



verenum

*Ingenieurbüro für
Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik*

Im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU)

Aktualisierung Emissionsmodell Holz- feuerungen 2020

Schlussbericht

Peter Zotter

Thomas Nussbaumer

Verenum AG, Zürich, 21.11.2022

Impressum

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien, 3003 Bern

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

Auftragnehmer:

Verenum AG, Langmauerstrasse 109, 8006 Zürich

Autoren:

Peter Zotter, Thomas Nussbaumer

Kontakt:

peter.zotter@verenum.ch, thomas.nussbaumer@verenum.ch

Begleitgruppe BAFU:

Rainer Kegel, Beat Müller und Sabine Schenker, Abt. Luftreinhaltung und Chemikalien, BAFU

Hinweis:

Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt sind allein die Autoren verantwortlich.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	6
Feuerungskategorien der Holzenergiestatistik (HES)	8
Erläuterungen zu den verschiedenen Staubdefinitionen	9
Zusammenfassung	10
1 Ausgangslage und Zielsetzung	18
2 Datengrundlage	20
2.1 Literatur	20
2.2 Messdaten	21
2.2.1 LRV-Emissionsmessungen	22
2.2.2 Langzeitmessungen	22
2.2.3 Messungen zusätzlicher Schadstoffe im Auftrag des BAFU	23
3 Methodische Grundlagen	24
3.1 Feuerungskategorien	24
3.2 Datenauswertung	24
3.2.1 Umrechnung von mg/m^3 auf mg/MJ	24
3.2.2 LRV-Emissionsmessungen	25
3.2.3 Langzeitmessungen	26
3.2.4 Nachweisgrenze	27
3.3 Rundung	27
3.4 EF-2020 – NO_x , CO und PM_{exh}	28
3.4.1 HES Kat. 2, 3, 4a, 5	28
3.4.2 HES-Kategorie 4b	30
3.4.3 HES-Kategorien 8, 9 sowie 11a und 11b	30
3.4.4 HES-Kategorien 12-17 und 19	31
3.4.5 HES-Kategorie 18	33
3.5 EF-2020 – VOC, CH_4 , NMVOC	33
3.6 EF-2020 – PM-Fraktionen und BC	34
3.6.1 $\text{PM}_{10,\text{exh}}$ und $\text{PM}_{2,5,\text{exh}}$	34
3.6.2 BC	34
3.6.3 TSP und PM_{cond}	34
3.7 EF-2020 – Schwermetalle, PAK, NH_3 , SO_x , Benzol, PCDD/F, PCB, HCB (Schadstoffe Gruppe 2)	35
3.8 EF-Prognosen bis 2035	35
3.8.1 NO_x , CO, PM_{exh}	36
3.8.2 VOC, CH_4 und NMVOC	37
3.8.3 PM Fraktionen und BC	37
3.8.4 Schadstoffe der Gruppe 2	37

3.9	EF Rückblick bis 1990	38
3.9.1	NO _x , CO, PM _{exh}	38
3.9.2	VOC, CH ₄ und NMVOC	39
3.9.3	PM-Fraktionen und BC	39
3.9.4	Schadstoffe der Gruppe 2	39
3.10	Unsicherheiten	40
3.10.1	EF-2020 - Schadstoffe Gruppe 1	40
3.10.2	EF-2020 - Schadstoffe Gruppe 2	40
3.10.3	EF-1990	41
4	Resultate	42
4.1	EF-2020	42
4.1.1	NO _x , CO, VOC, CH ₄ , NMVOC und PM _{exh}	42
4.1.2	PM-Fraktionen und BC	48
4.1.3	Schwermetalle und PAK	52
4.1.3.1	Schwermetalle	52
4.1.3.2	PAK	54
4.1.4	NH ₃ , SO _x , Benzol	55
4.1.5	PCDD/F, PCB, HCB	58
4.2	EF-Zeitreihe – Prognose bis 2035 und Rückblick bis 1990	60
4.2.1	Prognose bis 2035	62
4.2.1.1	NO _x	62
4.2.1.2	CO und PM _{exh}	62
4.2.1.3	VOC, CH ₄ und NMVOC	63
4.2.1.4	BC und PM-Fraktionen	63
4.2.1.5	Pb und Zn	64
4.2.1.6	Cd und Hg	64
4.2.1.7	PAK	64
4.2.1.8	NH ₃	65
4.2.1.9	SO _x	65
4.2.1.10	Benzol	65
4.2.1.11	PCDD/F	65
4.2.1.12	PCB	66
4.2.1.13	HCB	66
4.2.2	Rückblick bis 1990	66
4.2.2.1	NO _x	66
4.2.2.2	CO und PM _{exh}	66
4.2.2.3	VOC, CH ₄ und NMVOC	68
4.2.2.4	BC	68
4.2.2.5	PM-Fraktionen	68
4.2.2.6	Cd und Hg	69
4.2.2.7	PAK	70
4.2.2.8	NH ₃	70
4.2.2.9	SO _x	70
4.2.2.10	Benzol	71
4.2.2.11	PDDD/F	71
4.2.2.12	PCB	71
4.2.2.13	HCB	72
4.3	Unsicherheiten und Bandbreiten	72
4.3.1	Unsicherheiten EF-2020	72

