

Bundesamt für Umwelt BAFU

Emissionsinventar stationäre Motoren und Gasturbinen Standbericht 2014

Schlussbericht
Bern, 22. Dezember 2016

Benedikt Notter
Cornelia Graf

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Impressum

Emissionsinventar stationäre Motoren und Gasturbinen

Standbericht 2014

Schlussbericht

Bern, 22. Dezember 2016

7279b_Emissionsinventar_StationäreMotoren+Gasturbinen_2014.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 und Felix Reutimann, Sektion Verkehr, Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien

Autorinnen und Autoren

Dr. Benedikt Notter

Cornelia Graf

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

Zusammenfassung	7
1. Ausgangslage	11
2. Zielsetzung	11
2.1. Übersicht	11
2.2. Betrachtete Anlagen	12
2.3. Zielgrößen und Systemgrenzen	14
3. Methodik	15
3.1. Prinzip	15
3.2. Gliederung	16
3.3. Datenquellen	18
3.3.1. Mengengerüste	18
3.3.2. Brennstoffverbrauchs- und Emissionsfaktoren	19
3.4. Herleitung der Mengengerüste	20
3.4.1. Generatoren ohne Abwärmenutzung	20
3.4.2. Kleine WKK-Anlagen	21
3.4.3. Grosse Anlagen	23
3.5. Berechnung von Energieverbrauch und Emissionen	23
3.5.1. Berechnung des Brennstoff- und Energieverbrauchs	23
3.5.2. Berechnung der Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionen	24
4. Mengengerüste	25
4.1. Übersicht	25
4.2. Generatoren ohne Abwärmenutzung	28
4.2.1. Brennstoffe	28
4.2.2. Betriebsstunden	30
4.2.3. Leistung	30
4.2.4. Abgastechnologien	31
4.3. Kleine WKK-Anlagen	32

4.3.1.	Brennstoffe	32
4.3.2.	Betriebsstunden	33
4.3.3.	Leistung	34
4.3.4.	Abgastechnologien	35
4.4.	Grosse Anlagen	36
4.4.1.	Brennstoffe	36
4.4.2.	Betriebsstunden	36
4.4.3.	Leistung	37
4.4.4.	Abgastechnologien	37
5.	Energieverbrauch und Emissionen	38
5.1.	Übersicht	38
5.2.	Generatoren	41
5.3.	Kleine WKK-Anlagen	42
5.4.	Grosse Anlagen	45
6.	Ergänzende Anmerkungen	46
6.1.	Datenqualität	46
6.2.	Vergleich mit anderen Quellen	49
6.2.1.	BFE-Statistik der thermischen Stromproduktion und WKK	49
6.2.2.	EMIS-Datenbank	50
6.3.	Empfehlungen für die Erstellung einer Zeitreihe	51
6.3.1.	Rückschreibung	51
6.3.2.	Fortschreibung	52
7.	Fazit und Ausblick	52
Annex		54
A1.	Brennstoffeigenschaften	54
A2.	Verbrauchs- und Emissionsfaktoren	55
A3.	Mengengerüste	58
A4.	Energieverbrauch und Emissionen	60
Glossar		63
Literatur		65

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 Energieverbrauch und Emissionen für das Jahr 2014.

Das Inventar umfasst drei Anlagentypen:

- **Generatoren ohne Abwärmenutzung.** Diese werden fast ausschliesslich als Notstromaggregate eingesetzt. Als solche dürfen sie gemäss LRV maximal 50 Stunden pro Jahr betrieben werden und müssen dafür ausser einem Feinstaub- und Dieseleruss-Grenzwert keine weiteren Emissionsgrenzwerte einhalten.

Das vorliegende Inventar enthält nur die mit Heizöl Extraleicht (HEL) betriebenen Generatoren – die mit Diesel oder anderen Brennstoffen betriebenen Generatoren werden im Non-Road-Emissionsinventar (BAFU 2015) geführt.

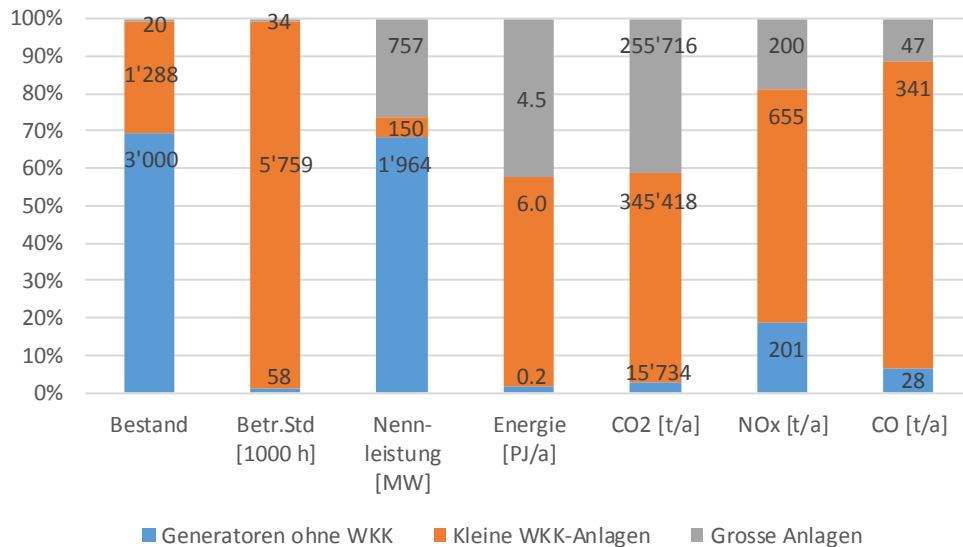
- **Kleine WKK-Anlagen.** Dabei handelt es sich um stationäre Motoren mit Abwärmenutzung nach dem Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung (WKK). Die meisten dieser Aggregate sind Blockheizkraftwerke (BHKW) und produzieren also Wärme und Strom, meist aus gasförmigen Brennstoffen. Dabei wird entweder Erdgas eingesetzt oder in Landwirtschaft, Industrie und Gewerbe anfallendes Biogas, in ARAs 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 Anlagen werden in Kraftwerken, Fernheizkraftwerken oder in der Industrie betrieben.

Der Gesamtbestand stationärer Motoren und Gasturbinen beträgt 2014 rund 4300 Aggregate. 3000 davon sind Generatoren ohne Abwärmenutzung, rund 1300 kleine WKK-Anlagen. Die grossen Anlagen umfassen nur 20 Aggregate (Tabelle 1, Abbildung 1).

Der grösste Teil der Betriebsstunden (total rund 5.8 Mio. im Jahr 2014) entfällt auf die WKK-Anlagen, da diese neben ihrem hohen Bestand auch hohe jährliche Betriebsstunden von rund 4300 h/a pro Aggregat aufweisen (vgl. Tabelle 2).

Bei der installierten Leistung hingegen sind die kleinen WKK-Anlagen aufgrund ihrer geringen durchschnittlichen Nennleistung von 117 kW pro Aggregat wiederum schwach vertreten gegenüber den Generatoren, welche nebst dem hohen Bestand eine durchschnittliche Nennleistung von 655 kW aufweisen, und den grossen Anlagen mit einer durchschnittlichen Leistung von 54 MW pro Gasturbine.

Abbildung 1: Übersicht über Bestand, Betriebsstunden, installierte Leistung, Endenergieverbrauch sowie CO₂-, NO_x- und CO-Emissionen nach Anlagentyp.



Grafik INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Lufthygienefachstellen, EZV, eigene Berechnung

Den Energieverbrauch von total 10.8 PJ¹ dominieren wiederum die kleinen WKK-Anlagen (ca. 56%), dicht gefolgt von den grossen Anlagen (42%). Die Generatoren ohne Abwärmenutzung verbrauchen aufgrund ihrer geringen Betriebsstunden nur 2% der Energie.

Die Verhältnisse zwischen den Anlagentypen sind bei den CO₂-Emissionen ähnlich wie beim Energieverbrauch, allerdings macht hier der Anteil der Generatoren 3% statt 2% aus. Der Grund sind die höheren CO₂-Emissionen von Heizöl, bezogen auf den Energiegehalt, verglichen mit den bei den anderen Anlagen dominierenden Gasbrennstoffen.

Bei den Emissionen der Luftschadstoffe NO_x und CO verursachen die Generatoren trotz ihrem geringen Energieverbrauch einen noch höheren Anteil. Dies liegt einerseits wiederum am verwendeten Brennstoff Heizöl, aber auch daran, dass sie als Notstromaggregate nicht die gleichen Emissionsgrenzwerte einhalten müssen wie die anderen Anlagen und daher kaum mit Abgastechnologien ausgestattet sind.

¹ Zum Vergleich: Der Energieverbrauch des Non-Road-Sektors 2015 beträgt 17.9 PJ (BAFU 2015)

Tabelle 1: Bestand, Betriebsstunden, installierte Leistung, Endenergieverbrauch und Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen 2014 nach Anlagentyp.

Anlagentyp	Bestand [Anz. Aggregate]	Be- triebs- stunden [1000 h]	Instal- lierte Nenn- leistung [MW]	Enden- ergie- ver- brauch [PJ]	CO ₂ [t/a]	NO _x [t/a]	CO [t/a]
Generatoren ohne WKK	3'000	58	1'964	0.2	15'734	201	28
Kleine WKK-Anlagen	1'288	5'759	150	6.0	345'418	655	341
Grosse Anlagen	20	34	1'087	4.5	255'716	200	47
TOTAL	4'308	5'851	3'201	10.8	616'868	1'056	416

Tabelle INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Lufthygienefachstellen, EZV, eigene Berechnung

Tabelle 2: Durchschnittliche Betriebsstunden, Nennleistung, Energieverbrauch und Emissionen pro Aggregat, nach Anlagentyp sowie im Gesamtdurchschnitt (bestandesgewichtet).

Anlagentyp	Betriebs- stunden [h]	Nenn- leistung [kW]	Endener- giever- brauch [GJ]	CO ₂ [t/a]	NO _x [t/a]	CO [t/a]
Generatoren ohne WKK	19	655	71	5	0.1	0.01
Kleine WKK-Anlagen	4'470	117	4'676	268	0.5	0.26
Grosse Anlagen	1'723	54'370	227'391	12'786	10.0	2.37
MITTELWERT	1'358	743	2'503	143	0.2	0.10

Tabelle INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Lufthygienefachstellen, EZV, eigene Berechnung

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, Arbeitspläne und auch die jeweiligen Zeitpunkte der Berichterstattung.

Der Bereich der stationären Verbrennungsmotoren sowie Gasturbinen ist bislang noch nicht in derselben Tiefe behandelt worden wie anderen Sektoren, in welchen Verbrennungskraftmaschinen eingesetzt werden, namentlich wie beim Strassenverkehr (s. BAFU 2010) und wie bei mobilen Maschinen im Non-Road-Sektor (BAFU 2015). Die Luftschadstoffemissionen der stationären Verbrennungsmotoren und Gasturbinen sind auf nationaler Ebene in der Luftreinhalte-Verordnung (LRV)², 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 sollen mit der «MCP Directive» (MCP = medium-size combustion plants, s. EUR-Lex 2015) die Emissionen stationärer Anlagen ab 1 MW Feuerungswärmeleistung (FWL) neu geregelt werden. Schliesslich begrenzt auch das Göteborg-Protokoll der UNECE die Emissionen stationärer Verbrennungsmotoren ab 5 MW FWL (UNECE 2013) auf europäischer Ebene.

2. Zielsetzung

2.1. Übersicht

Ziel des vorliegenden Emissionsinventars ist die Quantifizierung von Energie- und Brennstoffverbrauch und Luftschadstoffemissionen stationärer Motoren und Gasturbinen in der Schweiz. Als «Standbericht» fokussiert der vorliegende Bericht vorerst auf das Jahr 2014 als das aktuellste Jahr, zu dem zum Zeitpunkt der Berichterstellung Daten aus allen notwendigen Quellen vorliegen. Die Erstellung einer Zeitreihe der Entwicklung von Energieverbrauch und Emissionen ist zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen. Empfehlungen dafür sind in Kapitel 6.3 festgehalten.

² LRV, SR 814.318.142.1

Die folgenden Unterkapitel gehen genauer auf Inhalt und Abgrenzung des vorliegenden Inventars ein.

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. Diese 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 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 nur die mit HEL betriebenen Aggregate – mehr dazu s. unten.
- Kleine WKK-Anlagen, d.h. Stromerzeugungsaggregate mit Nutzung der Abwärme nach dem Prinzip der Wärme-Kraft-Kopplung (WKK)³. Dabei handelt es sich meist um Blockheizkraftwerke (BHKW), welche hohe jährliche Betriebsstunden (um 4000 h/a) aufweisen und grossmehrheitlich mit Gas – sei dies Erd-, Bio-, Klär- oder Deponiegas – betrieben werden. Die Definition dieser Anlagen richtet sich nach der Definition in der BFE-Statistik (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015) 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 Energieproduktion. 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 können mobil oder stationär eingesetzt werden. Theoretisch sollten die mobil eingesetzten Generatoren im Non-Road-Emissionsinventar (BAFU 2015) und die stationären im vorliegenden Inventar berücksichtigt werden. Die Zuordnung von mobilem vs. stationärem Einsatz ist aber praktisch nicht umsetzbar, da die Datengrundlagen zur Einsatzart fehlen.

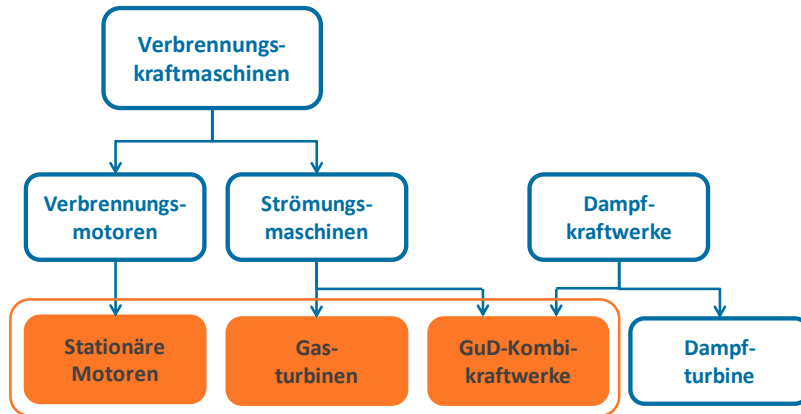
³ WKK-Anlagen sind gemäss Definition des BFE Anlagen mit Umwandlung von mindestens 5% der eingesetzten Energie in Elektrizität und mit einem Gesamtnutzungsgrad (Wärme und Elektrizität) von mindestens 60% (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015).

Daher wird die Abgrenzung anhand des verwendeten Brennstoffes vorgenommen: Mit Diesel betriebene Generatoren werden dem Non-Road-Emissionsinventar und mit HEL betriebene Generatoren dem vorliegenden Inventar der stationären Motoren und Gasturbinen zugeordnet⁴. Dies läuft in der Tendenz ebenfalls auf die Zuordnung mobil vs. stationär hinaus, da kleinere Generatoren tatsächlich öfter mit Diesel und grössere öfter mit HEL betrieben werden, wie die Auswertungen für den vorliegenden Bericht bestätigen (s. Kapitel 4.2.1). Zudem hat diese Abgrenzung den Vorteil, dass die in den Inventaren berechneten Treib- bzw. Brennstoffmengen einfacher mit dem bekannten Absatz verglichen werden können.

- 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 hier 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.

⁴ Diesel und Heizöl extra leicht (HEL) haben als Brennstoffe weitgehend die gleichen Eigenschaften, abgesehen von einem höheren erlaubten Schwefelgehalt (0.5% bei HEL gegenüber 0.1% bei Diesel) und unterschiedlichen Zusatzstoffen, welche v.a. das Fließverhalten bei niedrigen Temperaturen beeinflussen. Der relevanteste Unterschied zwischen den Brennstoffen ist vor allem steuertechnischer Art – auf Diesel als Motorentreibstoff ist ein deutlich höherer Mineralölsteuersatz geschuldet (75.87 Rp./l, Stand November 2016) als auf HEL als Brennstoff (0.3 Rp./l). Auf HEL als fossilem Brennstoff wird zusätzlich die CO₂-Lenkungsabgabe erhoben, welche aber mit CHF 84 pro Tonne CO₂ (entspricht 22.6 Rp./l bei 15°C) ebenfalls deutlich tiefer ausfällt als die Mineralölsteuer auf Diesel. S. Website der EZV: www.ezv.admin.ch

Abbildung 2: 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:

- Energieverbrauch (in Energieeinheiten, wie GJ, TJ etc.) respektive Brennstoffverbrauch (in Gewichts- oder Volumeneinheiten wie kg, m³ etc.)
- Emissionen der folgenden Treibhausgase:
 - CO₂ (Kohlenstoffdioxid)
 - CH₄ (Methan)
 - N₂O (Lachgas)
- Luftschadstoffemissionen:
 - NO_x (Stickoxide)
 - CO (Kohlenstoffmonoxid)
 - PM (Particulate Matter, d.h. Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser bis 10 μm)
 - HC⁵ (Kohlenwasserstoffe), respektive NMHC⁶ (Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe, d.h. HC minus CH₄)
 - C₆H₆ (Benzol, Teilmenge der Kohlenwasserstoffe)

⁵ andere Bezeichnung: VOC (volatile organic compounds)

⁶ andere Bezeichnung: NMVOC (non-methane volatile organic compounds)

Das vorliegende Inventar quantifiziert Energieverbrauch und Emissionen im Betrieb der Anlagen, d.h. Endenergieverbrauch und direkte Emissionen. Primärenergieverbrauch sowie Emissionen der Energieträger-Bereitstellung sind nicht Teil der Betrachtung.

