Energieperspektiven 2050+. Übersichtsseite der Publikationen. Bundesamt für Energie (BFE). <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.exturl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRTaW4uY2gvZGUvcHVib-GljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTAzMjM=.html> [Zugegriffen 22. November 2021].

**BFE 2021b:** Dokumentation «minimales Geodatenmodell» Elektrizitätsproduktionsanlagen. Bundesamt für Energie (BFE). <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/geoinformation/geodaten/produktionsanlagen/elektrizitaetsproduktionsanlagen.html> [Zugegriffen 7. Dezember 2021].

**BMJ 2019:** Vierundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes\* (Verordnung über mittelgroße Feuerungs- Gasturbinen- und Verbrennungsmotoranlagen - 44. BImSchV). Deutsches Bundesministerium der Justiz. [https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv\\_44/BJNR080410019.html](https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_44/BJNR080410019.html) [Zugegriffen 26. Februar 2022].

**CEN 2012:** Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers). European Standard EN 16258. European Committee for Standardization (CEN), Brussels.

**Ebertsch, G. 2021:** Ergebnisse von Langzeitmessungen von Formaldehyd, CO, NO<sub>x</sub> und Gesamt-C an einer genehmigungsbedürftigen Biogasmotoranlage. Präsentation am Online-Workshop „Stand der Emissionsminderungstechnik bei kleinen Motoranlagen“, UBA Deutschland, 19.10.2021. <https://www.umweltbundesamt.de/programm-workshop-stand-der> [Zugegriffen 27. Februar 2021].

**Ecoinvent 2021:** Ecoinvent Database v3.8. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch).

- EMEP/EEA 2016:** EMEP/EEA emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. 1.A.4 Small combustion. European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), European Environment Agency (EEA), Luxembourg. <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2016/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-small-combustion-2016> [Zugegriffen 21. November 2016].
- EMEP/EEA 2019:** EMEP/EEA emission inventory guidebook 2019. Technical guidance to prepare national emission inventories. 1.A.4 Small combustion. European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), European Environment Agency (EEA), Luxembourg. [https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-small-combustion/at\\_download/file](https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-4-small-combustion/at_download/file) [Zugegriffen 21. Oktober 2020].
- EUR-Lex 2015:** Vorschlag für eine Richtlinie des europäischen Parlamentes und des Rates zur Begrenzung der Emissionen bestimmter Schadstoffe aus mittelgrossen Feuerungsanlagen in die Luft („MCP Directive“). Europäische Union (EU), Brüssel. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ga/TXT/?uri=CELEX:52013PC0919> [Zugegriffen 7. Oktober 2016].
- INFRAS 2016:** Emissionsinventar stationäre Motoren und Gasturbinen. Standbericht 2014. Bundesamt für Umwelt (BAFU). [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/Emissionsinventar\\_stationaere\\_Motoren\\_und\\_Gasturbinen\\_Standbericht\\_2014.pdf.download.pdf/Emissionsinventar\\_station%C3%A4re\\_Motoren\\_und\\_Gasturbinen\\_Standbericht\\_2014.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/Emissionsinventar_stationaere_Motoren_und_Gasturbinen_Standbericht_2014.pdf.download.pdf/Emissionsinventar_station%C3%A4re_Motoren_und_Gasturbinen_Standbericht_2014.pdf) [Zugegriffen 19. März 2020].
- INFRAS 2017:** Luftschadstoffemissionen des Strassenverkehrs in der Schweiz 1990-2050. Schlussbericht. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Ittigen. [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/Bericht\\_Luftschadstoffemissionen\\_des\\_Strassenverkehrs\\_der\\_Schweiz\\_1990\\_2050.pdf.download.pdf/Bericht\\_Luftschadstoffemissionen\\_des\\_Strassenverkehrs\\_der\\_Schweiz\\_1990\\_2050.pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/Bericht_Luftschadstoffemissionen_des_Strassenverkehrs_der_Schweiz_1990_2050.pdf.download.pdf/Bericht_Luftschadstoffemissionen_des_Strassenverkehrs_der_Schweiz_1990_2050.pdf) [Zugegriffen 23. Dezember 2020].
- Jakob, M., Müller, J., Altenburger, A. 2021:** Rechenzentren in der Schweiz – Stromverbrauch und Effizienzpotenzial. EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE.
- Kaufmann, U. 2021:** Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz (Ausgabe 2020). Bundesamt für Energie (BFE), Bern. <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10633> [Zugegriffen 21. Oktober 2021].
- Kaufmann, U., Gülden Sterzl, J. 2015:** Thermische Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK) in der Schweiz (Ausgabe 2014). Bundesamt für Energie (BFE), Bern. [http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/index.html?lang=de&dossier\\_id=00774](http://www.bfe.admin.ch/themen/00526/00541/00543/index.html?lang=de&dossier_id=00774) [Zugegriffen 7. Juli 2016].
- Kraemer, B. 2011:** Understanding load factor. Implications for specifying onsite generators. MTU Onsite Energy Corporation. [http://www.mtuonsiteenergy.com/fileadmin/fm-dam/mtu-oe/technical-info/white-papers/load\\_factor\\_MTU251\\_092311\\_E.pdf](http://www.mtuonsiteenergy.com/fileadmin/fm-dam/mtu-oe/technical-info/white-papers/load_factor_MTU251_092311_E.pdf) [Zugegriffen 19. Juli 2016].