4.3.2	Unsicherheiten EF 1990	76
4.3.3	Bandbreiten EF-Modell Kat. 2, 3, 4a und 5	77
4.3.4	Sensitivitätsanalyse und Bandbreiten Kat. 12-17 und 19	78
5	Literatur	82
	Anhang – Zusatz- und Hilfstabellen	87
A.1	Datengrundlage – Messdaten.....	87
A.2	Datenauswertung.....	88
A.3	EF-Modell HES-Kategorie 2, 3, 4a, 5 – Zusatztabellen.....	89
A.4	EF-2020 – Zusatztabellen HES-Kategorie 4b.....	92
A.5	EF-Modell HES-Kategorien 12-17 und 19 – Zusatzinformationen	92
A.6	Literaturdaten zum Faktor α für die Berechnung von CH ₄ und NMVOC aus VOC	97
A.7	EF-2020 – Zusatztabellen zu PM-Fraktionen	98
A.8	EF-2020 – Schwermetalle.....	101
A.9	EF-2020 – PAK	105
A.10	EF-2020 – NH ₃	109
A.11	EF-2020 – SO _x	110
A.12	EF-2020 – Benzol	111
A.13	EF-2020 – PCDD/F	113
A.14	EF-2020 – PCB	114
A.15	EF-2020 – HCB.....	115
A.16	Zeitreihe – Rückblick bis 1990 und Prognose bis 2035.....	116
A.17	Unsicherheiten für 1990	123

Abkürzungsverzeichnis

BC	Black Carbon, schwarzer Kohlenstoff, oftmals auch als Russ bezeichnet
Cd	Cadmium
CH ₄	Methan
CO	Kohlenmonoxid
COC	Condensable organic compounds (kondensierbare organische Verbindungen)
EF	Emissionsfaktor
- ΔEF	Relative Änderung der EF
EMEP	European Monitoring and Evaluation Programme
FWL	Feuerungswärmeleistung
Gb	Glutbett
HCB	Hexachlorbenzol
HES	Schweizerische Holzenergiestatistik
Hg	Quecksilber
HvB	Holzverarbeitungsbetriebe
- a. HvB	- ausserhalb Holzverarbeitungsbetrieben
- i. HvB	- innerhalb Holzverarbeitungsbetrieben
Kat.	Kategorie
Literatur 2014	Literaturwerte, die für Aktualisierung der EF-2014 [1] verwendet wurden
Literatur 2020	Literaturwerte in dieser Studie, die für Aktualisierung der EF-2020 herangezogen werden
LRV	Schweizer Luftreinhalteverordnung
LZM	Langzeitmessungen
NH ₃	Ammoniak
NMVOG	Nicht-Methan flüchtige organische Verbindungen
NO _x	Stickoxide (NO und NO ₂), angegeben als Stickstoffdioxid
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
- B(a)P	- Benzo[a]pyren
- B(b)F	- Benzo[b]fluoranthen
- B(k)F	- Benzo[k]fluoranthen
- I(cd)P	- Indeno[1,2,3-cd]pyren
Pb	Blei
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzo- <i>p</i> -dioxine und Dibenzofurane (kurz: Dioxine und Furane)
PM _{cond}	Kondensierter Anteil des Gesamtstaubes, hauptsächlich COC. Differenz aus TSP und PM _{exh}
- PM _{10, cond}	- kondensierter Anteil des Feinstaubes < 10 µm
- PM _{2.5, cond}	- kondensierter Anteil des Feinstaubes < 2.5 µm
PM _{exh}	Gesamtstaub, gemessen gravimetrisch im heissen Abgas nach LRV
- PM _{10, exh}	- Feinstaub im heissen Abgas < 10 µm
- PM _{2.5, exh}	- Feinstaub im heissen Abgas < 2.5 µm
Q _F	prozentuale Feuerungswärmeleistung
Schadstoffe Gruppe 1	NO _x , CO, VOC, CH ₄ , NMVOC, PM _{exh} , PM _{10, exh} , PM _{2.5, exh} , BC, TSP und PM _{cond}
Schadstoffe Gruppe 2	Pb, Zn, Cd, Hg, PAK, NH ₃ , SO _x , Benzol, PCDD/F, PCB und HCB
SCR	Selektive katalytische Reduktion (von NO _x)

σ	Unsicherheit
SNCR	Selektive nichtkatalytische Reduktion (Verfahren zur Rauchgasreinigung von NO _x)
SO _x	Schwefeloxide (SO ₂ und SO ₃), angegeben als Schwefeldioxid
TSP	Gesamtstaub bei Umgebungsbedingungen («total suspended particles» TSP)
- PM _{10, TSP}	- Staub bei Umgebungsbedingungen < 10µm
- PM _{2,5, TSP}	- Staub bei Umgebungsbedingungen < 2.5µm
VOC	flüchtige organische Verbindungen (volatile organic compounds)
WKK	Wärme-Kraft-Kopplung
Zn	Zink

Feuerungskategorien der Holzenergiestatistik (HES)

Tabelle 1 Feuerungskategorien der Holzenergiestatistik (HES) [2] für die Aktualisierung der Emissionsfaktoren 2020.