3. Methodik

3.1. Prinzip

Das vorliegende Emissionsinventar wendet grundsätzlich eine Bottom-Up-Berechnung von Energieverbrauch und Emissionen an. Der Energieverbrauch ergibt sich aus dem Bestand an Aggregaten, deren Betriebsstunden und dem durchschnittlichen Energieverbrauch:

$$EV = N \cdot H \cdot SEV \quad (1)$$

mit:

EV = Energieverbrauch [GJ]

N = Bestand (Anzahl Aggregate)

H = Jährliche Betriebsstunden pro Aggregat [h/a]

SEV = spezifischer Energieverbrauch pro Stunde [GJ/h]

Da die vorliegenden Berechnungsinputs jedoch je nach Anlagentyp oder gar nach individueller Anlage variieren, variiert auch das Vorgehen bei der Berechnung des Energieverbrauchs. Für grosse Anlagen liegt oft der jährliche Energieverbrauch aus Geschäftsberichten, oder aus den Angaben der kantonalen Lufthygienefachstellen vor. Auch für die Klein-WKK-Anlagen liegen Angaben zum Energieverbrauch aus der entsprechenden Statistik des BFE vor (Kaufmann und Gölten Sterzl 2015; s. dazu auch Kapitel 3.4.2 und 3.5.1). Umgekehrt liegen für die Generatoren keine Stundenwerte des Energieverbrauchs vor, deshalb berechnet sich der spezifische Energieverbrauch aus Leistung, Lastfaktor und einer Annahme zum Wirkungsgrad:

$$SEV = P \cdot \lambda \cdot WG \quad (2)$$

mit:

P = Nennleistung [kW]

λ = effektiver Lastfaktor (dimensionslos)

WG = Energieverbrauch in GJ pro kWh Outputleistung (entspricht Wirkungsgrad)

Unabhängig von der Art der Berechnung des Energieverbrauchs werden die Emissionen anschliessend basierend auf dem Energieverbrauch und energiebezogenen Emissionsfaktoren berechnet:

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

mit:

Em = Jährliche Emissionen [t/a]

EF = Emissionsfaktor [g/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 3 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 3: Gliederung des Emissionsinventars.

Gliederung	Ausprägungen	Bemerkungen
Anlagentyp	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Generator ohne Abwärmenutzung ▪ Kleine WKK-Anlage ▪ Grosse Anlage 	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"> ▪ 1 A 1 a (Public electricity and heat production) ▪ 1 A 1 b (Petroleum refining) ▪ 1 A 1 c (Manufacture of solid fuels and other energy industries) ▪ 1 A 2 d (Stationary combustion in manufacturing industries and construction: Pulp, paper and print) ▪ 1 A 2 g viii: Stationary combustion in manufacturing industries and construction: Other) ▪ 1 A 4 a i: Commercial/institutional stationary combustion ▪ 1 A 4 b i: Residential stationary combustion ▪ 1 A 4 c i: Agriculture/forestry/fishing stationary combustion 	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"> ▪ Motor ▪ Gasturbine 	
Brennstoff	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Heizöl extra leicht (HEL) und Diesel ▪ Erdgas ▪ Biogas (inkl. Klärgas, Deponiegas) ▪ LPG (Liquefied petrol gas, z.B. Propan, Butan) ▪ Andere fossile (z.B. Benzin) ▪ Andere biogene (z.B. Biodiesel, Fett/Öl etc.) 	
Feuerungswärmeleistungsklasse	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 0 – 100 kW ▪ 100 kW – 1 MW ▪ 1 – 5 MW ▪ 5 – 20 MW ▪ 20 – 40 MW ▪ >40 MW 	Bei Klein-WKK-Anlagen nicht unterschieden (Begründung s. Kapitel 3.4.2)
Abgastechnologie	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Magermotor ▪ Dreiweg-Katalysator ▪ Partikelfilter ▪ SCR (Selective catalytic reduction) ▪ NO_x-Speicherkatalysator ▪ Oxidations-Katalysator ▪ Keine ▪ unbekannt 	Vorkommende Kombinationen: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Partikelfilter + Magermotor ▪ Partikelfilter + SCR ▪ Oxidations-Katalysator + SCR

Tabelle INFRAS.

3.3. Datenquellen

3.3.1. Mengengerüste

Das vorliegende Emissionsinventar kombiniert Informationen aus unterschiedlichen Datenquellen. Für die Mengengerüste⁷ stützt es sich auf die folgenden Datenquellen:

- Die bei der Eidgenössischen Zollverwaltung (EZV) hinterlegten **Verwendungsverpflichtungen von Heizöl für Stromerzeugungsanlagen**. Die Verwendungsverpflichtung resultiert in einer Steuerbegünstigung bei der Mineralölsteuer, da mit ihr Heizöl – also Brennstoff – für den Antrieb eines Motors verwendet werden darf. In den Genuss solcher Steuererleichterungen kommen Betreiber stationärer (genau genommen: auch transportabler, aber stationär arbeitender) Stromerzeugungsanlagen⁸.

Die entsprechenden Dossiers bei der EZV sind nicht digitalisiert. Es liegen aber einerseits periodisch durch die EZV aktualisierte Auswertungen der Anzahl Dossiers nach Branche vor; andererseits wurden für das vorliegende Projekt die relevanten Angaben (Betreiber/Branche, Anzahl verschiedene Aggregate, sowie deren Leistung, Hersteller und Typ) aus einer Stichprobe von 60 Dossiers in Excel ausgewertet.

- Die **Statistik des BFE zur thermischen Stromproduktion inklusive Wärmekraftkopplung (WKK)** in der Schweiz. Diese Statistik wird jährlich aktualisiert. Die aktuellste zur Erarbeitung des vorliegenden Inventars vorhandene Ausgabe ist diejenige von 2014 (Kaufmann und Gilden Sterzl 2015). Die durch die BFE-Statistik abgedeckten Anlagen decken sich in grossen Teilen mit dem vorliegenden Inventar. Notstromaggregate (Generatoren ohne Abwärmenutzung) sind jedoch nicht erfasst; dafür berücksichtigt die Statistik auch Dampfturbinen, welche wiederum durch das vorliegende Inventar nicht abgedeckt sind (vgl. Kapitel 2.2). Leider konnten aus Datenschutzgründen die Detaildaten der BFE-Statistik nicht für das vorliegende Inventar zugänglich gemacht werden – als Quellen waren nur die erwähnte Publikation sowie die dem BAFU für die Aktualisierung der EMIS-Datenbank zur Verfügung gestellten Auszüge verfügbar.
- Das BAFU führte für das vorliegende Inventar eine **Umfrage bei den kantonalen Fachstellen für Luftreinhaltung** durch, in welcher alle für die Emissionsberechnung relevanten Parameter abgefragt wurden. Alle Kantone lieferten Auszüge ihrer Datenbestände für das Jahr 2014. Sie beinhalten Stammdaten der Anlagen wie Angaben zum Betreiber und technische Angaben, betriebliche Angaben wie Betriebsstunden oder Treibstoffverbrauch, und teilweise auch Messresultate der periodischen Kontrollen. Die Auswahl der vorhandenen Parameter,

⁷ Unter dem Begriff «Mengengerüst» werden im vorliegenden Bericht die folgenden Parameter verstanden: Bestand, Betriebsstunden, Leistung/Leistungsverteilung und Verteilung der Abgastechnologien.

⁸ Website der Eidgenössischen Zollverwaltung zu Verwendungsverpflichtungen: http://www.ezv.admin.ch/zollinfo_firmen/04020/04256/04263/04527/05022/index.html?lang=de (Zugriff am 18.11.2016)

der Grad der Abdeckung sowie die Qualität der erfassten Angaben variieren jedoch stark von Kanton zu Kanton.

- Ebenfalls konsultiert wurde Datenbestand des **Eidgenössischen Starkstrominspektorates** (ESTI) zu stationären Anlagen. Dieser enthält allerdings nur gemäss Starkstromverordnung⁹ vorlagepflichtige Anlagen (d.h. Anlagen im Netz-Parallelbetrieb und ab einer bestimmten Leistung: falls vor 2013 erfasst, >3 kVA 1-phasig oder >10 kVA 3-phasig; falls ab 2013 erfasst, nur >30 kVA Leistung). Das heisst, Anlagen im Inselbetrieb sind nicht enthalten und entsprechend kann nicht auf Gesamtbestände von Generatoren oder WKK-Anlagen geschlossen werden. Ausserdem fehlt eine Angabe zur verwendeten Brennstoffart, womit die Nützlichkeit des Datensatzes für das vorliegende Inventar beschränkt ist.
- Für die grossen Anlagen liefern die **Websites und Geschäftsberichte** der Betreiber aufschlussreiche Hinweise auf technische Angaben, Betriebsstunden oder den Brennstoffverbrauch.

3.3.2. Brennstoffverbrauchs- und Emissionsfaktoren

Insgesamt liegen für den Energie-/Brennstoffverbrauch und die regulierten Schadstoffe CO und NO_x, sowie teilweise für PM, relativ gute Grundlagen vor. Für die restlichen Schadstoffe ist die Datenlage jedoch dünn. Folgende Datenquellen fliessen in die Berechnung ein:

- Die vorhandenen Emissionsmesswerte aus der oben erwähnten Umfrage bei den kantonalen Fachstellen für Luftreinhaltung. Solche Messwerte sind v.a. für die regulierten Schadstoffe CO und NO_x, teilweise auch für PM (v.a. für Diesel- resp. HEL-betriebene Generatoren) und für kleine Anlagen vorhanden.
- Für die grossen Anlagen wurden die den kantonalen Fachstellen vorliegenden Messberichte ausgewertet; diese enthalten ebenfalls meist Messungen der regulierten Schadstoffe CO und NO_x.
- Die Daten einer Messkampagne für die Revision der LRV-Grenzwerte (Wehrli 2008) wurden für den vorliegenden Bericht ausgewertet. Auch dieser Datensatz enthält v.a. Messwerte für CO und NO_x.
- Das EMEP/EEA Guidebook 2016 (auch bekannt als Corinair Guidebook, EMEP/EEA 2016a, EMEP/EEA 2016b) enthält Emissionsfaktoren für die hier 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.

⁹ Verordnung über elektrische Starkstromanlagen, SR 734.2

- Die Ökobilanzierungsdatenbank GEMIS 4.9 (IINAS 2015) enthält Emissionsfaktoren nach Abgastechnologie differenziert, welche allerdings nicht auf Messungen beruhen, sondern basierend auf der Verbrennungsrechnung hergeleitet wurden.
- Die Ökobilanzierungsdatenbank Ecoinvent (Ecoinvent 2010) wurde ebenfalls herangezogen; die angegebenen Emissionsfaktoren liegen im Vergleich zu den anderen konsultierten Quellen relativ tief.
- Den Herstellerangaben (online zugängliche Prospekte und technische Dokumentationen) können teilweise Angaben zu Brennstoffverbrauch und eingehaltenen Emissionsstandards entnommen werden.
- Weitere Quellen, wie die US Environmental Protection Agency (EPA 1995), oder Pavri und Moore (2001).

3.4. Herleitung der Mengengerüste

3.4.1. Generatoren ohne Abwärmenutzung

Wie in Kapitel 2.2 dargelegt, umfasst das vorliegende Inventar nur mit HEL betriebene Generatoren, während dieselbetriebene Generatoren durch das Non-Road-Emissionsinventar (BAFU 2015) abgedeckt werden.

Der **Bestand** wird basierend auf den Verwendungsverpflichtungen von HEL für Generatoren bei der Eidgenössischen Zollverwaltung (EZV; vgl. Kapitel 3.3.1) geschätzt: Die Anzahl Verwendungsverpflichtungen für das Jahr 2014 wird aus den Auswertungen der EZV von 2013 und 2016 linear interpoliert. Dies ergibt knapp 2000 Verwendungsverpflichtungen. Pro Verpflichtung sind meist mehrere Generatoren in Betrieb. Aus der detaillierten Stichprobe von 60 ausgewerteten Dossiers ergibt sich ein Durchschnitt von rund 1.5 Generatoren pro Dossier. Allerdings werden in den Dossiers nur pro Generator-Typ separate Unterlagen eingereicht – es können auch mehrere Generatoren des gleichen Typs verwendet werden, ohne dass dies in den Dossiers ersichtlich ist. Somit ist die resultierende, für das vorliegende Inventar verwendete Zahl von 3000 Generatoren (vgl. Kapitel 4.2) eine konservative Schätzung – sie liegt denn auch am unteren Rand des Bereichs, der von Mitarbeitern der EZV als plausibel erachtet wird.

Die **Leistungsverteilung** (und damit die durchschnittliche Anzahl Generatoren pro Leistungsklasse sowie die durchschnittliche Leistung innerhalb jeder Klasse) ergibt sich aus den kombinierten Stichproben der EZV-Detailauswertung und den HEL-betriebenen Generatoren aus dem Datensatz der Stadt Zürich, welcher als einziger Datensatz aus der Umfrage bei den kantonalen Fachstellen zuverlässig zwischen Diesel- und HEL-Betrieb unterscheidet. Die kombinierte Stichprobe umfasst somit 201 Generatoren.

Die **jährlichen Betriebsstunden** werden aus den Daten der Umfrage bei den kantonalen Fachstellen geschätzt. Dabei werden wiederum nur die mit HEL betriebenen Generatoren einbezogen (obwohl sich die Betriebsstunden der dieselbetriebenen Generatoren und derjenigen ohne Angabe im Datensatz kaum von den HEL-betriebenen unterscheiden).

Die Verteilung der verschiedenen Arten der **Abgasnachbehandlung** wird ebenfalls aus der Umfrage bei den kantonalen Fachstellen hergeleitet. Hier werden allerdings alle Generatoren einbezogen, um eine genügend grosse Stichprobe zu erhalten. Da alle einbezogenen Generatoren mit Diesel oder HEL betrieben werden können, ist es unwahrscheinlich, dass sich die Verteilung der Abgastechnologien nach den beiden Brennstofftypen unterscheidet.

Die Verteilung der Anlagen nach **NFR-Code** (s. Tabelle 3) basiert auf der Auswertung der EZV-Dossiers nach Branche.

3.4.2. Kleine WKK-Anlagen

Das Mengengerüst der kleinen WKK-Anlagen basiert grösstenteils auf der Statistik des BFE (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, vgl. Kapitel 3.3.1). Diese liefert den **Gesamtbestand** der Anlagen, die **nach Brennstofftyp und Anlageart differenzierten Bestände**, sowie die entsprechende installierte Input- und elektrische Leistung und den **Endenergieverbrauch**. Aus diesen Angaben kann durch Division der installierten Leistungen durch die Anzahl Anlagen die **durchschnittliche Leistung**, sowie aus der Division der Input- durch die elektrische Leistung der durchschnittliche Wirkungsgrad hergeleitet werden. Die Zuordnung zu **NFR-Codes** wird analog der Zuordnung in der EMIS-Datenbank des BAFU nach Anlageart und Brennstofftyp gehandhabt.

Die Verteilung der **Abgastechnologien** wird ebenfalls der BFE-Statistik entnommen, allerdings nicht der öffentlich zugänglichen Publikation, sondern den dem BAFU jährlich für die EMIS-Datenbank übermittelten Daten, in denen die Verteilung zusätzlich nach Brennstofftypen aufgeschlüsselt ist. Da die BFE-Daten nur die häufigsten Technologien Magermotor, Dreiweg-Katalysator und SCR, sowie «andere» und «keine Massnahme» unterscheiden, wird die Kategorie «andere» basierend auf den Daten der Umfrage bei den kantonalen Fachstellen in die restlichen in Tabelle 3 aufgelisteten Abgastechnologien verfeinert.

Da Energieverbrauch, Bestand, Leistung und Wirkungsgrad aus der BFE-Statistik entnommen werden können, können entweder die Betriebsstunden oder der Lastfaktor aus diesen Grössen rückgerechnet werden. Der **Lastfaktor** wird aufgrund verschiedener Angaben (u.a. Wirtschaftlichkeitsrechnung für BHKW, VDI 2012, und Herstellerangaben) nahe Vollast, d.h. bei 0.9 für alle Klein-WKK-Anlagen angesetzt. Die **Betriebsstunden** werden basierend auf den Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen nach Brennstofftyp differenziert hergeleitet.

Beide hergeleiteten Grössen passen gut mit den aus der BFE-Statistik vorhandenen Angaben überein und plausibilisieren einander. Da sich trotzdem geringe Abweichungen ergeben, werden der Lastfaktor von 0.9 und die entsprechend skalierten Betriebsstunden ins Inventar übernommen. Damit ergibt sich bei der Bottom-Up-Berechnung wieder der vom BFE vorgegebene Energieverbrauch.

