



September 2023

Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen

1 Mittlere Emissionsfaktoren von Feuerungen (Erdgas, Heizöl Extraleicht und Holz)

1.1 Erdgas- und Heizölfeuerungen

Basierend auf einer breiten Datenbasis von über 200'000 Messungen der behördlichen Feuerungskontrolle in sechs Kantonen (BE, BS, LU, SZ, UR und ZG) und in der Stadt Zürich der Jahre 2010 und 2011 wurden für die Schweiz mittlere Emissionsfaktoren für Stickoxide (NO_x , angegeben als NO_2 -Äquivalente) und Kohlenmonoxid (CO) von mit Erdgas und Heizöl Extraleicht (HEL) betriebenen Feuerungen für das Jahr 2010 bestimmt. Unter Berücksichtigung der Baujahre und mittleren Lebensdauern der Feuerungen wurden auch Emissionsfaktoren für das Jahr 2020 hergeleitet, welche in Tabelle 1 aufgeführt sind. Die Berechnung der Emissionsfaktoren in $[\text{mg}/\text{MJ}]$ erfolgte aus den im Abgas gemessenen Schadstoffkonzentrationen in $[\text{mg}/\text{m}^3 \text{ Abgasvolumen}]$ unter Berücksichtigung des unteren Heizwerts H_u und des sog. trockenen Abgasvolumens V_{atr} . Gemäss Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [1] wird für Erdgas und HEL ein Bezugssauerstoffgehalt von 3 %vol O_2 verwendet. Der Emissionsfaktor für Schwefeloxide (SO_x angegeben als SO_2 -Äquivalente) von HEL beruht auf dem Mittelwert der Jahresmittelwerte der Schwefelanalysen der Jahre 2018-2022, gewichtet für die beiden HEL-Qualitäten, Euro und Öko schwefelarm. Die Werte der Emissionsfaktoren von SO_x für Erdgas sowie von flüchtigen organischen Verbindungen (non-methane volatile organic compounds NMVOC) und Staub stammen aus dem Handbuch „Emissionsfaktoren für stationäre Quellen“ (BUWAL, 2000) [2].

Die Emissionsfaktoren von Methan (CH_4) entsprechen den Standardwerten der 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [3]. Die Emissionsfaktoren von Kohlendioxid (CO_2) und die Heizwerte basieren auf den Werten des Faktenblatts „ CO_2 -Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz“ (Stand Januar 2023) [4]. Zu beachten ist, dass die dort angegebenen CO_2 -Emissionsfaktoren und Heizwerte von Erdgas jährlich aus der gemessenen Gaszusammensetzung berechnet werden (Messdaten des Verbands der Schweizerischen Gasindustrie (VSG) und des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches (SVGW)) und daher von Jahr zu Jahr leicht variieren. Die in Tabelle 1 aufgeführten Werte sind Mittelwerte der Jahre 2013–2022.

1.2 Holzfeuerungen

1.2.1 Herleitung der Emissionsfaktoren

In einer umfassenden Studie wurden die Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen für das Jahr 2020 sowie die Vergangenheit (1990, 2008, 2014) und die Zukunft (2035) basierend auf Messdaten, Literaturdaten und Modellierungen überarbeitet [5]. Dabei wurden die Emissionsfaktoren für die Schadstoffe NO_x , CO , NMVOC, CH_4 , Feinstaub, Black Carbon, SO_x , Ammoniak, Schwermetalle, persistente organische Schadstoffe und Benzol aktualisiert. Im Folgenden wird die Herleitung der in Tabelle 1 aufgeführten Schadstoffe NO_x , CO , NMVOC, CH_4 , Feinstaub und SO_x , beschrieben. Änderungen bei den Emissionsfaktoren seit der letzten Überarbeitung im Jahr 2014 erklären sich durch Verschärfungen der Vorschriften in der LRV in den Jahren 2012 und 2018, durch grössere Anteile an modernen Feuerungen und Anlagen mit Abgasreinigung sowie auch durch verbesserten Anlagenbetrieb. Es wurden Daten aus mehr als 60 Publikationen und einer Vielzahl an Emissionsmessungen von automatischen Feuerungen der Jahre 2015 bis 2020 ausgewertet und mittlere, für schweizerische Verhältnisse repräsentative Emissionsfaktoren bestimmt. Literaturdaten lagen vor allem für Emissionen von NO_x , CO , VOC und Feinstaub aus Einzelraumfeuerungen und Gebäudeheizungen vor, jedoch fast keine für die weiteren Luftschadstoffe und für automatische Feuerungen. Die Holzfeuerungen wurden nach den in der Schweizerischen Holzenergiestatistik [6] aufgeführten Anlagenkategorien (Kat. 1 – 19) unterteilt. Dabei wird bei den automatischen Feuerungen zwischen Anlagen innerhalb und ausserhalb von Holzverarbeitungsbetrieben (i. HVB bzw. a. HVB) unterschieden. In den Anlagenkategorien 1 – 18 (Offene Cheminées bis Holz-Wärmeleistungskopplungsanlagen) werden Holzbrennstoffe (Anh. 5 Ziff. 31 Abs. 1 LRV)