HES-Kat.	Bezeichnung
1	Offene Cheminées
2	Geschlossene Chemineés
3	Cheminéeöfen
4a	Zimmeröfen
4b	Pelletöfen (Wohnbereich)
5	Kachelöfen
6	Holzkochherde
7	Zentralheizungsherde
8	Stückholzkessel < 50 kW
9	Stückholzkessel > 50kW
10	Doppel-/Wechselbrandkessel
11a	Automatische Feuerungen < 50 kW
11b	Pelletfeuerungen < 50 kW
12a	Automatische Feuerungen 50 - 300 kW ausserhalb Holzverarbeitungsbetrieben (a.HvB)
12b	Pelletfeuerungen 50 - 300 kW
13	Automatische Feuerungen 50 - 300 kW innerhalb Holzverarbeitungsbetrieben (i.HvB)
14a	Automatische Feuerungen 300 - 500 kW ausserhalb Holzverarbeitungsbetrieben (a.HvB)
14b	Pelletfeuerungen 300 - 500 kW
15	Automatische Feuerungen 300 - 500 kW innerhalb Holzverarbeitungsbetrieben (i.HvB)
16a	Automatische Feuerungen > 500 kW ausserhalb Holzverarbeitungsbetrieben (a.HvB)
16b	Pelletfeuerungen > 500 kW
17	Automatische Feuerungen > 500 kW innerhalb Holzverarbeitungsbetrieben (i.HvB)
18	Holz-Wärmeleistungskopplungsanlagen (WKK)
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle

Erläuterungen zu den verschiedenen Staubdefinitionen

In der vorliegenden Arbeit werden die Beiträge zum primären Feinstaub im Abgas unterteilt in

- gravimetrisch bestimmter Staub in Form von Feststoffen, die im heißen Abgas durch Filtration nach LRV-Messung abgeschieden werden und als PM_{exh} bezeichnet werden:
 - PM_{exh} = gravimetrisch bestimmte Feststoffe im heißen Abgas nach LRV
- bei Abkühlung eines Abgases auf Umgebungstemperatur kondensierende Masse an organischen Verbindungen (COC), die als PM_{cond} bezeichnet werden und die zusätzlich zu PM_{exh} zum primären Feinstaub beitragen:
 - PM_{cond} = zusätzlich anfallende Masse an COC
- Staub in Form von Feststoffen inkl. kondensierter Masse, die gravimetrisch auf einem Filter bei Umgebungstemperatur gemessen wird:
 - $TSP = (PM_{\text{exh}} + PM_{\text{cond}})$ bei Umgebungstemperatur

Dabei ist zu beachten, dass PM_{cond} in der Atmosphäre durch Abdampfung wieder an Masse verlieren und somit nur teilweise zu TSP in der Atmosphäre beitragen.

Zusammenfassung

In dieser Studie wurde eine Aktualisierung der Emissionsfaktoren (EF) für Holzfeuerungen in der Schweiz für das Jahr 2020 wie auch für die Vergangenheit (1990, 2008 und 2014) und die Zukunft (2035) vorgenommen. Diese wurde durchgeführt, da die Holzenergienutzung in automatischen Feuerungen >50 kW seit der letzten Aktualisierung 2014 [1] weiter zugenommen hat und die Datenlage dieser Kategorien in der Studie 2014 gering war. Zudem sind seit 2014 aufgrund der Verschärfungen der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) in 2012 und 2018 weitere Emissionsänderungen (z.B. grössere Anteile moderner Feuerungen am Anlagenbestand, mehr Anlagen mit Abgasreinigung, verbesserter Anlagenbetrieb, etc.) zu erwarten.

Die Aktualisierung der Emissionsfaktoren 2020 wurde für die Feuerungskategorien der Schweizer Holzenergiestatistik (HES, [2]) für folgende Schadstoffe durchgeführt:

- NO_x, CO, VOC, CH₄ und NMVOC
- PM_{exh}, PM_{10,exh}, PM_{2.5,exh}, BC, TSP und PM_{cond}
- Schwermetalle (Pb, Zn, Cd, Hg) und PAK (B(a)P, B(b)F, B(k)F, I(cd)P)
- NH₃, SO_x, Benzol, PCDD/F, PCB und HCB.