Eine Verteilung nach **Leistungsklassen** wie in Tabelle 3 dargestellt wird für die kleinen WKK-Anlagen nicht vorgenommen. Die zugänglichen Aggregationslevels der BFE-Daten lassen eine derartige Differenzierung nicht zu. Die Herleitung einer Leistungsverteilung aus den Daten der kantonalen Fachstellen wurde versucht. Es zeigte sich jedoch, dass die die Leistungsangaben in diesen Daten in einer mehr als doppelt so hohen durchschnittlichen Leistung von Klein-WKK-Anlagen resultieren, wie sie die BFE-Statistik unterstellt. Dafür gibt es mehrere mögliche Gründe:

- Die Daten der kantonalen Fachstellen enthalten möglicherweise v.a. die grösseren Anlagen;
- Die Leistungsangaben in den Daten der kantonalen Fachstellen (welche meist auf Angaben der Betreiber basieren) sind nicht zuverlässig – z.B. kann die Nennleistung des Motors mit der Feuerungswärmeleistung (oder dem Total von elektrischer und thermischer Leistung) verwechselt werden. In vielen kantonalen Datensätzen sind allerdings beide Leistungsangaben vorhanden und so konnten in dieser Hinsicht widersprüchliche Daten ausgeschlossen werden.

Dass umgekehrt die Leistungen der kleinen WKK-Anlagen in der BFE-Statistik unterschätzt werden, schliessen die Autoren dieser Statistik aus (mündliche Mitteilung U. Kaufmann, 2. 12. 2016).

Unabhängig von den Gründen der Diskrepanz zwischen der BFE-Statistik und den kantonalen Datensätzen kann natürlich keine Verteilung aus einem Hilfs-Datensatz hergeleitet werden, dessen Mittelwert des entsprechenden Parameters nicht mit demjenigen des Haupt-Datensatzes übereinstimmt. Daher wurde auf eine Differenzierung der Klein-WKK-Anlagen nach Feuerungswärmeleistungsklassen verzichtet.

Dieser Verzicht ist jedoch nicht gravierend. Ein Hauptgrund für die Differenzierung im (ansonsten vergleichbaren) Non-Road-Emissionsinventar ist die Herleitung von Emissionsfaktoren basierend auf nach Leistungsklassen differenzierten Grenzwerten. Der Grund dafür ist, dass die Verteilung der Abgastechnologien für viele Non-Road-Maschinenkategorien nicht bekannt ist und auch Messwerte kaum verfügbar sind. Bei den stationären Anlagen ist jedoch die Verteilung nach Abgastechnologien aus den Grundlagendaten besser abschätzbar, und mehr Emissi-

onsmesswerte sind verfügbar. Daher lassen sich im vorliegenden Inventar trotz fehlender Differenzierung nach Leistungsklassen Emissionswerte in einer vergleichbaren Genauigkeit berechnen.

3.4.3. Grosse Anlagen

Für die grossen Anlagen – insgesamt nur 13 in der Schweiz – werden die notwendigen Angaben (Anzahl Gasturbinen, Leistung, Betriebsstunden, Abgastechnologie, Brennstoff- resp. Energieverbrauch) individuell pro Anlage zusammengetragen. Sie stammen grösstenteils von den kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen, aus öffentlich zugänglichen Websites und Geschäftsberichten, sowie von Direktanfragen bei den Betreibern.

3.5. Berechnung von Energieverbrauch und Emissionen

3.5.1. Berechnung des Brennstoff- und Energieverbrauchs

Der Brennstoff- respektive Energieverbrauch berechnet sich je nach Anlagentyp unterschiedlich.

Bei den **Generatoren ohne Abwärmenutzung** wird aus Bestand, jährlichen Betriebsstunden pro Aggregat, Nennleistung und Lastfaktor die verrichtete Arbeit in kWh berechnet. Diese wird im nächsten Schritt mit dem spezifischen Brennstoffverbrauch in g/kWh oder MJ/kWh (welcher dem Wirkungsgrad entspricht) multipliziert, um den Energieverbrauch herzuleiten.

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. Der Wirkungsgrad respektive der Brennstoffverbrauch pro kWh Output wird basierend auf dem Non-Road-Emissionsinventar (BAFU 2015) bei 37.5% angesetzt, was 9.6 MJ resp. 223 g Diesel pro kWh Output entspricht und somit gut mit den Herstellerangaben übereinstimmt.

Bei den **kleinen WKK-Anlagen** geht der Brennstoff- und Energieverbrauch, ebenso wie der Wirkungsgrad, direkt aus der BFE-Statistik (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015) hervor. Der Lastfaktor (zu Rückrechnungszwecken benötigt) wird aufgrund verschiedener Angaben (u.a. Wirtschaftlichkeitsrechnung für BHKW, VDI 2012, und Herstellerangaben) nahe Volllast, d.h. bei 0.9 für alle Klein-WKK-Anlagen angesetzt (s. auch Kapitel 3.4.2).

Bei den **grossen Anlagen** ist die Vorgehensweise nach Anlage individuell. In vielen Fällen ist aus den Daten der kantonalen Fachstellen, Geschäftsberichten oder Angaben der Betreiber der jährliche Brennstoffverbrauch bekannt. In einigen Fällen wird der Brennstoffverbrauch aus den

Betriebsstunden und dem aus Messberichten entnommenen stündlichen Verbrauch berechnet. Wo auch diese Angaben nicht verfügbar sind, wird der stündliche Verbrauch basierend auf der Feuerungswärmeleistung geschätzt.

Die verwendeten Umrechnungsfaktoren zwischen Brennstoffmenge in Gewichts- oder Volumeneinheiten und Energiemenge in Energieeinheiten (d.h. die Heizwerte) nach Brennstoff sind in Tabelle 8 (Annex A1) aufgelistet.

3.5.2. Berechnung der Treibhausgas- und Luftschadstoff-Emissionen

Gemäss dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Berechnungsprinzip werden die Jahresemissionen für alle Schadstoffe und Anlagentypen mittels Multiplikation des jährlichen Endenergiebedarfs in GJ mit energiebezogenen Emissionsfaktoren in g/GJ berechnet. Letztere werden aus den in Kapitel 3.3.2 aufgelisteten Datenquellen hergeleitet oder übernommen. Wo die notwendigen Grundlagen vorhanden sind, werden die Emissionsfaktoren nach den folgenden Gliederungen differenziert:

- Maschinentyp (Motor, Gasturbine)
- Brennstoff (Diesel/HEL, Erdgas, Biogas inkl. Klär- und Deponiegas, LPG)
- Abgastechnologie (je nach Verfügbarkeit von Messungen, s. Tabelle 3 für die berücksichtigten Technologien)

Die verwendeten Emissionsfaktoren sind im Anhang A2, Tabelle 9 bis Tabelle 12, aufgelistet. Die Differenzierung nach den häufigsten Abgastechnologien ist für die Schadstoffe CO, NO_x und PM möglich. Für die restlichen Schadstoffe können die Emissionsfaktoren nur nach Maschinentyp und Brennstoff differenziert werden.

Wo Datensätze mit Emissionsmessdaten als Quelle der Emissionsfaktoren angegeben sind (d.h. Daten der kantonalen Lufthygiene-Fachstellen, von Messbüros angefertigte Messberichte oder der Bericht von Wehrli 2008), wurden die Emissionsfaktoren in g/GJ wie folgt aus den angegebenen Konzentrationen bei Standardbedingungen (0°C, 1013 mbar, Sauerstoffgehalt im Abgas von 5% für stationäre Motoren und 15% für Gasturbinen) hergeleitet:

- 1) **Umrechnung von mg/m³ in g/GJ:** Diese Umrechnung erfolgt nach der in EMEP/EEA (EMEP/EEA 2016b) beschriebenen Methodik über das spezifische theoretische (stöchiometrische) Volumen des Abgases nach Brennstoff und Maschinentyp. Die Volumenangaben stammen aus den Messanleitungen der LHA (2008a, 2008b) und sind in Tabelle 8 (Annex A1) aufgelistet.

2) **Herleitung von mittleren Emissionsfaktoren:** Die Emissionsfaktoren wurden als arithmetischer 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.

4. Mengengerüste

4.1. Übersicht

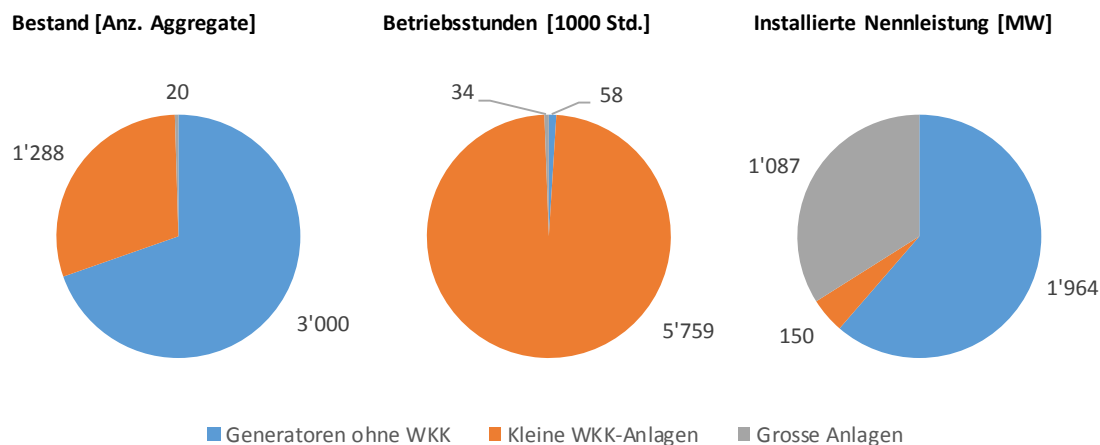
Im Jahr 2014 umfasst der **Bestand** der stationären Motoren und Gasturbinen in der Schweiz rund 4300 Aggregate. Den grössten Anteil des Bestandes (knapp 70%) machen die heizölbetriebenen Generatoren ohne Abwärmenutzung mit rund 3000 Aggregaten aus. Bei den kleinen WKK-Anlagen stehen rund 1300 Aggregate in Betrieb (knapp 30%). 20 Gasturbinen oder kombinierte GuD-Kraftwerke werden in grossen Anlagen betrieben (Tabelle 4, Abbildung 3).

Tabelle 4: Bestand, Betriebsstunden und installierte Nennleistung stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp.

Anlagentyp	Bestand [Anz. Aggregate]	Betriebs- stunden [1000 h]	Installierte Nennleistung [MW]
Generatoren ohne WKK	3'000	58	1'964
Kleine WKK-Anlagen	1'288	5'759	150
Grosse Anlagen	20	34	1'087
TOTAL	4'308	5'851	3'201

Tabelle INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Lufthygienefachstellen, EZV, eigene Berechnung

Abbildung 3: Bestand, Betriebsstunden und installierte Nennleistung stationärer Motoren und Gasturbinen im Jahr 2014 nach Anlagentyp.



Grafik INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Lufthygienefachstellen, EZV, eigene Berechnung

Bei den **Betriebsstunden** stellen die kleinen WKK-Anlagen mit knapp 5.8 Mio. Stunden den grössten Anteil (98%), da jedes Aggregat im Durchschnitt fast 4'500 Stunden pro Jahr betrieben wird. Die Generatoren ohne Abwärmenutzung werden hingegen fast ausschliesslich als Notstromaggregate eingesetzt und daher nur ungefähr alle Monate für einen Lasttest in Betrieb genommen, womit ein durchschnittliches Notstromaggregat auf rund 19 Betriebsstunden im Jahr kommt (vgl. Tabelle 5). Somit summieren sich die Gesamtbetriebsstunden der Generatoren ohne Abwärmenutzung auf nur rund 58'000 Stunden im Jahr 2014. Die einzelnen Gasturbinen in den grossen Anlagen werden mit rund 1700 Stunden pro Jahr zwar deutlich länger betrieben, aber machen wegen ihrer geringen Anzahl mit ca. 34'000 Betriebsstunden im 2014 den geringsten Anteil der Gesamtbetriebsstunden aus.

Hinsichtlich installierter **Nennleistung** (entspricht der elektrischen Leistung) fallen die Verhältnisse anders aus. Es dominieren wiederum die Generatoren ohne WKK mit fast 2000 MW, d.h. über 60% der installierten Leistung aller stationären Motoren und Gasturbinen. Die grossen Anlagen stellen rund 1000 MW bzw. 34% der installierten Nennleistung. Die kleinen WKK-Anlagen machen mit rund 150 MW nur rund 5% aus. Die Begründung für den geringen Anteil der WKK-Anlagen im Vergleich zu den Generatoren ohne WKK liegt neben den unterschiedlichen Beständen in der durchschnittlichen Leistung der einzelnen Aggregate: Die heizölbetriebenen Notstromaggregate sind i.d.R. grosse Generatoren mit einer durchschnittlichen Nennleistung von 655 kW; die durchschnittliche Leistung der kleinen WKK-Anlagen beträgt hingegen nur 117 kW. Die durchschnittliche Nennleistung der Gasturbinen in den grossen Anlagen liegt bei 54 MW.

Tabelle 5: Durchschnittliche Betriebsstunden und Nennleistung pro Aggregat nach Anlagentyp.

Anlagentyp	Betriebs- stunden [h]	Nennleistung [kW]
Generatoren ohne WKK	19	655
Kleine WKK-Anlagen	4'470	117
Grosse Anlagen	1'723	54'370
TOTAL	1'358	743

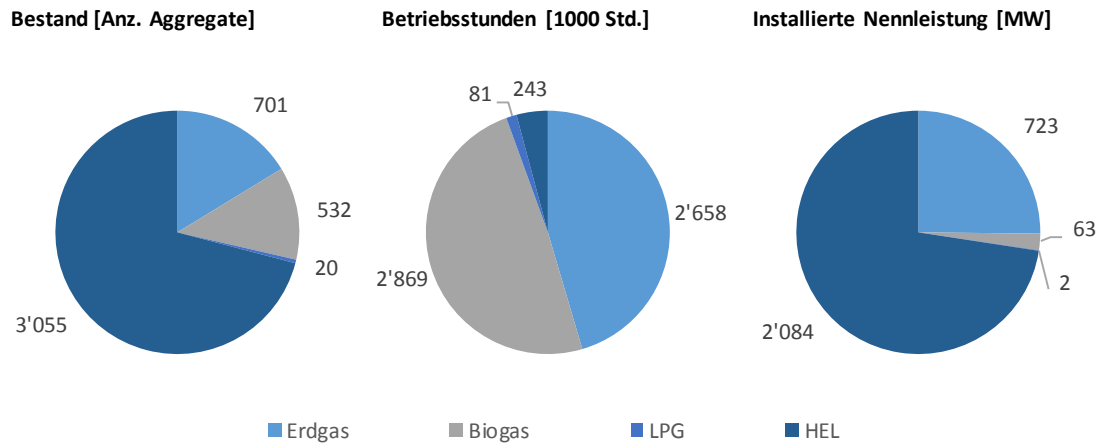
Tabelle INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Lufthygienefachstellen, EZV, eigene Auswertung

Die Anteile von Bestand, Betriebsstunden und installierter Nennleistung der stationären Motoren und Gasturbinen nach Brennstoffart (Abbildung 4) widerspiegeln die Verteilung der Anlagentypen (s. oben) und der je nach Anlagentyp eingesetzten Brennstoffe. Der Bestand ist dominiert von HEL-betriebenen Aggregaten, da die Generatoren ohne Abwärmenutzung, welche den grössten Teil des Bestandes ausmachen, mit diesem Brennstoff betrieben werden (bzw. weil nur die damit betriebenen Generatoren überhaupt im vorliegenden Inventar erfasst sind, vgl. Kapitel 2.2).

Bei den Betriebsstunden haben die Biogas-betriebenen kleinen WKK-Anlagen den höchsten Anteil: Die kleinen WKK-Anlagen weisen die höchsten jährlichen Betriebsstundenzahlen aller Anlagentypen auf; innerhalb der kleinen WKK-Anlagen wurden im Jahr 2014 die Biogas-betriebenen Anlagen länger betrieben als diejenigen mit Erdgas, mutmasslich weil das anfallende Biogas verwertet werden muss, während der Erdgaspreis im Vergleich zum Strompreis 2014 hoch lag (s. auch Kapitel 4.3.2).

Bei der installierten Nennleistung wiederum dominieren die HEL-betriebenen Aggregate, v.a. aufgrund des hohen Bestandes und der meist hohen individuellen Leistung der Generatoren ohne Abwärmenutzung, aber auch aufgrund einiger mit HEL betriebenen grossen Gasturbinen.

Abbildung 4: Bestand, Betriebsstunden und installierte Nennleistung stationärer Motoren und Gasturbinen im Jahr 2014 nach Brennstoffart.



Grafik INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Luftthygienefachstellen, EZV, eigene Berechnung

4.2. Generatoren ohne Abwärmenutzung

4.2.1. Brennstoffe

Stationär eingesetzte Generatoren in der Schweiz werden fast ausschliesslich (gemäss Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen zu 98%) mit Diesel und HEL betrieben. Nur in Einzelfällen werden andere Brennstoffe wie Benzin oder Erdgas eingesetzt. Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, deckt das vorliegende Inventar nur die mit HEL betriebenen Generatoren ab. Die mit Diesel oder anderen Brennstoffen betriebenen Generatoren werden dem Non-Road-Inventar (BAFU 2015) zugeordnet (ungeachtet dessen, dass ein Teil davon faktisch stationär und nicht mobil betrieben wird). Die folgenden Absätze gehen trotzdem kurz auf den Vergleich von Diesel und HEL für den Betrieb von Generatoren ein.