und in Kategorie 19 (Anlagen für erneuerbare Abfälle) in erster Linie Altholz (Anh. 5 Ziff. 31. Abs. 2 Bst. a LRV) eingesetzt. Die spezifischen Heizwerte H_u und trockenen Abgasvolumina V_{atr} zur Umrechnung der gemessenen Schadstoffkonzentrationen von $[mg/m^3 \text{ Abgasvolumen}]$ in Emissionsfaktoren in $[mg/MJ]$ beziehen sich auf das in der jeweiligen Anlagenkategorie verwendete Holz der Feuchte u .

Die Emissionsfaktoren von NO_x , CO, VOC und Feinstaub aus Einzelraumfeuerungen (Kat. 1 – 6) und Gebäudeheizungen (Kat. 7 – 11b) basieren ausschliesslich auf Literaturdaten. Es wurden nur Daten berücksichtigt, die möglichst den realen Betrieb beinhalten, d. h. den gesamten Abbrand mit verschiedenen Betriebsphasen und Betriebseinflüssen. Am meisten Daten waren für die Anlagenkategorien geschlossene Cheminées, Cheminée-, Zimmer- und Kachelöfen (Kat. 2 – 4a, 5) vorhanden. Deren Emissionsfaktoren wurden basierend auf einem Modell hergeleitet, das verschiedene Technologien (ein- und mehrstufige Verbrennung) und negative Betriebseinflüsse (Anzünden von unten, mit Zeitungspapier, Betrieb mit feuchtem Holz, Überladen der Brennkammer, Reduzierung der Luftzufuhr) im Verhältnis/Vergleich zum optimalen Betrieb berücksichtigt. Für offene Cheminées, Holzkoch- und Zentralheizungsherde sowie Doppel-/Wechselbrandkessel ist die Datenlage gering. Deshalb wurden für NO_x , CO und Feinstaub die Emissionsfaktoren der letzten Aktualisierung (2014) eingesetzt. Für VOC wurde der gleiche Wert wie für die Anlagenkategorien 2 – 4a, 5 angenommen.

Für die Herleitung der Emissionsfaktoren der automatischen Feuerungen über 50 kW (Hackschnitzel, Pellets) inklusive Anlagen für erneuerbare Abfälle (Altholzfeuerungen) konnte eine grosse Zahl an Messdaten (ca. 2'500 Messungen an 1'300 Anlagen) ausgewertet werden. Sie stammten überwiegend aus Abnahme- und periodischen Kontrollmessungen, aber auch aus sog. Langzeitmessungen und Messungen von zusätzlichen Schadstoffen. Die Abnahme- und Kontrollmessungen umfassten Messungen von CO und Feinstaub, meist NO_x und vereinzelt auch VOC und stammten aus neun Kantonen (AG, AR, BE, FR, JU, NW, OW, ZG und ZH). Gemäss Holzenergiestatistik (Tabelle P) [6] entsprachen die Anlagen in diesen neun Kantonen der Hälfte der 2020 in der Schweiz installierten automatischen Feuerungen, sowohl was die Anzahl als auch was die Leistung betrifft. Auch decken die Messberichte dieser Kantone Anlagen aus unterschiedlichen Landesteilen (ausser Tessin) ab sowie aus Städten, der Agglomeration und dem Berggebiet, womit die Daten als repräsentativ betrachtet werden können. Basierend auf der Vielzahl dieser Messungen konnten für alle automatischen Feuerungskategorien mittlere Emissionsfaktoren bei Voll- und Teillast im stationären Betrieb ermittelt werden. Ergänzend dazu wurden Daten von 36 Langzeitmessungen ausgewertet und berücksichtigt, welche zusätzlich zum stationären Betrieb auch Emissionen der An- und Abfahrphasen sowie des Standby- und Glutbettunterhaltbetriebs umfassten. Diese Messungen lieferten Informationen zu Dauer und prozentualen Anteilen der effektiven Leistung bei den verschiedenen Betriebsphasen. Ausgehend von all diesen Angaben konnten mittlere Emissionsfaktoren von NO_x , CO, VOC und Feinstaub für einen typischen Betrieb modelliert werden.