Datengrundlage

Es wurden sowohl Daten aus einer Literaturrecherche als auch verschiedenste Messdaten (LRV-Abnahme- und Kontrollmessungen, Langzeitmessungen im Auftrag der Kantone, Messungen zusätzlicher Schadstoffe im Auftrag des BAFU) für den Zeitraum 2015-2020 zusammengetragen und ausgewertet. Insgesamt wurden Daten aus 63 Publikationen in der Auswertung berücksichtigt. Für die Schadstoffe der Gruppe 1 (NO_x, CO, VOC, PM_{exh} und BC) wurden zu den Kategorien der Einzelraumfeuerungen (Kat. 1-7) und Gebäudeheizungen (Kat. 8-11b) einige Publikationen, die seit 2014 veröffentlicht wurden, gefunden. Für die automatischen Feuerungen >50 kW sowie für die Schadstoffe der Gruppe 2 (Schwermetalle, PAK, NH₃, SO_x, Benzol, PCDD/F, PCB, HCB) waren jedoch für alle Feuerungskategorien nur wenige Daten in der Literatur verfügbar, die nach 2014 veröffentlicht wurden.

Neben Literaturdaten konnten für die Aktualisierung der EF-2020 eine grosse Anzahl an Messdaten (2452 Messungen an 1273 Anlagen) für die Kategorien 12a-19 ausgewertet werden. Zahlreiche Kantone (AG, AR, BE, FR, JU, NW, OW, ZG und ZH; mit den meisten Messberichten aus BE) haben Abnahme- und periodische Kontrollmessungen nach LRV von Anlagen >70 kW digital in Tabellenformat zur Verfügung gestellt. Dabei sind in fast allen Fällen Messungen für CO und PM_{exh}, oftmals für NO_x und vereinzelt auch für VOC, Pb und Zn vorhanden. Die Daten stammen zwar nur aus neun Kantonen und ein Grossteil davon nur aus einem Kanton. In diesen Daten sind jedoch Messberichte aus kleinen und grossen Kantonen, unterschiedlichen Landesteilen (ausser Tessin), Berggebieten, der Agglomeration und Städten vorhanden, wodurch angenommen werden kann, dass die verfügbaren Daten repräsentativ sind für alle Anlagen der jeweiligen HES-Kategorie der gesamten Schweiz.

Um Messdaten von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK, Kategorie 18) in die Auswertung miteinbeziehen zu können, wurden alle Anlagebetreiber der Kategorie 18 vom BFE angefragt, ihre Emissionsmessdaten zur Verfügung zu stellen. Von den total 14 Anlagen (Stand 2019 [2]), die in der Schweiz in Betrieb sind, wurden Daten von 12 Anlagen übermittelt.

Da die LRV-Messungen in der Regel nur während kurzer Phasen bei stationärem Betrieb der Feuerung durchgeführt werden, wurden auch Daten von 36 sogenannten „Langzeitmessungen“ (LZM) ausgewertet. Diese beurteilen neben den Emissionen des stationären Feuerungsbetriebs auch jene des An- und Abfahrens der Feuerungen. Zusätzlich liegen auch Daten zu Standby und Glutbettunterhalt vor. Bei LZM werden in der Regel CO, O₂, NO_x und teilweise auch VOC bei Anlagen der Kat. 12-19 gemessen.

Da für automatische Feuerungen >50 kW die Datenlage von Schadstoffen der Gruppe 2 in der letzten Aktualisierung der EF-2014 gering war, hat das BAFU im Rahmen des Projekts "Emissionsmessungen an Holzfeuerungen und weiterer Anlagen" zwischen 2018-2020 bei einigen Anlagen der Kategorien 12-19 in der Schweiz zusätzlich Emissionen dieser Schadstoffe sowie von NMVOC, CH₄ und BC messen lassen. Es konnten nur Zusatzmessungen an sieben Anlagen durchgeführt werden, da diese sehr aufwändig sind und nicht überall möglich waren (fehlende Messstutzen, räumliche Gegebenheiten). Diese Daten wurden ebenfalls berücksichtigt.

Bestimmung der EF-2020

Eine Zusammenstellung über die Datengrundlage und Berechnungsmethoden zur Festlegung der EF-2020 ist in Abbildung 1 zu finden.