Welcher Brennstofftyp für den Betrieb eines Generators verwendet wird, ist einerseits eine Frage des steuerlichen Anreizes (vgl. Fussnote 4, S. 13): Beim Heizöl wird keine Mineralölsteuer mit dem Kaufpreis erhoben, dafür (seit 2008) die um ein Mehrfaches tiefere CO₂-Abgabe; beim Diesel ist es umgekehrt. Dies führt dazu, dass HEL beim Kauf billiger ist. Beide Steuern können bei Verwendung des Brennstoffes für stationäre Stromerzeugungsanlagen aber rückerstattet werden – die CO₂-Abgabe allerdings erst ab einem Mindest-Rückerstattungsbetrag von CHF 1000 pro Jahr, und bei der Mineralölsteuer werden nur 95% rückerstattet, der Rest wird als Rückerstattungsgebühr zurückbehalten. Dies führt dazu, dass der steuerliche Anreiz bei grösseren Mengen für HEL spricht, bei kleineren Mengen für Diesel.

Ausschlaggebend für die Wahl des Brennstoffs ist laut Informationen der EZV meist jedoch nicht der steuerliche Anreiz, sondern welcher Brennstoff sowieso vor Ort vorhanden ist. Dies führt tendenziell dazu, dass stationär betriebene Anlagen mit HEL und mobil eingesetzte mit Diesel betrieben werden.

Schliesslich besteht aufgrund mündlicher Mitteilungen von MitarbeiterInnen der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen ein gewisser Trend zu vermehrter Dieselnutzung aufgrund der geringeren SO₂-Emissionen.

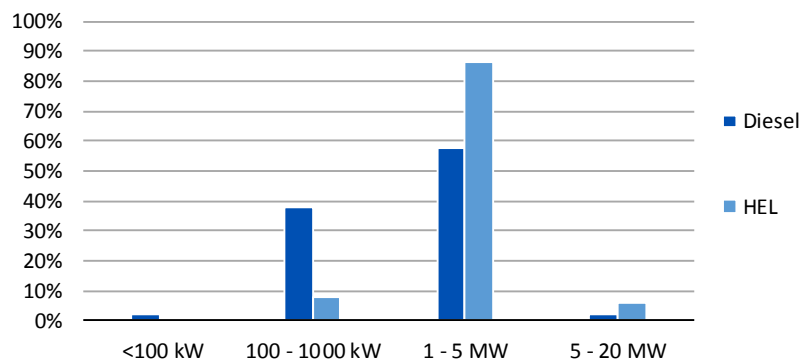
Ein Vergleich der Häufigkeit von Diesel und HEL bei Generatoren, sowie der entsprechenden Verteilung der Leistungsklassen, kann anhand des Datensatzes der Stadt Zürich angestellt werden¹⁰.

In der Stadt Zürich werden 61% der stationären Generatoren mit HEL betrieben und 39% mit Diesel. Die Einteilung in Feuerungswärmeleistungsklassen (Abbildung 5) zeigt deutlich, dass die mit HEL betriebenen Generatoren in der Tendenz grösser sind. Die durchschnittliche Nennleistung der heizölbetriebenen Generatoren beträgt 812 kW, diejenige der dieselnbetriebenen Generatoren 599 kW.

Diese Auswertung deutet darauf hin, dass die der Zuordnung der Generatoren zu den beiden Inventaren (Non-Road vs. Stationäre Motoren) zugrundeliegende Annahme zutrifft, d.h. dass die Wahl des Brennstoffes – Diesel oder HEL – mit der Grösse (und somit mit dem Grad der Mobilität) des Generators korreliert.

¹⁰ Der Datensatz der Stadt Zürich unterscheidet HEL und Diesel zuverlässig. In den restlichen Daten der kantonalen Fachstellen, welche sowohl diesel- als auch heizölbetriebene stationäre Generatoren umfassen, werden diese beiden Brennstofftypen in den meisten Fällen nicht zuverlässig unterschieden.

Abbildung 5: Vergleich der Leistungsklassenverteilung (bezogen auf die Feuerungswärmeleistung) der Diesel- und HEL-betriebenen Notstromaggregate in der Stadt Zürich.



Grafik INFRAS. Quelle: Stadt Zürich

4.2.2. Betriebsstunden

Die durchschnittliche jährliche Betriebsdauer der HEL-betriebenen Generatoren liegt je nach Leistungsklasse zwischen 13 und 25 Stunden und im Gesamtdurchschnitt bei 19 Stunden. Mehr als 50 Betriebsstunden pro Jahr kommen gemäss den Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen bei heizölbetriebenen Generatoren nicht vor – sie gelten also alle als Notstromaggregate (NSA) im Sinne der LRV und müssen dadurch weniger strenge Emissionsgrenzwerte erfüllen als länger betriebene Anlagen – konkret gilt lediglich ein Grenzwert von 50 mg/m^3 für die staubförmigen Emissionen sowie ein Dieseleruss-Grenzwert von 5 mg/m^3 ab Erreichen eines Massenstroms von 50 g/h .

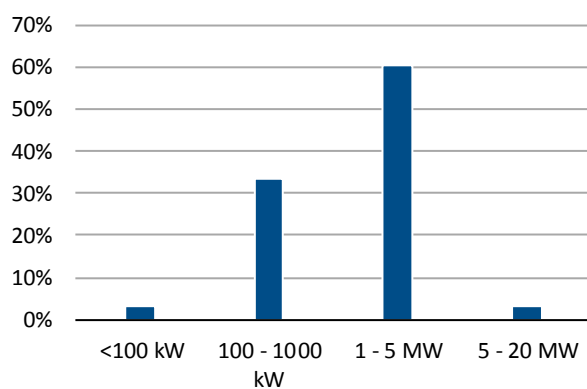
4.2.3. Leistung

Die heizölbetriebenen Generatoren im vorliegenden Inventar weisen eine durchschnittliche Nennleistung von 655 kW auf. Dies entspricht einer Feuerungswärmeleistung von ca. 1.7 MW. Entsprechend befindet sich der grösste Anteil der Generatoren (rund 60%) in der Feuerungswärmeleistungsklasse 1 – 5 MW (Abbildung 6; dies entspricht einem Nennleistungsbereich von rund 380 bis 1900 kW)¹¹. Gut 30% weisen Feuerungswärmeleistungen zwischen 100 und 1000 kW auf. Kleinere heizölbetriebene Generatoren gibt es nur wenige – die kleineren Modelle sind

¹¹ BEACHT: Die Leistungsverteilung im vorliegenden Inventar basiert im Unterschied zu den Abschnitten zum Vergleich zwischen Diesel- und HEL-betriebenen Generatoren in Kapitel 4.2.1 und Abbildung 5 nicht nur auf den Daten der Stadt Zürich, sondern zusätzlich auf der detaillierten Stichprobe der EZV-Dossiers – siehe dazu auch Kapitel 3.4.1.

meist diesel- (oder benzin-)betrieben. Die grössten Notstromanlagen mit Feuerungswärmeleistungen von über 5 MW finden sich in Grossfirmen, Kernkraftwerken, Rechenzentren oder dem CERN.

Abbildung 6: Leistungsklassenverteilung (ausgedrückt als Feuerungswärmeleistung) der heizölbetriebenen Generatoren ohne Abwärmenutzung.



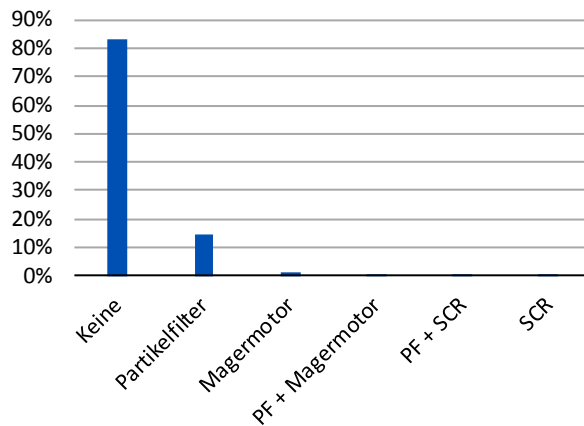
Grafik INFRAS. Quellen: EZV, Stadt Zürich, eigene Berechnung

4.2.4. Abgastechnologien

Die meisten heizölbetriebenen Generatoren – über 80% - verfügen über keine Massnahme zur Abgasreinigung (Abbildung 7). Die am häufigsten eingesetzte Abgastechnologie ist der Partikelfilter, bei knapp 15% der Aggregate. Weitere vorkommende Technologien sind der Magermotor und SCR, sowie Kombinationen mehrerer Technologien – deren Verbreitung liegt aber bei unter einem Prozent der Aggregate.

Diese Verteilung ist dadurch zu erklären, dass die als Notstromaggregate eingesetzten Generatoren gemäss LRV nur die in Kap. 4.2.2 erwähnten Feinstaub- und Dieseleruss-Grenzwerte einhalten müssen.

Abbildung 7: Verteilung der Abgastechnologien bei heizölbetriebenen Generatoren ohne Abwärmenutzung.

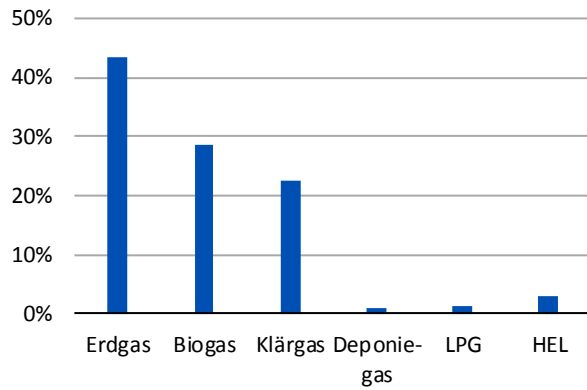


Grafik INFRAS. Quellen: EZV, kantonale Luftreinhalte-Fachstellen, eigene Berechnung

4.3. Kleine WKK-Anlagen

4.3.1. Brennstoffe

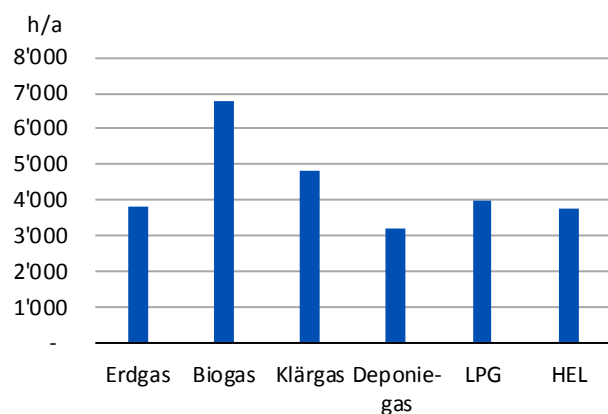
Hinsichtlich Brennstofftypen sind bei den kleinen WKK-Anlagen Gasbrennstoffe dominant. Der mit 44% (bezogen auf die verbrauchte Energiemenge) am häufigsten verwendete Brennstoff ist Erdgas, welches v.a. in Blockheizkraftwerken in Gewerbe und Industrie wie auch von Privaten eingesetzt wird (Abbildung 8). Es wird gefolgt von Biogas (29% der verbrauchten Energiemenge), welches v.a. in der Landwirtschaft und im Gewerbe produziert und verwendet wird, und dem in ARAs anfallenden und in entsprechenden BHKWs verwerteten Klär- und Faulgas (22%). Deponiegas fällt ebenfalls bei Gärungsprozessen an und wird in teilweise in kleinen WKK-Anlagen verwertet, macht aber nur 1.0% der von kleinen WKK-Anlagen insgesamt verbrauchten Energiemenge aus. Weitere verwendete Brennstoffe sind Flüssiggas (LPG) und auch Heizöl Extra-Leicht (HEL) mit rund 1.3% resp. 3.1% der verbrauchten Energiemenge.

Abbildung 8: Einsatz von Brennstoffen bei kleinen WKK-Anlagen.

Grafik INFRAS. Quelle: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015

4.3.2. Betriebsstunden

Klein-WKK-Anlagen werden durchschnittlich rund 4500 Stunden pro Jahr betrieben (s. auch Kapitel 4.1). Eine gewisse Mindestbetriebszeit empfiehlt sich aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen (z.B. 4000 Volllaststunden/Jahr gemäss VDI 2012). Faktisch unterscheiden sich die jährlichen Betriebszeiten nach Brennstoff. Die mit Erdgas betriebenen Anlagen kommen auf knapp 4000 Stunden pro Jahr, die mit Biogas und Klärgas betriebenen auf deutlich mehr (knapp 7000 respektive knapp 5000 Stunden pro Jahr). 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.

Abbildung 9: Betriebsstunden kleiner WKK-Anlagen nach Brennstofftyp.

Grafik INFRAS. Quelle: Kantonale Luftreinhalte-Fachstellen, Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, eigene Berechnung

4.3.3. Leistung

Die durchschnittliche Nennleistung kleiner WKK-Anlagen (entspricht der elektrischen Leistung) beträgt 117 kW (s. auch Kapitel 4.1). Die durchschnittliche Leistung variiert je nach Einsatzgebiet (Tabelle 6). Die grössten Anlagen sind mit zwischen 250 und 300 kW die Deponiegasanlagen und die Biogasanlagen in Gewerbe und Industrie. Die fossilen BHKW, welche die meisten Aggregate ausmachen, liegen leistungsmässig im Mittelfeld. In ARAs kommen eher kleinere Anlagen (im Durchschnitt 80 – 90 kW) zum Einsatz.

Wie in Kapitel 3.4.2 erläutert, kann für die kleinen WKK-Anlagen aus den verfügbaren Datengrundlagen keine Leistungsklassenverteilung hergeleitet werden.

Tabelle 6: Installierte und durchschnittliche Nennleistung kleiner WKK-Anlagen nach Anlageart und Einsatzgebiet.

Anlageart	Anz. Aggregate	Installierte Nennleistung [MW]	Nennleistung pro Aggregat [kW]
Fossile BHKW und Wärmepumpen	748	87	116
Fossile Gasturbinen	5	0	94
ARA-BHKW	357	29	82
ARA-Gasturbinen	6	1	88
Biogasanlagen Landwirtschaft	102	15	143
Biogasanlagen Gewerbe & Industrie	63	16	258
Deponiegasanlagen	7	2	286
TOTAL	1'288	150	117

Tabelle INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, eigene Berechnung

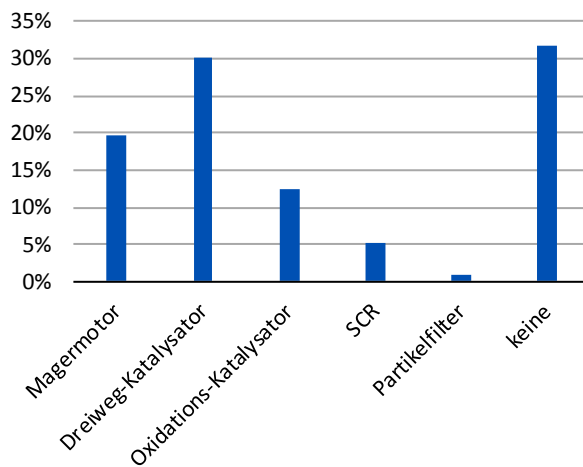
4.3.4. Abgastechnologien

Der Einsatz von Technologien zur Abgasreinigung ist bei kleinen WKK-Anlagen weiter verbreitet als bei Generatoren ohne Abwärmenutzung, da wegen ihrer längeren Betriebsdauer gemäss LRV strengere Grenzwerte (auch für NO_x und CO) einzuhalten sind.

Der Dreiweg-Katalysator ist die häufigste Massnahme, er ist zu finden bei rund 30% der Aggregate, v.a. bei fossilen BHKW (s. auch Kaufmann und Gülden Sterzl 2015). Gefolgt wird er vom Magermotor, welcher v.a. bei BHKW in Kläranlagen oft eingesetzt wird. Ebenfalls verbreitet sind Oxidations-Katalysatoren sowie SCR. 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 aber vernachlässigbar sind.

Der Anteil Aggregate ohne Abgasreinigungs-Massnahme ist im vorliegenden Inventar höher angesetzt als in der BFE-Statistik (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015). Der Grund hierfür ist, dass die Kategorie «anderer» Massnahmen der BFE-Statistik mit Hilfe der Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen weiter verfeinert wurde (da für die Emissionsberechnung die Art der Abgastechnologie bekannt sein muss). In letzterem Datensatz ist jedoch der Anteil «anderer» Massnahmen (ohne die bereits in der BFE-Statistik berücksichtigten) deutlich geringer; die Differenz wird im vorliegenden Inventar der Kategorie «keine Massnahme» zugeordnet – eben auch deswegen, weil in der Emissionsberechnung für Aggregate mit vorhandener, aber unbekannter Art der Abgastechnologie sowieso die Emissionsfaktoren ohne unterstellte Abgasreduktionsmassnahme am angemessensten sind.

Abbildung 10: Verteilung der Abgastechnologien kleiner WKK-Anlagen (Anteile bezogen auf die Anzahl Aggregate).