Die Emissionsfaktoren für NO_x , CO, VOC, Feinstaub und SO_x der Holz-Wärmeleistungskopplungsanlagen konnten basierend auf LRV-Messdaten (Abnahme- und Kontrollmessungen, kontinuierliche Messungen) von 12 der total 14 Anlagen, die 2018 in Betrieb waren, hergeleitet werden. Diese 12 Anlagen beinhalten auch die 4 grössten der Schweiz, welche zusammen 80 % der Leistung dieser Kategorie ausmachen und das Emissionsverhalten dominieren.

Die Aufteilung der VOC auf NMVOC (70 %) und CH_4 (30 %) wurde aus Literaturdaten von Einzelraumfeuerungen (Kat. 2 – 5) und Gebäudeheizungen (Kat. 8, 9, 11a und 11b) unterschiedlicher Technologie und Betriebsphasen hergeleitet und wie bisher für alle Holzfeuerungskategorien als konstant angenommen.

Neu beinhalten die Emissionsfaktoren für Staub nicht nur die durch Filtration im heissen Abgas gravimetrisch abgetrennten Partikel, sondern auch die organischen Verbindungen, welche unmittelbar nach dem Kaminaustritt beim Abkühlen des Abgases auf Umgebungstemperatur kondensieren. Die Anteile dieser kondensierbaren Staubemissionen wurden basierend auf einigen Literaturangaben abgeschätzt (u.a. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2019 [7]). Dabei wurde unterschieden zwischen Einzelraumfeuerungen/Gebäudeheizungen (Kat. 1 – 11a; $PM(\text{kondensierbar})/PM(\text{gravimetrisch}) = 1.0$) und den grösseren automatischen Feuerungen (Kat. 11b – 19; $PM(\text{kondensierbar})/PM(\text{gravimetrisch}) = 0.1$).

Die SO_x -Emissionsfaktoren für Einzelraumfeuerungen, für Gebäudeheizungen und für automatischen Feuerungen über 50 kW (Hackschnitzel, Pellets) basieren jeweils auf Mittelwerten aller verfügbaren Literaturdaten. Der SO_x -Emissionsfaktor der Anlagen für erneuerbare Abfälle beruht auf LRV-Messungen. Der Wert des CO_2 -Emissionsfaktors basiert auf einer entsprechenden Studie der Zementindustrie aus dem Jahr 2010.

Tabelle 1: Mittlere Emissionsfaktoren von Erdgas-, Heizöl Extraleicht- und Holzfeuerungen für das Jahr 2020, sowie Angaben zu Heizwert H_u , Abgasvolumen V_{Atr} und Holzfeuchte u .

		Heizwert H_u	Abgasvolumen V_{Atr}	Holzfeuchte u	Emissionsfaktoren bezogen auf Inputenergie						
					NO _x	CO	NMVOG	CH ₄	Staub	SO _x	CO ₂
Erdgas	Feuerung	[MJ/m ³]	[m ³ /m ³]		[mg/MJ]						[g/MJ]
	<50 kW	36.9 ¹⁾	10.2		15	12	2	5	0.1	0.5	56.3 ¹⁾
	50–350 kW				16	9	2	5			
	>350 kW				19	7	2	1			
HEL	Gebläsebrenner	[MJ/kg]	[m ³ /kg]								
	<50 kW	42.9	12.4		33	11	6	10	0.2	7 ²⁾	73.7
	50–350 kW				32	6	6	10			
	>350 kW				31	6	2	3			
Holz	Anlagenkategorien nach Holzenergiestatistik	[MJ/kg] ³⁾	[m ³ /kg] ⁴⁾	[%]	[mg/MJ] ⁵⁾						[g/MJ]
	Offene Cheminées (1)	14.6	9.6	25	80	3'000	270	120	200	10	99.9
	Geschlossene Cheminées und Cheminéeöfen (2, 3)	14.6	9.6	25	85	2'800	250	110	180		
	Zimmer- und Kachelöfen (4a, 5)	13.7	9.0	33	85	2'800	250	110	180		
	Pelletöfen (Wohnbereich) (4b)	13.8	9.0	33	85	390	14	6	80		
	Holzkoch- und Zentralheizungsherde (6, 7)	13.7	9.0	33	70	4'000	350	150	400		
	Stückholzkessel (8, 9)	13.7	9.0	33	100	1'700	70	30	120		
	Doppel-/Wechselbrandkessel (10)	13.7	9.0	33	70	4'000	350	150	400		
	Autom. Feuerungen <50 kW (11a)	11.7	7.8	54	120	900	40	20	180	3	
	Pelletkessel <50 kW (11b)	13.8	9.0	33	70	330	14	6	33		
	Autom. Feuerungen 50-500 kW a. HVB (12a, 14a)	11.6	7.8	54	130	450	20	10	66		
	Pelletfeuerungen 50-500 kW (12b, 14b)	14.1	9.0	33	75	170	7	3	33		
	Autom. Feuerungen 50-500 kW i. HVB (13, 15)	13.9	9.0	33	140	460	20	10	66		
	Autom. Feuerungen >500 kW a. HVB (16a)	11.0	7.8/6.2	54	120	140	7	3	11		
	Pelletfeuerungen >500 kW (16b)	14.1	9.0/7.2	33	75	50	2	1	5.5		
	Autom. Feuerungen >500 kW i. HVB (17)	12.6	9.0/7.2	33	120	150	7	3	23		
	Holz-Wärmekraftkopplungsanlagen (18)	10.5	7.8/6.2	54	40	10	0.3	0.2	0.3	1	
Anlagen für erneuerbare Abfälle (19)	13.0	10.8/8.6	11	130	60	1.4	0.6	1.5	20		