HES-Kat.	NO _x , CO, PM _{exh}	VOC	BC/PM _{2.5,exh}	CH ₄ /VOC, PM-Fraktionen*	Benzol	Pb, Zn, Cd Hg, PAK, NH ₃ , SO _x , PCDD/F, PCB, HCB
1	Wert von 2014	Wert von Kat. 2-4a, 5				
2-4a,5	EF Modell mit Literaturdaten	Literatur				
4b	Literatur	Literatur				
6,7	Wert von 2014	Wert von Kat. 2-4a, 5				
8,9	Literatur	Literatur				
10	Wert von 2014	Wert von Kat. 2-4a, 5				
11a	NO _x von 2014, sonst Literatur		Abgeschätzt	•Literatur •EMEP/EEA Guidebook 2019 (PM-Fraktionen)	•Literatur •Aktualisierung 2014 •EMEP/EEA Guidebook 2019	• Literatur • Aktualisierung 2014 • EMEP/EEA Guidebook 2019
11b	Literatur					
12a,14a 12b,14b 13,15 16a 17	EF Modell mit: •LRV-Messdaten •LZM-Messdaten	•LRV-Messdaten •LZM-Messdaten •Messungen im Auftrag des BAFU	Abgeschätzt			• Literatur • Aktualisierung 2014 • EMEP/EEA Guidebook 2019 • Messungen im Auftrag des BAFU • LRV-Emissionsmessungen Kat. 18 und 19
18	LRV & BAFU Messdaten					
19	EF Modell Kat.12-17, 19					

Abbildung 1: Übersicht über die Datenherkunft und Methoden zur Bestimmung der EF-2020.

- grün: EF-2020, die aus Messdaten bestimmt wurden.
- blau: EF-2020, die aus Literaturdaten bestimmt wurden.
- grau: EF-2020, die abgeschätzt wurden oder für die dieselben Werte anderer Kategorien oder die Werte der Aktualisierung 2014 verwendet wurden.
- gelb: Kategorien, für die ein Berechnungsmodell zur Gewichtung verschiedener Betriebs-einflüsse (Kat. 2,3,4a, 5) und –phasen (12a-17,19) angewendet wurde.
- Je intensiver die jeweilige Farbe ist, desto mehr Daten standen zur Bestimmung der EF-2020 zur Verfügung.

* PM₁₀, PM_{2.5}, TSP und PM_{cond}

Für Feuerungen <50 kW wurden die EF-2020 der Schadstoffe der Gruppe 1 ausschliesslich aus Literaturdaten festgelegt. Dabei wurden nur Daten berücksichtigt, die so gut wie möglich den realen Betrieb bzw. den ganzen Abbrand sowie verschiedene Betriebseinflüsse und Betriebsphasen beinhalten. Für die EF-2020 wurden dann die Medianwerte über alle verfügbaren Literaturdaten gebildet.

Zur Bestimmung der EF-2020 für NO_x, CO, PM_{exh} und VOC für Raumheizer für feste Brennstoffe (Kategorien 2,3,4a,5) wurde ausserdem ein Modell angewendet, das verschiedene Betriebseinflüsse und Technologien berücksichtigt. Dazu wurden Medianwerte über alle verfügbaren Literaturwerte für den gesamten Abbrand für die zwei Technologien „konventionell“ und „modern“ gebildet. Diese Klassifizierung schliesst die Begriffe „alt“ bzw. „neu“ oder „eco-labelled“ ein und beschreibt Feuerungen mit einstufiger Verbrennung (Technologie „konventionell“) und mehrstufiger Verbrennung (Technologie „modern“). Die verschiedenen Betriebseinflüsse (Anzünden von unten, Anzünden mit Zeitungspapier, Betrieb mit feuchtem Holz, Betrieb mit Überladen der Brennkammer, Betrieb mit Reduzierung der Luftzufuhr) wurden anhand von Literaturdaten als Verhältnis zum „optimalen Betrieb“ berücksichtigt. Die Anteile der Technologien am Gesamtanlagenbestand mussten abgeschätzt (basierend auf Daten der HES und Annahmen) und die Anteile der verschiedenen Betriebsweisen mussten angenommen werden.

Aufgrund der geringen Datenlage (Kategorien 1, 6 und 7) oder der geringen Relevanz (Kategorie 10) wurden für diese Kategorien entweder die Werte der letzten Aktualisierung 2014 oder die Werte einer ähnlichen Kategorie (Kat. 2-4a, 5) eingesetzt. Die Verhältnisse BC/PM_{2.5,exh}, die zur Berechnung von BC herangezogen werden, mussten grösstenteils abgeschätzt werden.

Zur Bestimmung der EF-2020 für NO_x, CO und PM_{exh} für automatische Feuerungen >50 kW (Kategorien 12-17 und 19) wurde ebenfalls ein Modell angewendet, das verschiedene Betriebseinflüsse (An- und Abfahren, Betrieb mit Voll- und Teilleistung und Standby) berücksichtigt. Die EF für An- und Abfahren sowie Standby wurden aus den LZM ermittelt. Die EF für Voll- und Teilleistung wurden aus den LRV-Emissionsmessungen bestimmt. Für PM_{exh} sind jedoch keine Daten in den LZM verfügbar. Daher mussten die PM_{exh}-EF für die An- und Abfahrphasen sowie Standby abgeschätzt werden. Dies erfolgte über das Verhältnis von PM_{exh} dieser Betriebsphasen zum Betrieb mit Vollleistung aus einer geringen Anzahl an Literaturdaten. Weiter mussten im EF-Modell die Anzahl An- und Abfahrvorgänge, sowie die Anteile der anderen Betriebsphasen am Gesamtbetrieb angenommen werden. Diese Annahmen wurden jedoch anhand der Erfahrungen und Daten der Fachstelle QM Holzheizwerke getroffen.