Grafik INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Luftreinhalte-Fachstellen, eigene Berechnung

4.4. Grosse Anlagen

4.4.1. Brennstoffe

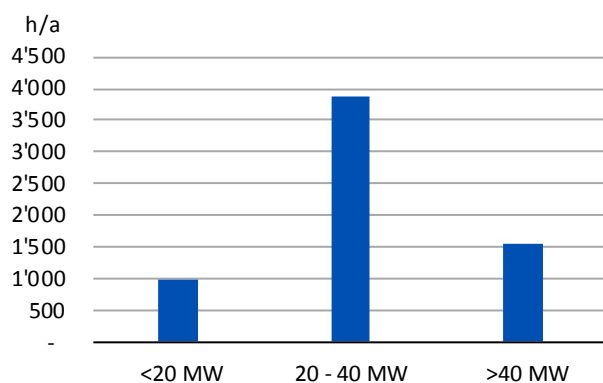
Bei den in grossen Anlagen eingesetzten Gasturbinen stammt 99% der verbrauchten Energie aus Erdgas. Einige Gasturbinen werden jedoch zeitweise mit HEL betrieben.

4.4.2. Betriebsstunden

Im Gesamtdurchschnitt wurde eine grosse Gasturbine oder GuD im Jahr 2014 rund 1700 Stunden betrieben (s. auch Kapitel 4.1). Differenziert nach Grössenklassen zeigt sich, dass die Anlagen mittlerer Grösse (FWL 20 – 40 MW) am längsten betrieben wurden – fast 4000 Stunden.

Die Betriebsstundenzahl 2014 ist aber eine Momentaufnahme. Einerseits schwanken die jährlichen Betriebsstundenzahlen schon nur wegen der geringen Anzahl Anlagen stärker, da die Einzelanlage stark ins Gewicht fällt. Andererseits wird gerade bei den grossen Anlagen die Wirtschaftlichkeit stark beachtet. In dieser Hinsicht scheint 2014 bei einigen Anlagen ein Tiefpunkt zu sein, da die Differenz zwischen Strom- und Erdgaspreis gemäss den Aussagen einiger Betreiber besonders gering und damit ungünstig war. Es ist also bei der Betrachtung einer längeren Zeitreihe tendenziell mit einer höheren durchschnittlichen jährlichen Betriebsstundenzahl zu rechnen.

Abbildung 11: Betriebsstunden grosser Gasturbinen und GuD-Kraftwerke nach Feuerungswärmeleistungsklasse.

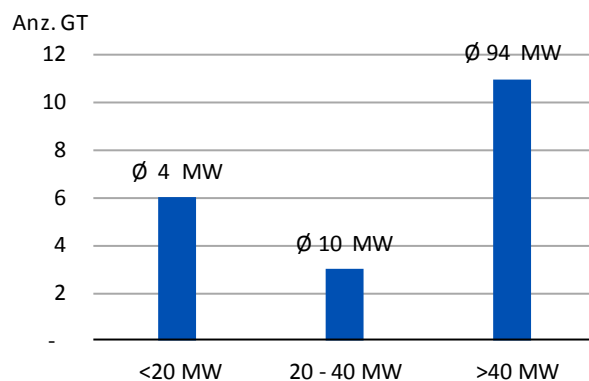


Grafik INFRAS. Quellen: Kantonale Luftreinhalte-Fachstellen, eigene Berechnung

4.4.3. Leistung

Die durchschnittliche Nennleistung (entspricht der elektrischen Leistung) der Gasturbinen und GuD in grossen Anlagen beträgt 54 MW (s. auch Kapitel 4.1). Die meisten (11 von total 20) Gasturbinen gehören der grössten Feuerungswärmeleistungsklasse (>40 MW FWL) an und haben eine durchschnittliche Nennleistung von 94 MW (Abbildung 12). In der FWL-Klasse 20 – 40 MW befinden sich drei Gasturbinen mit einer durchschnittlichen Nennleistung von 10 MW. Sechs Gasturbinen schliesslich gehören der kleinsten FWL-Klasse <20 MW an und haben eine durchschnittliche Nennleistung von 4 MW. Zwischen 65% und 100% dieser Leistung werden auch abgerufen.

Abbildung 12: Leistungsverteilung (Feuerungswärmeleistung) und durchschnittliche Nennleistung grosser Gasturbinen und GuD-Kraftwerke.



Grafik INFRAS. Quellen: Kantonale Luftreinhalte-Fachstellen, eigene Berechnung

4.4.4. Abgastechnologien

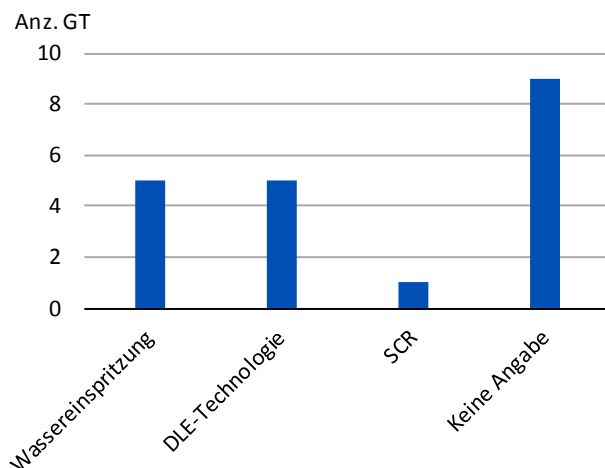
Die meisten Gasturbinen verfügen nicht über eine Abgasnachbehandlung im klassischen Sinn, sondern die Entstehung von Abgasen wird direkt in der Brennkammer minimiert. Dies geschieht entweder durch Wassereinspritzung (angewendet bei mindestens fünf Gasturbinen im Inventar, s. Abbildung 13) oder durch die sogenannte DLE-Technologie. Bei letzterer steht DLE für «dry low emissions»; sie kommt ohne Wassereinspritzung aus, die Reduktion der Emissionen geschieht durch ein mageres vorgemischtes Brennstoff-Luft-Gemisch, eine niedrigere Verbrennungstemperatur und eine optimierte Brennkammer-Geometrie.

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

Bei einigen Anlagen waren keine Angaben zur Abgastechnologie verfügbar, was aber nicht ausschliesst, dass trotzdem beispielsweise die DLE-Technologie zur Anwendung kommt. Die

fehlende Angabe fällt aber bei den grossen Anlagen nicht ins Gewicht, da sowieso pro Anlage individuelle Messwerte vorliegen (vgl. Kapitel 3.5.2).

Abbildung 13: Abgastechnologien grosser Gasturbinen und GuD-Kraftwerke.



Grafik INFRAS. Quellen: Kantonale Luftreinhalte-Fachstellen, eigene Berechnung

5. Energieverbrauch und Emissionen

5.1. Übersicht

Der **Endenergieverbrauch** der stationären Motoren und Gasturbinen im Jahr 2014 beträgt 10.8 PJ. Dies entspricht rund 60% des Energieverbrauchs des Non-Road-Sektors (17.9 PJ im Jahr 2015, BAFU 2015).

Die grossen Anlagen verbrauchen aufgrund ihrer hohen Leistung über 40% der Energie des Sektors – in absoluten Zahlen 4.5 PJ. Die kleinen WKK-Anlagen verbrauchen 2014 rund 6 PJ oder 56% der Endenergie der im Inventar erfassten Anlagen. Auf die Notstromaggregate entfällt mit 0.2 PJ nur ein geringer Anteil von 2% (Tabelle 7, Abbildung 14).

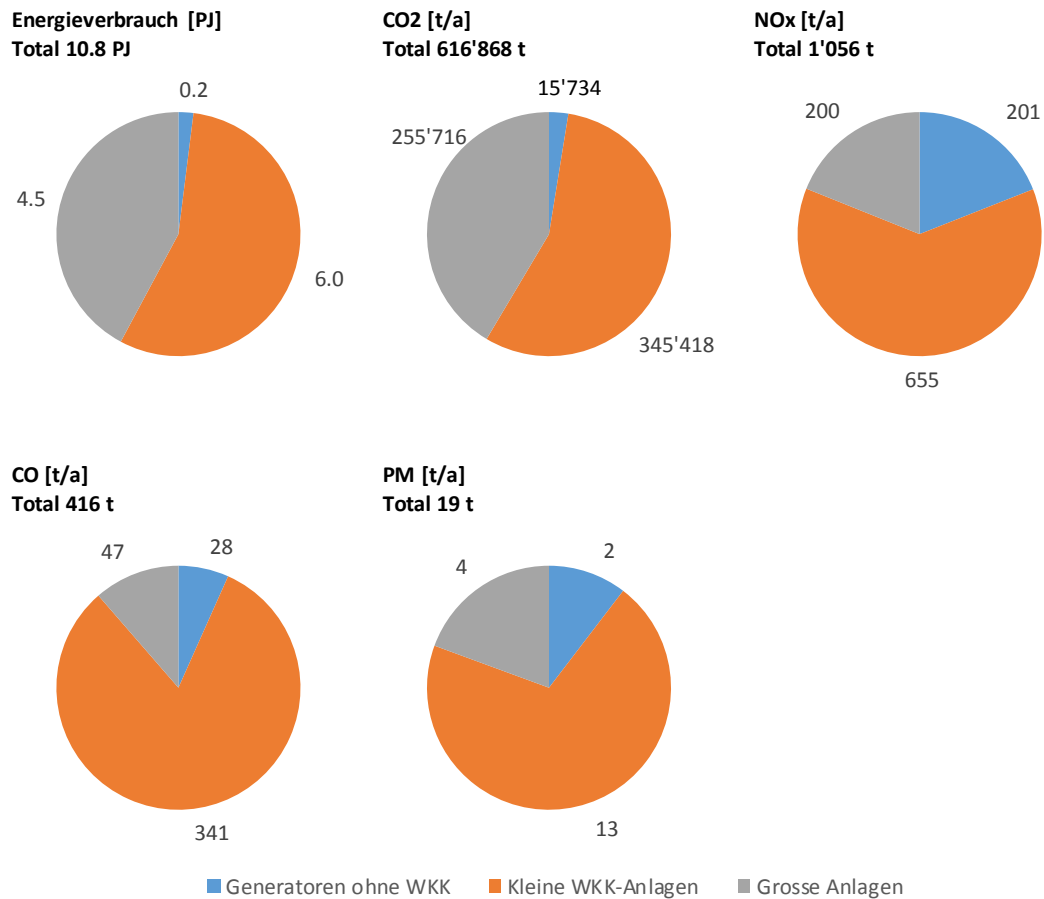
Die **CO₂-Emissionen** der stationären Motoren und Gasturbinen in der Schweiz belaufen sich auf gut 600'000 t/Jahr. Die Verhältnisse zwischen den Anlagentypen sind ähnlich wie beim Endenergieverbrauch – der Anteil der Generatoren ohne WKK fällt jedoch mit 3% etwas höher aus, da die bei den anderen Anlagentypen dominierenden Gasbrennstoffe niedrigere auf den Energiegehalt bezogene CO₂-Emissionen aufweisen als Heizöl.

Tabelle 7: Endenergieverbrauch und Emissionen stationärer Motoren und Gasturbinen nach Anlagentyp.

Anlagentyp	Endenergieverbrauch [PJ]	CO ₂ [t/a]	NO _x [t/a]	CO [t/a]	PM [t/a]
Generatoren ohne WKK	0.2	15'734	201	28	2
Kleine WKK-Anlagen	6.0	345'418	655	341	13
Grosse Anlagen	4.5	255'716	200	47	4
TOTAL	10.8	616'868	1'056	416	19

Tabelle INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

Abbildung 14: Endenergieverbrauch und Betriebsemissionen stationärer Motoren und Gasturbinen im Jahr 2014 nach Anlagentyp.



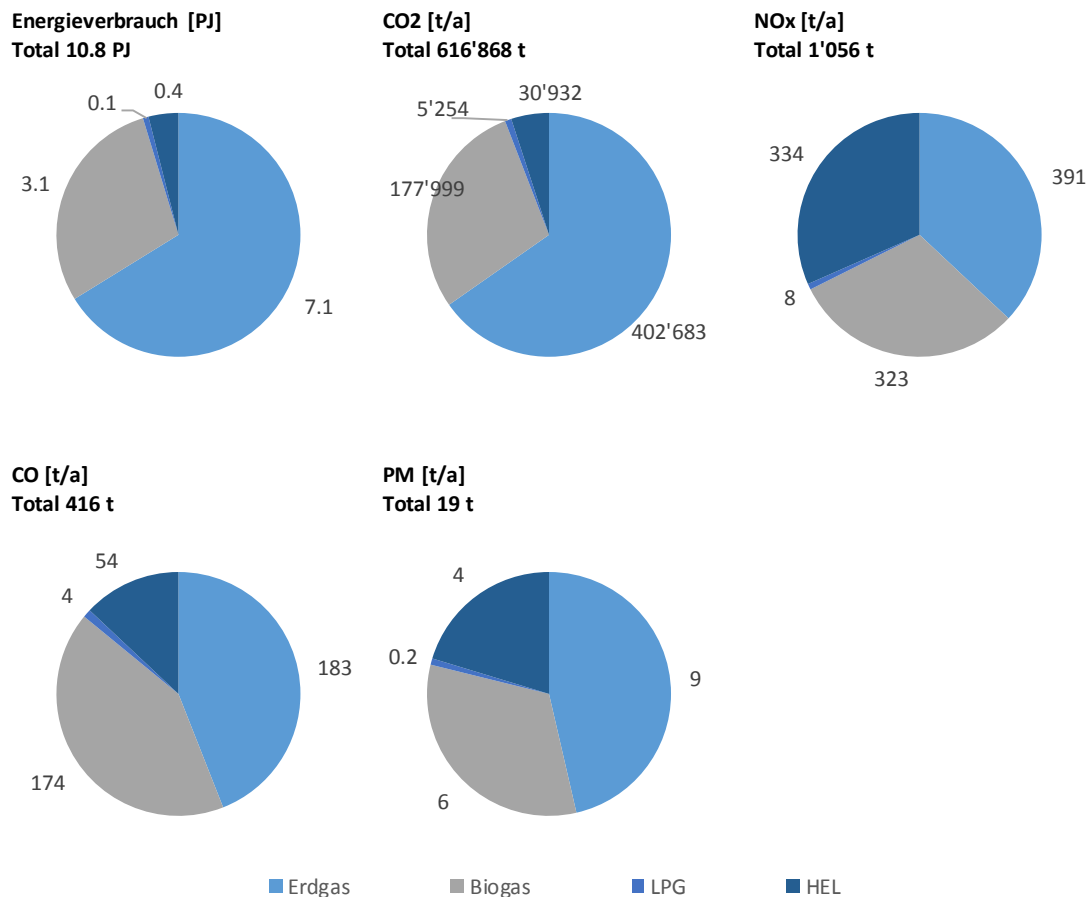
Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

Bei den **NO_x-, CO- und PM-Emissionen** (Gesamtemissionen s. Abbildung 14) sind die kleinen WKK-Anlagen mit Abstand die grössten Emittenten – ihr Anteil beträgt zwischen 64% und 82% der Emissionen des Sektors. Dies liegt daran, dass die grossen Gasturbinen niedrige spezifische Emissionen aufweisen und so bei den Luftschadstoffen verglichen mit ihrem Anteil am Energieverbrauch untervertreten sind. Die Generatoren ohne Abwärmenutzung machen hingegen bei den Emissionen einen überproportionalen Anteil gegenüber ihrem Energieverbrauch aus, da ihre spezifischen Emissionen aufgrund weitgehend fehlender Abgasbehandlung am höchsten sind.

Aufgeschlüsselt nach Brennstoffart (Abbildung 17) ist der Energieverbrauch der Anlagen im Inventar klar dominiert von Gasbrennstoffen. Darunter macht das Erdgas mit 66% des gesamten Endenergieverbrauchs des Inventars den grössten Anteil aus, da dieser Brennstoff sowohl bei den kleinen WKK-Anlagen mit ihren hohen Betriebsstundenzahlen als auch bei den grossen Gasturbinen oft eingesetzt wird. Die Verteilung der CO₂-Emissionen nach Brennstoffart ist ähnlich, obwohl hier HEL einen etwas höheren Anteil als beim Energieverbrauch ausmacht.

Bei den Luftschadstoffen ist HEL für einen jeweils noch höheren Anteil verantwortlich. Speziell bei den Stickoxiden liegen die spezifischen Emissionen von Heizöl im Vergleich zu den Gasbrennstoffen hoch – aus der Verbrennung von HEL resultiert ein fast achtmal höherer Anteil der NO_x-Emissionen, als es der Anteil am Energieverbrauch erwarten lassen würde. Auch beim Feinstaub liegt der Anteil von HEL über fünfmal höher als der Anteil am Energieverbrauch. Aber auch innerhalb der Gasbrennstoffe verdeutlicht Abbildung 17 den höheren Anteil des Biogases an den Luftschadstoff-Emissionen als am Energieverbrauch.

Abbildung 15: Endenergieverbrauch und Betriebsemissionen stationärer Motoren und Gasturbinen im Jahr 2014 nach Brennstoffart.