**Krähenbühl, S., Bühlmann, R. 2020:** Pilot-Projekt Dieselpartikelfilter (DPF) Nachrüstung bestehender Notstromaggregate in Zivilschutzanlagen. Konzeptbericht V2. Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS).

**Küng, L., Felder, R. 2006:** Verschiedene Notstromanlagen im Vergleich. Vor- und Nachteile von redundanten Netzanschlüssen, von mobilen und von fest installierten Notstrom-Dieselselaggregaten. Bulletin SEV/VSE 15/06. [http://www.biblioite.ethz.ch/downloads/Kueng\\_Notstrom.pdf](http://www.biblioite.ethz.ch/downloads/Kueng_Notstrom.pdf) [Zugegriffen 19. Juli 2016].

**LHA 2008a:** Emissionsmessung Stationäre Motoren. Lufthygieneamt beider Basel (LHA), Liestal. [https://www.baselland.ch/fileadmin/baselland/files/docs/bud/lufthygiene/bewkontr/messprogr/10\\_Stationaere-Motoren.pdf](https://www.baselland.ch/fileadmin/baselland/files/docs/bud/lufthygiene/bewkontr/messprogr/10_Stationaere-Motoren.pdf) [Zugegriffen 19. Juli 2016].

**LHA 2008b:** Emissionsmessung Gasturbinen (Erdgas und HEL). Lufthygieneamt beider Basel (LHA), Liestal.

**LHA 2010:** Luftreinhalteplan der Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft 2010. Lufthygieneamt beider Basel (LHA), Liestal.

**Norwegian Environment Agency 2020:** Informative Inventory Report (IIR) 2020. Norway. Air pollutant emissions 1990-2018. Norwegian Environment Agency. <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2020/april-2020/informative-inventory-report-2020-norway/> [Zugegriffen 2. März 2020].

**Prognos, INFRAS, TEP Energy, Ecoplan 2020:** Energieperspektiven 2050+. Technischer Bericht. Gesamtdokumentation der Arbeiten. Bundesamt für Energie (BFE). <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energieperspektiven-2050-plus.ex-turl.html/aHR0cHM6Ly9wdWJkYi5iZmUuYWRtaW4uY2gvZGUvcHVib-GljYX/Rpb24vZG93bmxvYWQvMTA3ODM=.html> [Zugegriffen 9. Februar 2022].

**SECO 2021:** Szenarien zur BIP-Entwicklung der Schweiz. Staatssekretariat für Wirtschaft (SECO). [https://www.seco.admin.ch/seco/de/home/wirtschaftslage---wirtschaftspolitik/wirtschaftspolitik/Wachstumspolitik/szenarien\\_bip-entwicklung\\_schweiz.html](https://www.seco.admin.ch/seco/de/home/wirtschaftslage---wirtschaftspolitik/wirtschaftspolitik/Wachstumspolitik/szenarien_bip-entwicklung_schweiz.html) [Zugegriffen 26. Februar 2022].

**UBA 2020:** National Inventory Report for the German Greenhouse Gas Inventory 1990 – 2018. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2020. Umweltbundesamt Deutschland (UBA). [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change\\_23-2020\\_nir\\_2020\\_en\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-04-15-climate-change_23-2020_nir_2020_en_0.pdf) [Zugegriffen 2. März 2022].

**UGZ 2011:** Massnahmenplan Luftreinhaltung 2011 der Stadt Zürich. Bericht. Umwelt- und Gesundheitsschutz Zürich (UGZ).

**UNECE 2013:** 1999 Protocol to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone to the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, as amended on 4 May 2012 („Gothenburg Protocol“). United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). [http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2013/air/eb/ECE.EB.AIR.114\\_ENG.pdf](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/env/documents/2013/air/eb/ECE.EB.AIR.114_ENG.pdf) [Zugegriffen 18. November 2016].

**UVEK 2014:** Änderung der Luftreinhalte-Verordnung in den Bereichen stationäre Verbrennungsmotoren, Gasturbinen, weitere stationäre Anlagen sowie Brennstoffe und Marktüberwachung. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).