Die EF-2020 für NO_x, CO und PM_{exh} von WKK-Anlagen (Kategorie 18) wurden ausschliesslich aus den LRV-Messdaten bestimmt. Die verfügbaren Daten werden dominiert von den vier grössten Anlagen, die zusammen 80 % der Leistung ausmachen. Da diese vier Anlagen Leistungen von 27 MW bis 42 MW aufweisen und WKK-Anlagen in der Regel sehr stabil und mit vielen Betriebsstunden betrieben werden, wurde zur Bestimmung der EF keine Gewichtung für den Betriebseinfluss vorgenommen. Für die EF-2020 der Schadstoffe NO_x, CO und PM_{exh} wurde der Median über alle verfügbaren Daten gebildet.

Zur Herleitung der EF-2020 für die Schadstoffe der Gruppe 2 wurde pro Schadstoff eine Übersichtstabelle erstellt und Werte für jede Feuerungskategorie aus den folgenden Quellen aufgelistet:

- Literaturwerte, die für die letzte Aktualisierung 2014 der EF verwendet wurden
- EF-Werte der letzten Aktualisierung 2014
- Werte aus dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3]
- Literaturwerte, die in dieser Studie für die Aktualisierung der EF-2020 herangezogen werden (Literatur 2020)

- Daten aus den Messungen, die im Auftrag des BAFU durchgeführt wurden
- Daten aus den LRV-Emissionsmessungen für Pb und Zn der Kategorie 18 und 19.

Für jede Kategorie wurde die Anzahl der verfügbaren Datensätze, der Mittelwert und der Bereich (Minimal- bis Maximalwert) angegeben. Die EF-2020 wurden anschliessend auf Basis dieser Übersichtstabellen festgelegt, wobei Messwerte höher gewichtet wurden als Literaturdaten. In der Regel wurden ähnliche Kategorien zusammengefasst und derselbe Wert als EF-2020 für diese Kategorien festgelegt.

Zusätzlich zu den EF-2020 wurden für alle Schadstoffe Unsicherheiten festgelegt und deren Bestimmung für jeden Schadstoff und jede Kategorie begründet. Für NO_x, CO und PM_{exh} der Kategorien 2-4a, 5 sowie 12-17, 19 wurden zudem Bandbreiten berechnet. Dazu wurden die Inputparameter zur Gewichtung verschiedener Betriebseinflüsse und -phasen in den jeweiligen EF-Modellen variiert und EF für den «Best case» und den «Worst case» berechnet. Ausserdem wurde für das EF-Modell der Kategorien 12-17 und 19 eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss der verschiedenen Parameter und Annahmen auf die Berechnung der gewichteten EF-2020 zu ermitteln.

Neben den EF für 2020 wurden auch EF für die Vergangenheit (1990, 2008 und 2014) und die Zukunft (2035) abgeschätzt. Für die NO_x-EF aller Kategorien für den Rückblick bis 1990 und die meisten Kategorien für die Prognose bis 2035 wurden keine Änderungen gegenüber den Werten 2020 angenommen. Für CO und PM_{exh} wurden die Werte entweder mit den EF-Modellen für den Rückblick der Kategorien 2, 3, 4a, 5 sowie 12-17 und 19 berechnet oder mit Annahmen abgeschätzt. In den EF-Modellen wurden für die Prognose bzw. den Rückblick verbesserte bzw. schlechtere Betriebsbedingungen und ein jüngster bzw. älterer Anlagenbestand (Kat. 12-17 und 19) mit höherem bzw. tieferem Anteil an «modernen» Feuerungen (Kat. 2, 3, 4a, 5) angenommen. Die EF für die meisten Schadstoffe der Gruppe 2 wurden über die relativen Änderungen zwischen den Zeitpunkten der Zeitreihe von PM_{exh} (Pb und Zn) oder CO (alle anderen Schadstoffe) berechnet. Cd, Hg und SO_x wurden für alle Jahre als unverändert gegenüber den EF-2020 angenommen.

Resultate

Eine Übersicht der EF-2020 aller Schadstoffe, aufgeschlüsselt für die verschiedenen HES-Kategorien, ist in Tabelle 2 aufgeführt. Die zeitliche Änderung der Emissionsfaktoren von NO_x, CO und PM_{exh} sowie deren Emissionen für die Jahre 1990, 2008, 2014 und 2020 sind in Abbildung 2 dargestellt.