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

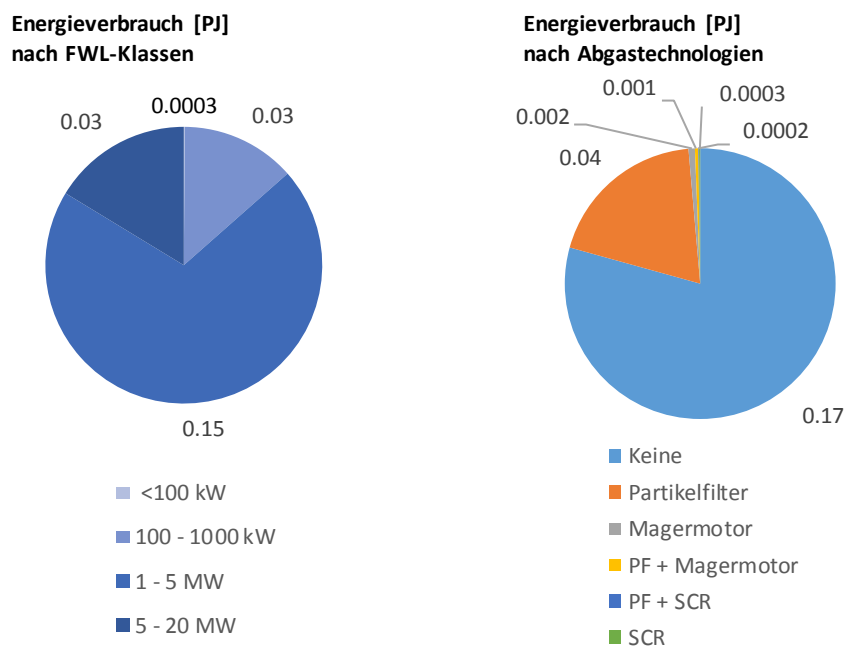
5.2. Generatoren

Der Energieverbrauch der Generatoren ohne Abwärmenutzung beträgt 0.21 PJ im Jahr 2014. Er ist aufgrund der geringen Betriebsstunden verhältnismässig gering – 2% des gesamten Energieverbrauchs des Inventars – aber gemessen am Betriebsstundenanteil von lediglich 1% doch überproportional hoch. Dies ist auf die hohe durchschnittliche Leistung der Generatoren zurückzuführen (durchschnittlich 655 kW Nennleistung im Vergleich zu den 117 kW der kleinen WKK-Anlagen, vgl. Kapitel 4).

Der Endenergieverbrauch nach Feuerungswärmeleistungs-Klassen und nach Abgastechnologie ist in Abbildung 16 ersichtlich. Die anteilmässige Verteilung ist für alle Schadstoffe ausser PM relativ ähnlich wie für den Endenergieverbrauch, da die Emissionsfaktoren aufgrund der

Datenlage nur nach den Abgastechnologien SCR und Partikelfilter unterschieden werden können (s. Annex A2). Anlagen mit SCR, welches die NO_x-Emissionen reduziert, kommen im Bestand sehr selten vor. Dank des Partikelfilters emittieren die damit ausgerüsteten Generatoren nur 2% der Partikelmasse, obwohl sie 19% der Energie verbrauchen.

Abbildung 16: Endenergieverbrauch der Generatoren ohne Abwärmenutzung nach Feuerungswärmeleistungs-Klassen und nach Abgastechnologie.



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

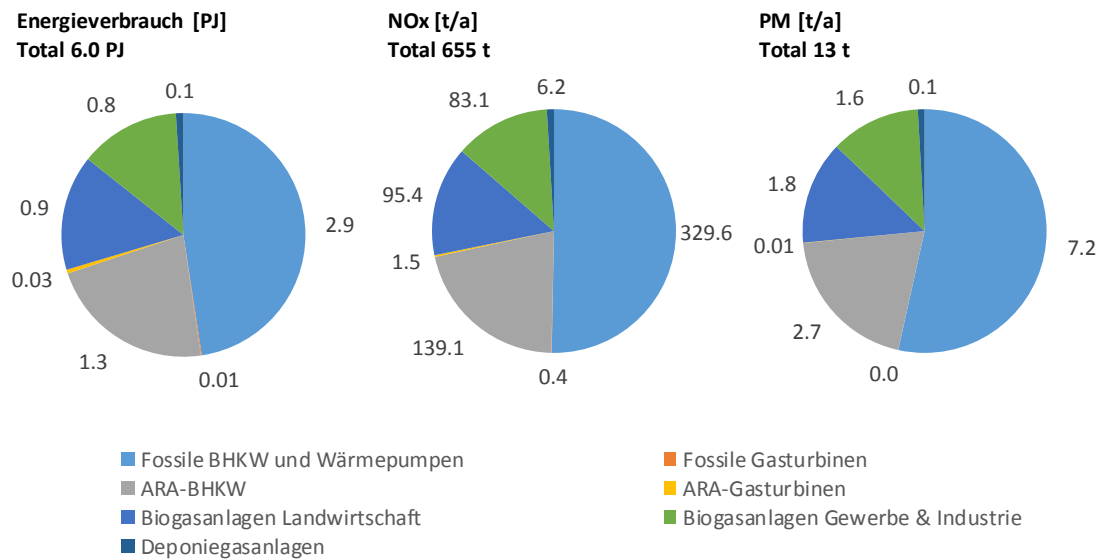
5.3. Kleine WKK-Anlagen

Der Energieverbrauch der kleinen WKK-Anlagen beträgt 6.0 PJ. Sie sind mit 56% des gesamten Energieverbrauchs des Inventars die grösste Verbrauchergruppe unter den stationären Motoren und Gasturbinen. Dies liegt v.a. an ihrer hohen Betriebsstundenzahl – diese macht 98% der gesamten Betriebsstunden des Inventars aus. Dagegen entfällt lediglich 5 % der im Inventar erfassten installierten Leistung nur auf die kleinen WKK-Anlagen.

Gemessen am Energieverbrauch sind die Luftschadstoffemissionen der kleinen WKK-Anlagen überproportional hoch. Sie machen zwischen 64% (NO_x) und 82% (CO) der Gesamtemissionen aus.

Innerhalb der kleinen WKK-Anlagen sind die fossilen BHKW und Wärmepumpen die grössten Verbraucher und Emittenten, gefolgt von den ARA-BHKW und den Biogasanlagen in der Landwirtschaft (Abbildung 17). Bei den Feinstaubemissionen ist der Anteil der fossilen BHKW noch höher als bei den anderen Schadstoffen, weil die HEL- (oder Diesel-)betriebenen Anlagen, sofern sie keinen Partikelfilter aufweisen, höhere spezifische Feinstaubemissionen aufweisen als die mit Gasbrennstoffen betriebenen.

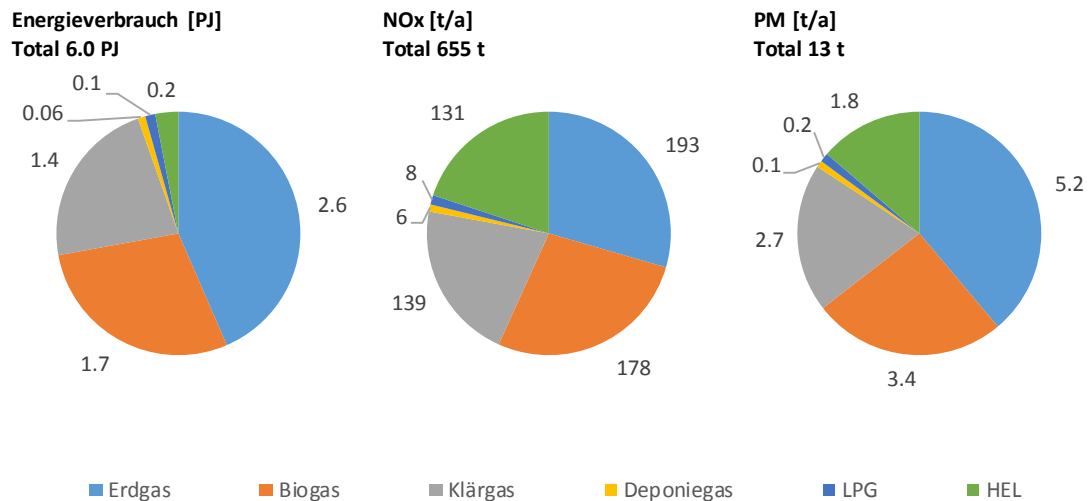
Abbildung 17: Endenergieverbrauch, NO_x- und PM-Emissionen der kleinen WKK-Anlagen nach Anlageart.



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

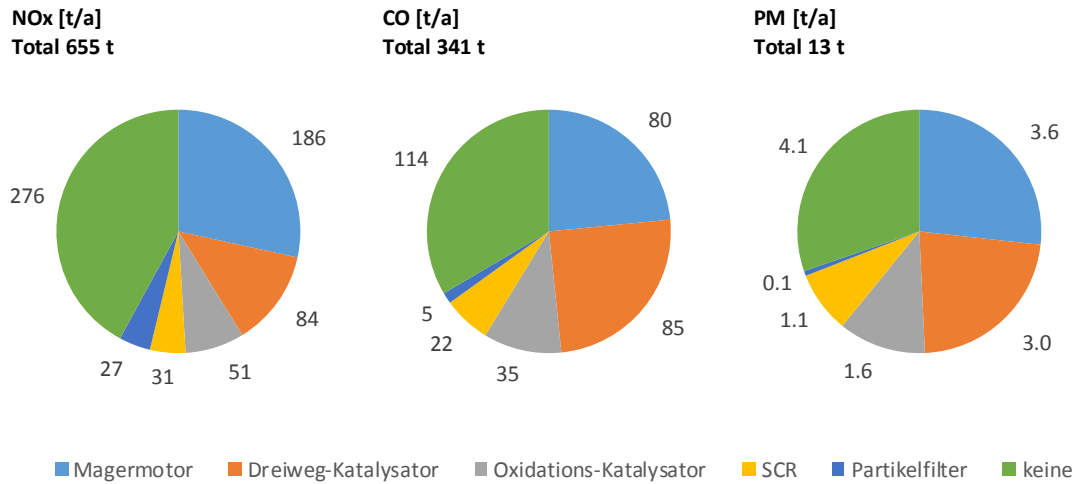
Erdgas ist mit 44% des Energieverbrauchs der meistverwendete Energieträger, gefolgt von Bio- und Klärgas mit 29% respektive 23% (Abbildung 18). Bei den NO_x- und PM-Emissionen weisen die mit HEL betriebenen Anlagen überproportional hohe Emissionen auf: 20% (NO_x) bzw. 14% (PM), bei 3% Anteil am Energieverbrauch.

Abbildung 18: Endenergieverbrauch, NO_x- und PM-Emissionen der kleinen WKK-Anlagen nach Brennstoff.



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

Anlagen ohne Reduktionsmassnahme machen wie erwartet einen überproportionalen Anteil der Emissionen aus (Abbildung 19). Bei einigen Schadstoffen machen die Anlagen mit schadstoffreduzierenden Technologien einen überproportionalen Anteil der Emissionen aus (beispielsweise der Magermotor bei den Stickoxiden). Grund dafür ist, dass die betreffenden Anlagen aufgrund ihres Brennstoffes besonders hohe spezifische Emissionen des betreffenden Schadstoffes aufweisen und daher die Abgastechnologie auch entsprechend benötigen. Dies heisst im Umkehrschluss jedoch auch, dass die betreffende Technologie den Schadstoff nicht im gewünschten Ausmass reduziert. Siehe dazu die entsprechenden Emissionsfaktoren in Annex A2.

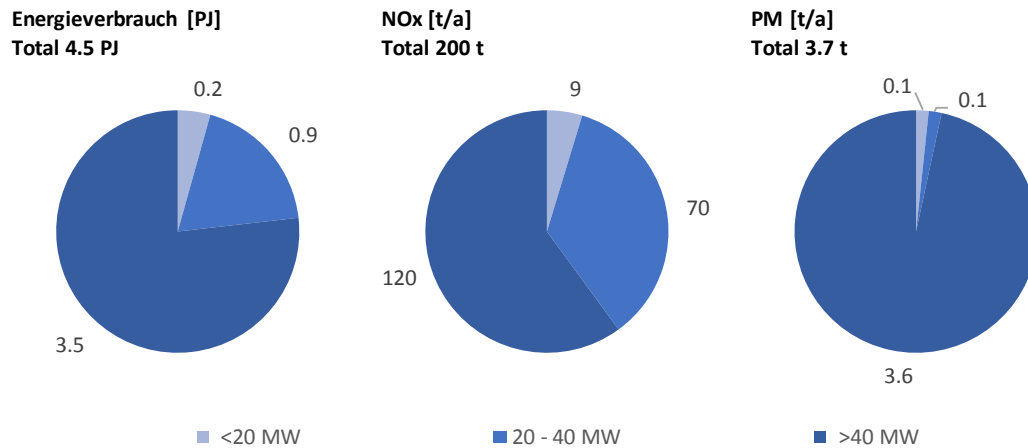
Abbildung 19: NO_x-, CO- und PM-Emissionen der kleinen WKK-Anlagen nach Abgastechnologie.

Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

5.4. Grosse Anlagen

Der Energieverbrauch der grossen Anlagen beträgt 4.5 PJ. Sie sind mit 42% des gesamten Energieverbrauchs des Inventars die zweitgrösste Verbrauchergruppe unter den stationären Motoren und Gasturbinen. Der Grund für den hohen Verbrauch bei einem geringen Bestand von nur 20 Gasturbinen und GuD ist die hohe individuelle Leistung. Innerhalb der grossen Anlagen verbraucht die grösste Leistungskategorie mit >40 MW Feuerungswärmeleistung über drei Viertel der Energie, die kleinste (<20 MW FWL) hingegen nur 4% (Abbildung 20).

Abbildung 20: Endenergieverbrauch, NO_x- und PM-Emissionen der grossen Anlagen nach Feuerungswärmeleistungsklasse.



Grafik INFRAS. Quelle: eigene Berechnung

Bei den NO_x-Emissionen haben vor allem die mittelgrossen Anlagen (20 – 40 MW FWL) einen überproportionalen Anteil am Total der grossen Anlagen. Hauptemittent ist hier eine einzige Anlage mit relativ hohem Energieverbrauch und hohem NO_x-Emissionsfaktor.

Bei den PM-Emissionen verursachen hingegen die grössten Anlagen (>40 MW FWL) den Löwenanteil von 97%. Auch hier ist eine einzige Anlage praktisch für die gesamten Emissionen verantwortlich.

Hinsichtlich Brennstoffen, bei denen HEL nur 1% neben Erdgas mit 99% des Energieverbrauchs ausmacht, stammen 2% der PM- und 5% der CO-Emissionen aus dem Betrieb mit HEL, also ein überproportionaler Anteil. Beim PM sind die höheren spezifischen Emissionen aus HEL gegenüber Gasbrennstoffen der Grund; beim CO stammt ein grosser Anteil aus einer relativ alten Anlage aus den 1980er Jahren.

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 und Berechnungsparameter.

Zu den **Generatoren ohne Abwärmenutzung**, welche fast ausschliesslich als Notstromaggregate eingesetzt werden, ist die Datenlage am dünnsten. Der Gesamtbestand kann nur grob (konservativ) auf 3000 Stück geschätzt werden, es könnten jedoch auch bedeutend mehr sein. Zur Leistungsverteilung liegt nur eine kleine Stichprobe vor – hier besteht zusätzlich die Schwierigkeit, dass viele Einträge in den Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen nicht verwendet werden können, da unklar ist, ob die Generatoren mit HEL oder Diesel betrieben werden (die Leistungsverteilung ist abhängig vom Brennstoff, s. Kapitel 4.2.3). Schliesslich sind auch die Leistungsangaben an sich in den Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen teilweise zu hinterfragen. Beispielsweise zeigen zahlreiche Einträge ein unplausibles Verhältnis von Nenn- zu Feuerungswärmeleistung. Es wird vermutet, dass diese beiden Parameter bei der Deklaration durch die Betreiber mitunter verwechselt werden.

Die (sehr niedrigen) Betriebsstunden erscheinen hingegen belastbar. Für die Verteilung der Abgastechnologien kann eine breitere Stichprobe aus den Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen herangezogen werden, da diese nicht vom Brennstoff abhängig ist.

Bei den **kleinen WKK-Anlagen** besteht mit der BFE-Statistik (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015) eine anerkannte Grundlage von Eckwerten zu Beständen, installierter Leistung und Energieverbrauch. Hier besteht bei der Zuordnung der Abgastechnologien die grösste Unsicherheit, da einerseits deren Verteilung aus der BFE-Statistik nicht in der gleichen Gliederungsebene vorhanden ist wie die restlichen Parameter. Andererseits kann durch die fehlende Segmentierung nach Leistungsklassen (s. Kapitel 3.4.2) die Zuordnung nicht differenziert nach solchen vorgenommen werden, obwohl die Wahrscheinlichkeit gross ist, dass Abgasreinigung tendenziell häufiger bei grösseren Aggregaten eingesetzt wird.

Die Leistungsverteilung kann auch nicht aus den Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen hergeleitet werden, da deren durchschnittliche Nennleistung über das Doppelte der BFE-Statistik beträgt (s. Kapitel 3.4.2). Hierzu tragen mutmasslich dieselben Effekte bei wie oben im Abschnitt zu den Generatoren beschrieben.

Die Betriebsstundenwerte aus den Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen sind hingegen plausibel und weisen zu den entsprechenden Werten aus Rückrechnung der betrieblichen Parameter aus den Zahlen der BFE-Statistik nur geringe Abweichungen auf.