- ¹⁾ Mittelwert basierend auf der jährlich bestimmten Erdgaszusammensetzung der Jahre 2013–2022 gemäss Faktenblatt „CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz“ (Stand Januar 2023) [4]
- ²⁾ Mittelwert der Jahresmittelwerte der Schwefelanalysen der Jahre 2018–2022
- ³⁾ spezifischer Heizwert H_u bezogen auf eingesetztes Holz der Holzfeuchte u gemäss Schweizerischer Holzenergiestatistik, Erhebung für das Jahr 2022, BFE 2023 (Tabellen I.3, I.5, D und E) [6]
- ⁴⁾ spezifisches trockenes Abgasvolumen V_{Atr} bei Bezugssauerstoffgehalt nach LRV (Feuerungswärmeleistung ≤ 1 MW: 13%vol O₂, >1 MW: 11%vol O₂) bezogen auf eingesetztes Holz der Holzfeuchte u
- ⁵⁾ Anteil PM10 an PM: 95%, Anteil PM2.5 an PM: 90% für alle Holzfeuerungs-Anlagekategorien gemäss Studie „Aktualisierung Emissionsmodell Holzfeuerungen 2020“ [5]

1.2.2 Emissionsverhalten

Die von Holzfeuerungen emittierten Stickoxide stammen vorwiegend aus dem Brennstoff. Ein höherer Sauerstoffgehalt in Feuerraum und Ausbrandzone begünstigt die Oxidation und damit die Stickoxidbildung. Entsprechend besteht bei Feuerungen ohne Low-NO_x-Technologie oder Entstickung (SNCR, SCR) ein gegenläufiger Trend zwischen NO_x- und CO-Emissionen. Kohlenmonoxid und organische Verbindungen wie NMVOG und CH₄ sind Produkte einer unvollständigen Verbrennung und können durch hohe Verbrennungstemperaturen, gute Vermischung von brennbaren Gasen mit Verbrennungsluft sowie einer ausreichenden Verweilzeit in der heissen Zone vermieden werden. Dies ist insbesondere bei zunehmender Anlagengrösse der Fall. Ein automatisierter Betrieb ermöglicht eine Verbrennung bei konstantem Luftüberschuss, was in der Regel eine höhere Ausbrandqualität sicherstellt.

Für Feuerungen kleiner Leistung bieten Holzpellets aufgrund ihrer konstanten Brennstoffqualität und ihrem tiefen Wassergehalt vorteilhafte Voraussetzungen für die Verbrennung. Bei handbeschickten Holzfeuerungen tragen die Anfeuer- und die Ausbrandphase entscheidend zu den Gesamtemissionen bei, weshalb diese deutlich höhere Emissionsfaktoren für CO, NMVOC, CH₄, und Staub aufweisen. Dementsprechend enthalten die Abgase dieser Feuerungen auch bedeutende Mengen an organischen Verbindungen, die unmittelbar nach dem Kaminaustritt beim Abkühlen auf Umgebungstemperatur kondensieren und zu primärem Feinstaub beitragen.