In dieser Studie wurden zuerst die Emissionsfaktoren für NO_x, CO und PM_{exh} für 2020 bestimmt. Ausgehend davon wurden dann die Werte der Prognosen (2035) und des Rückblicks (1990, 2008 und 2014) berechnet. Die Schadstoffe der Gruppe 2 wurden, mit Ausnahme von Cd, Hg und SO_x, ausgehend von den EF-2020 und den relativen Änderungen von CO oder PM_{exh} bestimmt. Aus diesem Grund werden in der Zusammenfassung nur die Resultate für NO_x, CO und PM_{exh} diskutiert.

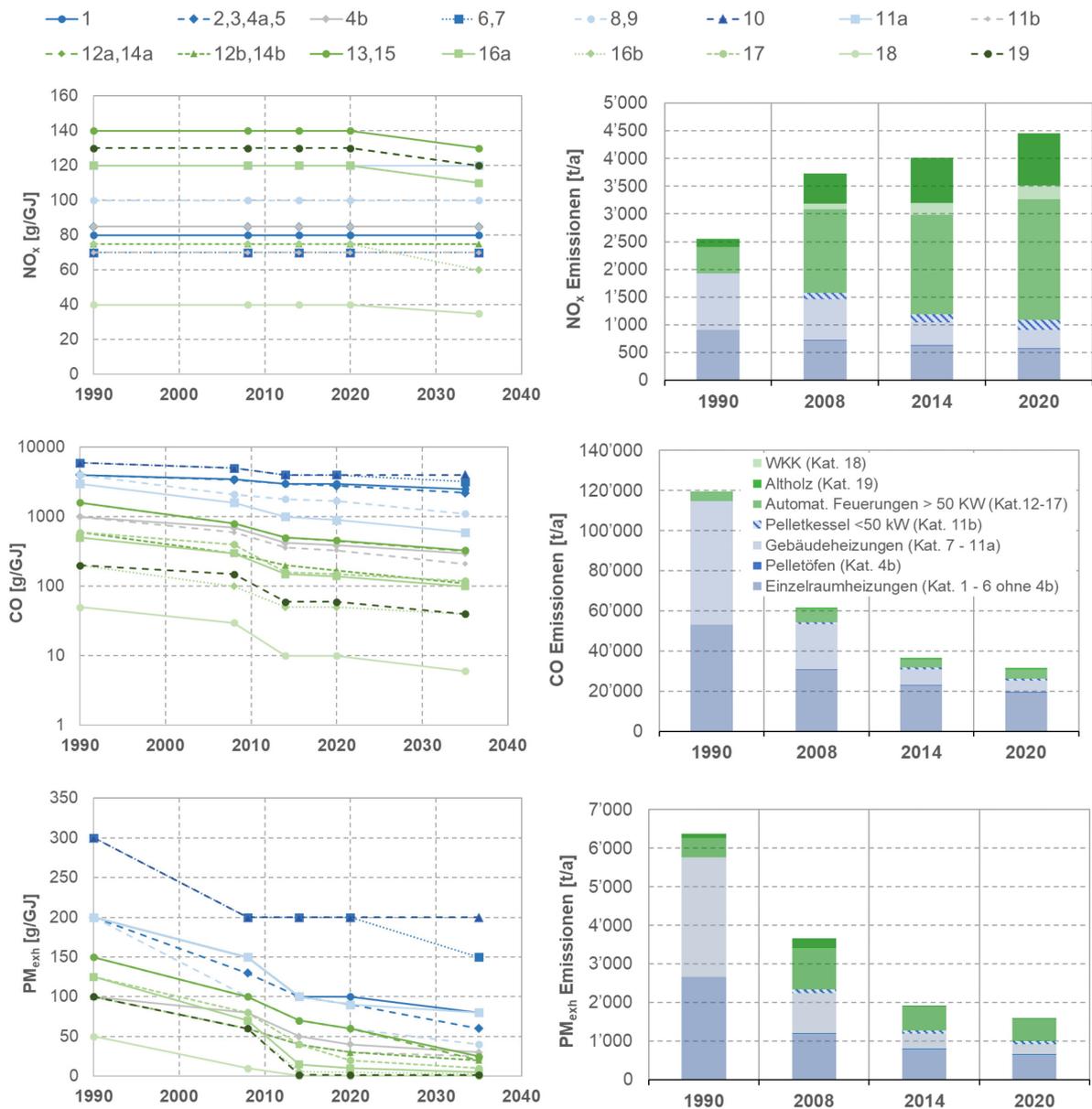


Abbildung 2: Zeitliche Änderung der Emissionsfaktoren für NO_x, CO und PM_{exh} in [g/GJ] aus dieser Studie (links) und deren Emissionen in [t/a] für die Jahre 1990, 2008, 2014 und 2020 (rechts, berechnet anhand der Emissionsfaktoren aus dieser Studie und den Zahlen der Holzenergiestatistik 2020 zur witterungs bereinigten Endenergie (Tabelle E)).