Die Unsicherheiten bezüglich **Emissionsfaktoren** zur Berechnung der Jahresemissionen der **Generatoren und kleinen WKK-Anlagen** können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei direkt aus Messwerten hergeleiteten Emissionsfaktoren ist die Streuung der Messwerte gross. Dies ist jedoch für die meisten 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 viele Kombinationen von Brennstoffen, Maschinentypen, Schadstoffen liegen keine Abgastechnologie-spezifischen Messwerte oder anderen Quellen von Emissionsfaktoren vor. Auch dort, wo Messwerte vorliegen, decken sie meist nur die häufigsten, aber nicht alle in der Population vorkommenden Abgastechnologien ab. Für die Schadstoffe CH₄, NMHC, N₂O und Benzol liegen gar keine Abgastechnologie-spezifischen Emissionsfaktoren vor.

Bei den **grossen Anlagen** besteht eine relativ belastbare Datenlage, was die betrieblichen Parameter, den Energieverbrauch und die NO_x- und CO-Emissionen betrifft. Für die anderen Schadstoffe sind Quellen dagegen rar, und entsprechend grob bleibt die Schätzung der Jahresemissionen. Bei den grossen Anlagen ist zudem mit starken jährlichen Schwankungen zu rechnen; 2014 scheint ein Jahr mit eher tiefem Energieverbrauch gewesen zu sein.

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

- Mit dem BFE könnte eine Vereinbarung getroffen werden, dass bei der Datenerhebung für die Statistik der thermischen Stromproduktion künftig die Verwendung für das vorliegende Emissionsinventar als Verwendungszweck mitdeklariert wird. So könnten die detaillierten Daten für das Emissionsinventar verwendet werden, und der Datenschutz bliebe gewährleistet.
- Die kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen sollten im Rahmen ihrer Möglichkeiten darauf achten, die Zuverlässigkeit der Angaben in ihren Datenbeständen weiter zu verbessern. Massnahmen dazu könnten etwa Warnfunktionen in den Applikationen zur Datenerfassung sein - beispielsweise bei der Eingabe einer unplausiblen Kombinationen von Nenn- und Feuerungs-wärmeleistung – oder die Schulung der MitarbeiterInnen, um bei den Emissionskontrollen vermehrt auf Brennstoffart, Leistungsangaben und Abgastechnologien zu achten und die entsprechenden Angaben ggf. in den Daten anzupassen.
- Emissionsmessungen sind, wo immer möglich, zu fördern. Wo besonders grosse Lücken bestehen, ist in Kapitel 3.3.2, 3.5 und in den obenstehenden Abschnitten nachzulesen. Wichtig ist die Differenzierung der Messungen nach Abgastechnologien.

Bei Messprogrammen lohnt sich überdies internationale Zusammenarbeit besonders, da durch den gegenseitigen Austausch von Messdaten Synergien genutzt werden können. Ein entsprechendes Netzwerk besteht bereits für das Strassenverkehrs-Emissionsinventar, für

das Non-Road-Inventar befindet es sich im Aufbau. Die Schweiz ist eine treibende Kraft hinter dem Aufbau solcher Kooperationen.

6.2. Vergleich mit anderen Quellen

Das vorliegende Emissionsinventar kann mit zwei bestehenden Quellen verglichen werden:

- mit der BFE-Statistik zur thermischen Stromproduktion und WKK in der Schweiz (jährlich aufdatiert, Kaufmann und Gülden Sterzl 2015). Diese dient direkt als Datenquelle für das vorliegende Inventar, wird aber mit weiteren Angaben ergänzt, um Treibhausgas- und Luftschadstoffemissionen berechnen zu können;
- mit der EMIS-Datenbank des BAFU, welche als Grundlage für die offizielle Berichterstattung gegenüber der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zum Klimawandel (UNFCCC) sowie der Genfer Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) dient. Die Aufdatierung dieser Datenbank mit detaillierteren Emissionsgrundlagen zu den stationären Motoren und Gasturbinen ist einer der Zwecke des vorliegenden Inventars.

6.2.1. BFE-Statistik der thermischen Stromproduktion und WKK

Beim Vergleich mit der BFE-Statistik (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015) muss nach Anlagentyp differenziert werden:

- Die Generatoren ohne Abwärmenutzung sind in der BFE-Statistik nicht enthalten.
- Bei den kleinen WKK-Anlagen basiert das vorliegende Inventar zu grossen Teilen auf der BFE-Statistik. Die Definition dieser Anlagen wurde übernommen. Bestand, installierte Leistung und Energieverbrauch sind identisch. Die Verteilung der Abgastechnologien im vorliegenden Inventar basiert teilweise auf der BFE-Statistik, wurde aber mit Angaben aus den Daten der kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen ergänzt. Ausserdem werden «andere» (nicht näher bezeichnete) Abgastechnologien wie «keine» behandelt, da für die Emissionsberechnung die Art der Massnahme bekannt sein muss.
- Bei den grossen Anlagen umfasst das vorliegende Inventar nur eine Teilmenge der in der BFE-Statistik erfassten Anlagen. Artikel 82-83 im Anhang 2 der LRV, welche die Abgrenzung des Inventars vorgibt, schliesst Dampfturbinen aus. Letztere machen die Mehrheit der grossen Anlagen in der BFE-Statistik aus (darunter zahlreiche KVA), sind aber hier nicht berücksichtigt.

6.2.2. EMIS-Datenbank

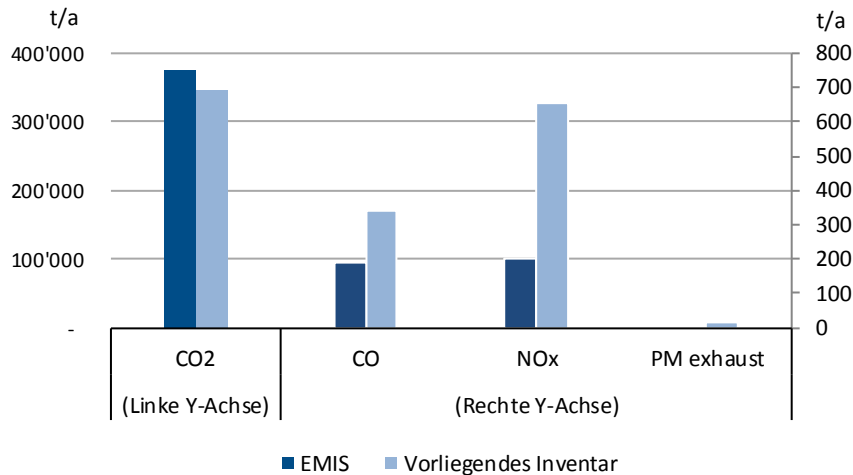
Auch die EMIS-Datenbank enthält bisher die stationären Generatoren ohne Abwärmenutzung nicht. Als Gefässe für die grossen Anlagen besteht der EMIS-Prozess «GuD Gas»; dieser enthält aber keine Aktivitäten für das Jahr 2014. Möglicherweise sind einige der grossen Anlagen im EMIS-Prozess «Heizkessel Fernwärme Gas» enthalten – dieser umfasst, wie der Name besagt, aber v.a. Heizkessel und Dampfturbinen, welche im vorliegenden Inventar nicht enthalten sind. Das heisst, dass sich auch der Datenbestand in EMIS v.a. mit den kleinen WKK-Anlagen im vorliegenden Inventar deckt.

Der Energieverbrauch der entsprechenden Prozesse in EMIS beträgt 5.3 PJ für das Jahr 2014 und liegt damit etwas unter den 6.0 PJ gemäss Kaufmann und Gülden Sterzl (2015) und dem vorliegenden Inventar. Die Differenz kann aber gut nur auf die Tatsache zurückgehen, dass der Datenbestand in EMIS noch nicht mit der neusten Ausgabe der BFE-Statistik aufdatiert wurde, denn auch EMIS greift für die kleinen WKK-Anlagen indirekt (via Gesamtenergiestatistik) auf die BFE-Statistik als Datenquelle zurück.

Die CO₂-Emissionen der kleinen WKK-Anlagen liegen gemäss EMIS trotz des geringeren Energieverbrauchs leicht über der Angabe des vorliegenden Inventars (Abbildung 21). Der Grund dafür ist, dass in EMIS für Biogas aus den Vergärungsprozessen in Landwirtschaft sowie Gewerbe und Industrie ein fast doppelt so hoher Emissionsfaktor wie für die restlichen Bio- und Klärgasprozesse hinterlegt ist. Der Grund dafür ist, dass bei diesen Prozessen der CO₂-Anteil im ungereinigten Biogas (rund 35%), der mit in den Motor geht, aber nicht verbrannt wird und anschliessend entweicht, ebenfalls im Emissionsfaktor mit enthalten ist, obwohl das entsprechende CO₂ Resultat des vorangehenden Vergärungs- und nicht des Verbrennungsprozesses ist.

Die Emissionen der Schadstoffe NO_x, CO und PM hingegen liegen gemäss dem vorliegenden Inventar deutlich über denjenigen des aktuellen EMIS-Datenbestandes, da nicht nur der Energieverbrauch höher liegt, sondern auch höhere Emissionsfaktoren angewendet werden (Abbildung 21).

Abbildung 21: Vergleich der CO₂-, NO_x- und PM-(Abgas)-Emissionen der kleinen WKK-Anlagen gemäss EMIS (Datenbestand Anfang 2016) und dem vorliegenden Inventar.



Grafik INFRAS. Quelle: EMIS, eigene Berechnung

6.3. Empfehlungen für die Erstellung einer Zeitreihe

Empfehlungen für das Vorgehen bei der Erstellung einer Zeitreihe aus dem vorliegenden Standbericht (beispielsweise 1990 – 2050), ähnlich den bestehenden Emissionsinventaren des Strassenverkehrs und des Non-Road-Sektors, sind in den folgenden Abschnitten festgehalten.

6.3.1. Rückschreibung

Für die Rückschreibung bis zum Start-Jahr (z.B. 1990) können ähnliche Quellen wie für den vorliegenden Bericht berücksichtigt werden:

- Kleine WKK-Anlagen: Hierzu liefert die WKK-Statistik des BFE eine historische Zeitreihe, welche bis 1990 zurückreicht;
- Grosse Anlagen: Einerseits sind von den meisten bestehenden Anlagen die Baujahre bekannt. Da früher jedoch mehr grosse Anlagen in Betrieb waren, müssen die vor 2014 stillgelegten Anlagen zusätzlich individuell recherchiert werden;
- Generatoren: Die Auswertungen der Verwendungsverpflichtungen für HEL der EZV nach Branche sind auch für frühere Zeitstände verfügbar (allerdings muss geklärt werden, wie weit diese Auswertungen zurückreichen);
- Für die Anlagen unter NFR-Code 1 A 1 a (öffentliche Stromproduzenten) liefert die Differenz Brennstoff- und Strompreise einen Hinweis auf die Wirtschaftlichkeit der Stromproduktion

aus den entsprechenden Brennstoffen (je höher, desto höher sind tendenziell Betriebsstunden und Brennstoffverbrauch). Dies kann Hinweise für die Rekonstruktion der Entwicklung der Betriebsstundenzahlen der entsprechenden Anlagen liefern.

6.3.2. Fortschreibung

Für die Fortschreibung in die Zukunft (z.B. bis 2050) können folgende Grundlagen verwendet werden:

- Annahmen zur Bestandesentwicklung aufgrund Neuzugängen, Altersverteilung und Ausserbetriebnahmen;
- Gesetzliche Vorgaben wie zukünftige Schadstoff-Grenzwerte, oder Lenkungsabgaben aufgrund Klimaabkommen;
- Annahmen hinter den Energieperspektiven 2050, sowie allfällige neuere Publikationen zur Energiestrategie 2050; darin enthalten sind die politischen Vorgaben bzw. Erwartungen zur Energiewende;
- Prognosen zu Brennstoff- und Strompreisen, um die Wirtschaftlichkeit der Stromproduktion aus Brennstoffen abzuschätzen;
- Fortschreiben (und Abflachen) bisheriger Trends.

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 im Jahr 2014 her.

Von den drei enthaltenen Anlagentypen ist die erste, die heizölbetriebenen Generatoren ohne Abwärmenutzung – faktisch gleichzusetzen mit Notstromaggregaten – bisher in keiner Statistik oder Emissionsinventar enthalten. Nur die dieselbetriebenen Generatoren sind bisher im Non-Road-Emissionsinventar erfasst. Die beiden anderen Anlagentypen, die kleinen WKK-Anlagen und die grossen Gasturbinen und GuD, sind zwar hinsichtlich Energieverbrauch in der BFE-Statistik zur thermischen Stromproduktion (Kaufmann und Gülden Sterzl 2015) erfasst; teilweise existieren auch in der EMIS-Datenbank des BAFU bereits grobe Schätzungen zu den Emissionen. Das vorliegende Inventar liefert jedoch auch hierzu erstmals eine detailliertere, grundsätzlich einem Bottom-Up-Ansatz folgende Berechnung.

Die Qualität der Datengrundlagen variiert stark nach Anlagentyp und Berechnungsparameter. Bei den Generatoren ohne Abwärmenutzung ist vor allem der Bestand und die Leistungsverteilung unsicher. Bei den kleinen WKK-Daten beruhen die Eckwerte auf einer anerkannten, jährlich aufdatierten Statistik; der Detaillierungsgrad könnte jedoch gesteigert und die Unsicherheit reduziert werden, wenn einerseits die detaillierten Daten der BFE-Statistik verfügbar wären und andererseits die Daten der kantonalen Fachstellen in höherer Zuverlässigkeit vorliegen würden.

Für zukünftige Updates des Inventars sollten die am Schluss von Kapitel 6.1 aufgelisteten Empfehlungen zur Verbesserung der Datenqualität berücksichtigt werden, welche sich an das BAFU, das BFE und die kantonalen Luftreinhalte-Fachstellen richten.

Für die Erstellung einer Zeitreihe aus dem bestehenden, auf das Jahr 2014 beschränkten Standbericht können die Empfehlungen aus Kapitel 6.3 berücksichtigt werden.

Annex

A1. Brennstoffeigenschaften

Tabelle 8: Eigenschaften der Brennstoffe.

Brennstoff	Dichte	Einheit Dichte	Unterer Heiz- wert [MJ/kg]	CO ₂ - Emis- sions- faktor [g/MJ]	Abgas- volu- men- strom bei 5% O ₂ -Ge- halt [m ³]	Abgas- volu- men- strom bei 15% O ₂ -Ge- halt [m ³]	Aus- gangs- menge Abgas- volu- men- strom
Heizöl Extraleicht (HEL)	0.839	kg/l	42.9	73'700	14.00	38	1 kg
Erdgas	0.795	kg/Nm ³	45.7	56'700	11.50	31	1 m ³
Biogas, Klärgas, Depo- niefgas	1.200	kg/Nm ³	20.2	56'450	7.67	21	1 m ³
LPG (Liquefied petroleum gas)	0.540	kg/l	46.0	65'500	n/a	80.80	1 m ³

Tabelle INFRAS. Quellen: HBEFA 3.2, BAFU 2016, BFE 2016, LHA 2008a, LHA 2008b, <http://www.balticbiogasbus.eu/web/about-biogas.aspx>

A2. Verbrauchs- und Emissionsfaktoren

Tabelle 9: CO-, NO_x- und PM-Emissionsfaktoren stationärer Motoren nach Brennstoff (blaue Balken), Schadstoff und Abgastechnologie.

Schadstoff	Abgastechnologie	EFA [g/GJ]	Quelle
Biogas (inkl. Klär- und Deponiegas)			
CO	Alle	56.0	EMEP/EEA 2016b, Tab. 3-40
	SCR	119.2	Wehrli 2008
NO _x	Magermotor	70.0	Ecoinvent 2010
	Oxidations-Katalysator	63.0	Wehrli 2008
	Restliche und Keine	135.0	EMEP/EEA 2016b
	Alle	2.0	EMEP/EEA 2016b
Erdgas			
CO	Oxidations-Katalysator	27.0	Wehrli 2008
	Restliche	56.0	EMEP/EEA 2016b
	Keine	56.0	EMEP/EEA 2016b
NO _x	SCR	50.0	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
	Oxidations-Katalysator	69.5	Wehrli 2008
	Dreiweg-Katalysator	50.2	Wehrli 2008
	Partikelfilter	135.0	EMEP/EEA 2016b
	Magermotor	70.0	Ecoinvent 2010
	Keine	135.0	EMEP/EEA 2016b
	Alle	2.0	EMEP/EEA 2016b
HEL			
CO	Alle	130.0	EMEP/EEA 2016b
NO _x	SCR	70.0	Mittelwert kt. Fachstellen für Luftreinhaltung, Wehrli 2008, Ecoinvent 2010
	Restliche und Keine	942.0	EMEP/EEA 2016b
PM	Partikelfilter	1.0	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
	Restliche und Keine	11.4	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
LPG			
CO	Alle	56.0	EMEP/EEA 2016b
	SCR	50.0	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
	Oxidations-Katalysator	69.5	Wehrli 2008
NO _x	Dreiweg-Katalysator	50.2	Wehrli 2008
	Partikelfilter	135.0	EMEP/EEA 2016b
	Magermotor	70.0	Ecoinvent 2010
	Keine	135.0	EMEP/EEA 2016b
	Alle	2.0	EMEP/EEA 2016b

Tabelle INFRAS.