Kleinfeuerungen weisen aufgrund der schlechteren Ausbrandqualität hohe Anteile an organischem Feinstaub (Partikel <10 µm aerodynamischer Durchmesser) und Russ aus. Feinstaub aus automatischen Feuerungen hingegen besteht vor allem aus anorganischen Verbindungen, deren Mengen durch eine vollständige Verbrennung nicht vermindert werden. Die resultierenden Emissionen werden deshalb in erster Linie durch die Abgasreinigung beeinflusst. Für grössere, automatische Feuerungen zeigt sich, dass sich seit den Verschärfungen der Emissionsgrenzwerte in der LRV ab 2007 der Einsatz von Feinstaubabscheidern als Standard bei Neuanlagen und im Rahmen von Sanierungen auch bei Altanlagen durchgesetzt hat. Entscheidend ist dabei deren Verfügbarkeit im Betrieb. Bei Heizanwendungen ist wegen der geringen Vollbetriebsstundenzahl der Feuerungen von einer niedrigeren Verfügbarkeit auszugehen als bei grossen automatischen Feuerungen, Holz-Wärmekraftkopplungsanlagen oder Anlagen für erneuerbare Abfälle.

Die SO_x-Emissionen hängen in erster Linie vom Schwefelgehalt des Brennstoffs ab. Die tieferen Werte für automatische Feuerungen über 50 kW sind vor allem auf einen besseren Wirkungsgrad zurückzuführen, so dass für dieselbe Wärmeleistung weniger Holz verbrannt werden muss als in kleinen Feuerungen.

2 Emissionsinventare

Die oben beschriebenen, mittleren Emissionsfaktoren werden zur Berechnung der Emissionen aus Erdgas-, HEL- und Holzfeuerungen im Luftschadstoff [8]- und Klimagasemissionsinventar [9] verwendet. Die Inventare werden jährlich aktualisiert und im Rahmen des UNECE-Übereinkommens über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung (CLRTAP) und der 8 Zusatzprotokolle sowie im Rahmen der UN-Konvention und des Übereinkommens von Paris (ab 2021, Kyoto-Protokoll 2008-2020) eingereicht. In beiden Inventaren werden Emissionszeitreihen ausgewiesen. Das Luftschadstoffinventar umfasst den Zeitraum von 1980 bis 2050 und das Klimagasinventar die Zeit ab 1990 bis zum aktuellen Submissionjahr. Entsprechend werden für die Emissionsberechnungen auch Zeitreihen der Emissionsfaktoren benötigt. Anders als beispielsweise für die Brennstoffverbräuche, für die jährliche Statistiken vorliegen, stehen Emissionsfaktorwerte meist nur für spezifische Jahre zur Verfügung. Zur Bildung einer Zeitreihe werden für die dazwischenliegenden Jahre linear interpolierte Werte verwendet.

Mit Ausnahme des CO₂-Emissionsfaktors von Erdgas entsprechen die in Tabelle 1 aufgeführten Emissionsfaktoren den in den Inventaren zur Emissionsberechnung verwendeten Werten des Jahres 2020. Der in der Tabelle angegebene CO₂-Emissionsfaktor von Erdgas ist der Mittelwert der jährlich gemessenen Gaszusammensetzungen der Jahre 2013-2022 (siehe Faktenblatt „CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz“ [4]).

Quellen

- [1] Luftreinhalte-Verordnung, <http://www.admin.ch/opc/de/classified-compilation/19850321/index.html>.
- [2] Handbuch „Emissionsfaktoren für stationäre Quellen“, Vollzug Umwelt, BUWAL, 2000, verfügbar (SAEFL 2000) unter [References \(admin.ch\)](https://www.admin.ch).
- [3] 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (vol. 2 Energy, chap. 2 Stationary Combustion, <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>).
- [4] Faktenblatt „CO₂-Emissionsfaktoren des Treibhausgasinventars der Schweiz“, BAFU, Januar 2023, verfügbar unter den weiterführenden Informationen (Dokumente) auf www.bafu.admin.ch/co2-statistik.
- [5] Aktualisierung Emissionsmodell Holzfeuerungen 2020, P. Zotter und T. Nussbaumer, Verenum, im Auftrag des Bundesamts für Umwelt, 2022, verfügbar unter <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/studien.html>.
- [6] Schweizerische Holzenergiestatistik 2022, BFE, 2023, verfügbar unter <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/energiestatistiken/teilstatistiken.html>.

- [7] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2019, <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>.
- [8] Luftschadstoffinventar der Schweiz (NFR) und Informative Inventory Report (IIR), BAFU, 2023, verfügbar unter <https://www.ceip.at/status-of-reporting-and-review-results>.
- [9] Klimagasinventar der Schweiz und National Inventory Report, BAFU, 2023, verfügbar unter www.climate-reporting.ch.