Tabelle 10: CO-, NO_x- und PM-Emissionsfaktoren von Gasturbinen nach Brennstoff (blaue Balken) und Schadstoff.

Schadstoff	EFA [g/GJ]	Quelle
Biogas (inkl. Klär- und Deponiegas)		
CO	4.8	EMEP/EEA 2016b
NO _x	48.0	EMEP/EEA 2016b
PM	0.2	EMEP/EEA 2016b
CNG		
CO	4.8	EMEP/EEA 2016b
NO _x	48.0	EMEP/EEA 2016b
PM	0.2	EMEP/EEA 2016b
HEL		
CO	2.6	EMEP/EEA 2016b
NO _x	83.0	EMEP/EEA 2016b
PM	9.5	EMEP/EEA 2016b
LPG		
CO	4.8	EMEP/EEA 2016b
NO _x	48.0	EMEP/EEA 2016b
PM	0.2	EMEP/EEA 2016b

Tabelle INFRAS.

Tabelle 11: Emissionsfaktoren nicht regulierter Schadstoffe stationärer Motoren nach Brennstoff (blaue Balken) und Schadstoff.

Motor	EFA [g/GJ]	Quelle
Biogas (inkl. Klär- und Deponiegas)		
Benzol	0.40	EMIS (Stand 2016) für 2014
CH ₄	12.78	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
HC	101.78	Summe CH ₄ + NMHC
N ₂ O	5.00	Ecoinvent 2010
NMHC	89.00	EMEP/EEA 2016b
CNG		
Benzol	0.40	EMIS (Stand 2016) für 2014
CH ₄	12.78	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
HC	101.78	Summe CH ₄ + NMHC
N ₂ O	5.00	Ecoinvent 2010
NMHC	89.00	EMEP/EEA 2016b

HEL		
Benzol	0.39	BAFU 2015
CH ₄	2.28	BAFU 2015
HC	52.28	Summe CH ₄ + NMHC
N ₂ O	3.14	EMEP/EEA 2016c
NMHC	50.00	EMEP/EEA 2016b
LPG		
Benzol	-	BAFU 2015
CH ₄	12.78	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
HC	101.78	Summe CH ₄ + NMHC
N ₂ O	5.00	Ecoinvent 2010
NMHC	89.00	EMEP/EEA 2016b

Tabelle INFRAS.

Tabelle 12: Emissionsfaktoren nicht regulierter Schadstoffe für Gasturbinen, geordnet nach Brennstoff (blaue Balken) und Schadstoff.

Schadstoff	EFA [g/GJ]	Quelle
Biogas (inkl. Klär- und Deponiegas)		
Benzol	0.01	EPA 1995
CH ₄	3.36	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
HC	4.96	Summe CH ₄ + NMHC
N ₂ O	1.29	EPA 1995
NMHC	1.60	EMEP/EEA 2016b
CNG		
Benzol	0.01	EPA 1995
CH ₄	3.36	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
HC	4.96	Summe CH ₄ + NMHC
N ₂ O	1.29	EPA 1995
NMHC	1.60	EMEP/EEA 2016b
HEL		
Benzol	0.02	EPA 1995
CH ₄	3.36	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
HC	3.54	Summe CH ₄ + NMHC
N ₂ O	1.29	EPA 1995
NMHC	0.18	EMEP/EEA 2016b
LPG		
Benzol	0.01	EPA 1995
CH ₄	3.36	Messwerte kt. Fachstellen für Luftreinhaltung
HC	4.96	Summe CH ₄ + NMHC
N ₂ O	1.29	EPA 1995
NMHC	1.60	EMEP/EEA 2016b

Tabelle INFRAS.

A3. Mengengerüste

Tabelle 13: Bestand und betriebliche Parameter der Generatoren ohne Abwärmenutzung.

FWL-Klasse	Anz. Aggregat	Betr.Std. pro Aggregat	Betr.Std. Total [1000 h]	Nennleistung pro Aggregat [kW]	Nennleistung Total [MW]	Lastfaktor [%]	Spez. Verbrauch [MJ/kWh]
<100 kW	89	25	2.2	18	2	70%	9.60
100 - 1000 kW	1'000	25	25.0	170	170	70%	9.60
1 - 5 MW	1'822	16	29.2	765	1'394	70%	9.60
5 - 20 MW	89	13	1.2	4'481	398	70%	9.60
TOTAL / Ø	3'000	19	57.5	655	1'964	70%	9.60

Tabelle INFRAS. Quellen: Kantonale Lufthygienefachstellen, EZV, eigene Berechnung

Tabelle 14: Verteilung der Abgastechnologien bei Generatoren ohne Abwärmenutzung (in % des Bestandes).

Abgastechnologie	<100 kW	100 - 1000 kW	1 - 5 MW	5 - 20 MW
Keine	98%	80%	80%	67%
Partikelfilter	3%	18%	18%	33%
Magermotor	0%	1%	1%	0%
PF + Magermotor	0%	0%	0%	0%
PF + SCR	0%	0%	0%	0%
SCR	0%	0%	0%	0%
TOTAL	100%	100%	100%	100%

Tabelle INFRAS. Quellen: Kantonale Lufthygienefachstellen, EZV, eigene Berechnung

Tabelle 15: Bestand und betriebliche Parameter der kleinen WKK-Anlagen.

Anlageart	Brennstoff	Anz. Aggregate	Betr.-Std. pro Aggregat	Betr.-Std. Total [1000 h]	Nennleistung pro Aggregat [kW]	Nennleistung Total [MW]	Lastfaktor [%]	Spez. Verbrauch [MJ/kWh]
ARAs - Gasturbinen	Klärgas	6	5'472	33	88	0.53	90%	11.75
ARAs - Motoren	Erdgas	2	4'795	7	82	0.13	90%	10.50
ARAs - Motoren	HEL	1	4'795	2	82	0.04	90%	10.50
ARAs - Motoren	Klärgas	354	4'795	1'698	82	29.22	90%	10.50
ARAs - Motoren	LPG	1	4'795	4	82	0.07	90%	10.50
Biogasanlagen G+l	Biogas	63	5'815	366	258	16.27	90%	9.43
Biogasanlagen LW	Biogas	102	7'340	749	143	14.61	90%	9.55
Deponiegas-Anlagen	Deponiegas	7	3'191	22	286	2.00	90%	10.42
Fossile GT	Erdgas	5	1'472	7	94	0.47	90%	11.80
Fossile WKK	Erdgas	680	3'838	2'610	116	78.88	90%	9.57
Fossile WKK	HEL	49	3'728	182	116	5.67	90%	9.57
Fossile WKK	LPG	20	3'952	77	116	2.27	90%	9.57
TOTAL / Ø		1'288	4'470	5'759	117	150	90%	9.85

Tabelle INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Lufthygienefachstellen, eigene Berechnung

Tabelle 16: Verteilung der Abgastechnologien bei kleinen WKK-Anlagen nach verwendetem Brennstoff (in % des Bestandes).

Abgastechnologie	Erdgas	Biogas	LPG	HEL	Andere fossile Brennstoffe	Andere biogene Brennstoffe
Magermotor	1%	8%	19%	3%	19%	19%
Dreiweg-Katalysator	30%	60%	21%	0%	21%	21%
Oxidations-Katalysator	13%	7%	12%	0%	12%	12%
NOx-Speicherkatalysator	0%	2%	1%	0%	1%	1%
SCR	36%	6%	10%	12%	10%	10%
OxiKat + SCR	0%	2%	1%	0%	1%	1%
Partikelfilter	0%	0%	2%	9%	2%	2%
keine	19%	14%	34%	77%	34%	34%
TOTAL	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabelle INFRAS. Quellen: Kaufmann und Gülden Sterzl 2015, kantonale Lufthygienefachstellen, eigene Berechnung

Tabelle 17: Bestand und betriebliche Parameter der grossen Anlagen.

FWL-Klasse	Anz. Gasturbinen	Betr.Std. pro Gasturbine	Betr.Std. Total [1000 h]	Nennleistung pro Gasturbine [MW]	Nennleistung Total [MW]	Lastfaktor [%]	Spez. Verbrauch [MJ/kWh]
<20 MW	6	979	5.87	4.0	24	90%	9.81
20 - 40 MW	3	3'867	11.60	9.7	29	87%	8.48
>40 MW	11	1'545	16.99	64.0	704	67%	6.32
TOTAL	20	1'723	34.47	37.9	757	67%	6.32

Tabelle INFRAS. Quellen: Kantonale Lufthygienefachstellen, eigene Berechnung

A4. Energieverbrauch und Emissionen

Tabelle 18: Endenergieverbrauch und Emissionen der Generatoren ohne Abwärmenutzung.

FWL-Klasse	Energieverbrauch [TJ]	CO ₂ [t/a]	NO _x [t/a]	CO [t/a]	PM [t/a]
<100 kW	0.3	20	0.2	0.03	0.003
100 - 1000 kW	29	2'102	26	3.6	0.30
1 - 5 MW	150	11'047	141	19.5	1.41
5 - 20 MW	35	2'564	33	4.5	0.28
TOTAL	213	15'734	201	27.7	1.99

FWL-Klasse	CH ₄ [t/a]	N ₂ O [t/a]	NMHC [t/a]	C ₆ H ₆ [t/a]
<100 kW	0.001	0.001	0.013	0.0001
100 - 1000 kW	0.06	0.09	1.40	0.01
1 - 5 MW	0.34	0.47	7.49	0.06
5 - 20 MW	0.08	0.11	1.74	0.01
TOTAL	0.48	0.67	10.65	0.08

Tabelle INFRAS. Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 19: Endenergieverbrauch und Emissionen der kleinen WKK-Anlagen.

Anlageart	Brennstoff	Ener- gie- ver- brauch [TJ]	CO ₂ [t/a]	NO _x [t/a]	CO [t/a]	PM [t/a]
ARAs - Gasturbinen	Klärgas	31	1'739	1.5	0.15	0.006
ARAs - Motoren	CNG	6	323	0.4	0.30	0.011
ARAs - Motoren	HEL	2	141	1.4	0.25	0.019
ARAs - Motoren	Klärgas	1'324	75'088	137.1	74.16	2.649
ARAs - Motoren	LPG	3	193	0.3	0.17	0.006
Biogasanlagen G+l	Biogas	803	45'511	83.1	44.95	1.605
Biogasanlagen LW	Biogas	922	52'267	95.4	51.62	1.844
Deponiegas-Anlagen	Deponiegas	60	3'395	6.2	3.35	0.120
Fossile GT	CNG	7	416	0.4	0.04	0.001
Fossile WKK	CNG	2'608	147'869	192.5	137.63	5.216
Fossile WKK	HEL	182	13'417	129.2	23.67	1.822
Fossile WKK	LPG	77	5'061	7.9	4.33	0.155
TOTAL		6'024	345'418	655.2	340.60	13.454

Anlageart	Brennstoff	CH ₄ [t/a]	N ₂ O [t/a]	NMHC [t/a]	C ₆ H ₆ [t/a]
ARAs - Gasturbinen	Klärgas	0.10	0.04	0.05	0.000
ARAs - Motoren	CNG	0.07	0.03	0.51	0.002
ARAs - Motoren	HEL	0.004	0.01	0.10	0.001
ARAs - Motoren	Klärgas	16.93	6.62	117.86	0.53
ARAs - Motoren	LPG	0.04	0.01	0.26	-
Biogasanlagen G+l	Biogas	10.26	4.01	71.44	0.32
Biogasanlagen LW	Biogas	11.78	4.61	82.04	0.37
Deponiegas-Anlagen	Deponiegas	0.77	0.30	5.33	0.02
Fossile GT	CNG	0.02	0.01	0.01	0.00
Fossile WKK	CNG	33.34	13.04	232.10	1.04
Fossile WKK	HEL	0.41	0.57	9.10	0.07
Fossile WKK	LPG	0.99	0.39	6.88	-
TOTAL		74.72	29.64	525.68	2.36

Tabelle INFRAS. Quelle: Eigene Berechnung

Tabelle 20: Endenergieverbrauch und Emissionen der grossen Anlagen.

FWL-Klasse	Energie- verbrauch [TJ]	CO ₂ [t/a]	NO _x [t/a]	CO [t/a]	PM [t/a]
<20 MW	197	11'228	9	2.7	0.062
20 - 40 MW	858	48'234	70	9.1	0.06
>40 MW	3'493	196'253	120	35.5	3.59
TOTAL	4'548	255'716	200	47.3	3.72

FWL-Klasse	CH ₄ [t/a]	N ₂ O [t/a]	NMHC [t/a]	C ₆ H ₆ [t/a]
<20 MW	0.098	0.020	0.286	0.0788
20 - 40 MW	0.43	0.09	1.28	0.34
>40 MW	1.74	0.35	5.58	1.40
TOTAL	2.27	0.45	7.14	1.82

Tabelle INFRAS. Quelle: Eigene Berechnung

Glossar

BAFU	Bundesamt für Umwelt
BFE	Bundesamt für Energie
BHKW	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).
CLRTAP	Genfer Konvention über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (Convention on long-range transboundary air pollution)
CNG	Komprimiertes Erdgas (compressed natural gas)
Dampfmaschine	Grosse Anlage zur thermischen Stromerzeugung, welche über die Verbrennung ausserhalb eines Kessels Hitze und Dampf erzeugt.
EMEP/EEA	Programm zur Luftreinhaltung (European Monitoring and Evaluation Programme der europäischen Umweltagentur (European Environment Agency))
EMIS	Emissionsdatenbank des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)
ESTI	Eidgenössisches Starkstrominspektorat
EZV	Eidgenössische Zollverwaltung
FWL	Feuerungswärmeleistung (FWL): Der auf den unteren Heizwert bezogene Wärmehalt des Brennstoffs, der einer Feuerungsanlage im Dauerbetrieb je Zeiteinheit zugeführt werden kann.
GuD	Gas-, und Dampf-Kombikraftwerke für die Strom-/Wärmeproduktion.
HEL	Heizöl extra-leicht
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
Lastfaktor	Auslastung einer Anlage, kann aus der durchschnittlichen Leistung und dem Wirkungsgrad berechnet werden.
LPG	Liquefied petrol gas, z. B. Propan, Butan
LRV	Luftreinhalte-Verordnung, SR 814.318.142.1
MCP	Medium-size combustion plants (von vorgeschlagener EU-Richtlinie zu regulierende Anlagen zur thermischen Stromerzeugung mit FWL 1-5 MW)
Nennleistung	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.
NSA	Notstromanlage

SCR	Abgastechnologie: Selective catalytic reduction
UNECE	Wirtschaftskommission der EU (United Nations Economic Commission for Europe)
UNFCCC	Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zum Klimawandel (United Nations Framework Convention on Climate Change)
USG	Umweltschutzgesetz
Verbrennungskraftmaschine	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 und Gülden Sterzl 2015).

Literatur

- BAFU 2010:** Luftschadstoff-Emissionen des Strassenverkehrs 1990-2035. Aktualisierung 2010. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- BAFU 2015:** Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des Non-Road-Sektors. Studie für die Jahre 1980-2050. Umwelt-Wissen Nr. 1519. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- BAFU 2016:** Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990-2014. National Inventory Report 2016. [http://www.bafu.admin.ch/klima/13879/13880/15473/index.html?lang=en&download=NHZLpZeg7t,Inp6I0NTU042l2Z6ln1ad1lZn4Z2qZpnO2Yqq2Z6gpJCHeoB5g2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--].
- BFE 2016:** Schweizerische Gesamtenergiestatistik 2015. [http://www.bfe.admin.ch/php/modules/publikationen/stream.php?extlang=de&name=de_83041321.pdf].
- Ecoinvent 2010:** Ecoinvent Database v2.2. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf. [www.ecoinvent.ch].
- EMEP/EEA 2016a:** EMEP/EEA emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. 1.A.1 Energy industries. 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-1-energy-industries>].
- EMEP/EEA 2016b:** 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>].
- EMEP/EEA 2016c:** EMEP/EEA emission inventory guidebook 2016. Technical guidance to prepare national emission inventories. 1.A.4 Non-road mobile machinery. 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-non-road-1>].
- EPA 1995:** Compilation of air pollutant emission factors. Volume I: Stationary point and area sources. AP-42, Fifth edition. U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Research Triangle Park, NC, USA.
- 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>].

- IINAS 2015:** GEMIS 4.94 – Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme. Umwelt- und Kostenanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen. EDV-Modell. Internationales Institut für Nachhaltigkeitsanalysen und -strategien (IINAS), Darmstadt/Berlin. [<http://www.iinas.org/gemis-docs-de.html>].
- 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].
- 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].
- Küng, L., Felder, R. 2006:** Verschiedene Notstromanlagen im Vergleich. Vor- und Nachteile von redundanten Netzanschlüssen, von mobilen und von fest installierten Notstrom-Dieselaggregaten. Bulletin SEV/VSE 15/06. [http://www.biblioite.ethz.ch/downloads/Kueng_Notstrom.pdf].
- 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].
- 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.
- Pavri, R., Moore, G. D. 2001:** Gas Turbine Emissions and Control. GE Energy Services, Atlanta, GA, USA.
- 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].
- VDI 2012:** Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen. Grundlagen und Kostenberechnung. VDI-Richtlinie 2067. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), Düsseldorf.
- Wehrli, T. 2008:** Evaluation Stand der Technik bei stationären Verbrennungsmotoren als Basis einer LRV-Anpassung. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.