Die Unterschiede und Proportionalitäten zwischen den Kategorien der in dieser Studie ermittelten NO_x-EF entsprechen den erwarteten Trends. Die NO_x-EF für handbeschickte Stückholzfeuerungen <50 kW sind tiefer als für automatische Feuerungen >50 kW, was auf den gegenläufigen Trend zwischen CO und NO_x (für konventionelle Verbrennungsbedingungen ohne Low-NO_x-Massnahmen) zurückzuführen ist. Weitere Unterschiede zwischen den HES-Kategorien sind auch mit dem Stickstoffgehalt im Brennstoff zu erklären. Die tieferen EF für Pelletfeuerungen sind darauf zurückzuführen, dass bis anhin in der Schweiz verwendete Holzpellets grossteils aus rindenfreiem Sägemehl aus Nadelholz stammen. Der Grund für die unveränderten NO_x-EF für 2035 von Feuerungen <50 kW ist, dass für das Festlegen der Werte für 2020 bereits grösstenteils Daten von neueren Feuerungen verwendet wurden und die NO_x-EF-2020 bereits höher sind als jene in der Erhebung 2014. Ausserdem sind für diese Feuerungskategorien keine weiteren grossen technologischen Neuerungen bis ins Jahr 2035 zu erwarten, die eine

signifikante Änderung der NO_x-EF andeuten würden. Für die NO_x-EF-2035 der automatischen Holzfeuerungen >50 kW (HES-Kategorien 12-19) resultieren, ausser für Pelletfeuerungen, etwas tiefere Werte als für 2020 (-20 % bis -7 %). Dieser Trend ist zu erwarten, da immer mehr Feuerungen mit Low-NO_x-Technologien zum Einsatz kommen, vor allem auch deshalb, da immer mehr Feuerungen in luft-hygienischen Massnahmegebieten erstellt werden, in denen strengere NO_x-Grenzwerte gelten. Im Vergleich zur letzten Erhebung 2014 ergeben sich für 2020 höhere NO_x-EF für Pelletfeuerungen (Kat. 4b, 11b, 12b, 14b und 16b) und Stückholzkessel (Kat. 8, 9) sowie Altholzfeuerungen (Kat. 19) und deutlich tiefere NO_x-EF für WKK-Anlagen (Kat. 18). Für die NO_x-EF wurden für alle Jahre des Rückblicks und alle Feuerungskategorien keine Änderungen gegenüber 2020 angenommen. Die Zunahme der jährlichen NO_x-Emissionen (Abbildung 2, rechts) seit 1990 ist somit nicht auf eine Änderung der Emissionsfaktoren, sondern auf die Zunahme der Holzenergienutzung, insbesondere in automatischen Holzfeuerungen >50 kW deren Anteil 2020 rund 70% der gesamten NO_x-Emissionen aus Holzfeuerungen ausmachen, zurückzuführen.

Wie in Abbildung 2 (links) zu sehen ist, zeigen auch die CO-EF die erwarteten Unterschiede und Proportionalitäten zwischen den Kategorien. Pelletfeuerungen und automatische Feuerungen weisen tiefere EF auf als handbeschickte Feuerungen aus nachfolgenden Gründen:

- Höhere Feuerraumtemperaturen und grössere Feuerräume mit verstärkter Turbulenz und besserer Durchmischung.
- Höhere Ausbrandqualität durch den automatisierten Betrieb und Regelung des Verbrennungsluftüberschusses.
- Strengere LRV-Grenzwerte und -Kontrolle der Einhaltung mit periodischen Messungen.
- Weniger An- und Abfahrvorgänge und geringerer Anteil dieser Phasen am Gesamtbetrieb als bei handbeschickten Feuerungen.

Im Vergleich zur letzten Erhebung 2014 ergeben sich für die meisten Feuerungen <50 kW (Kategorien 2, 3, 4a, 4b, 5, 8, 9 und 11b) höhere Werte. Für Feuerungen zw. 50 kW und 500 kW (Kategorien 12-15) sind die CO-EF-2020 dagegen sehr ähnlich und für automatische Feuerungen >500 kW deutlich tiefer als 2014.

Die PM_{exh}-EF-2020 zeigen ebenfalls die Unterschiede und Abstufungen zwischen den Kategorien entsprechend den erwarteten Trends. Pelletfeuerungen und automatische Feuerungen weisen tiefere EF auf als handbeschickte. Für Kleinfeuerungen wird eine gewisse Abhängigkeit von Feinstaub in Form von Russ und organischem Feinstaub von der Ausbrandqualität vorausgesetzt. Ausserdem wird von einer gewissen Gleichläufigkeit von CO- und Feinstaubemissionen ausgegangen. Bei automatischen Feuerungen dagegen besteht der Feinstaub grossteils aus anorganischen Verbindungen, die durch vollständige Verbrennung nicht vermindert werden und die EF-PM_{exh} werden in erster Linie durch die Abgasreinigung beeinflusst. Bei den automatischen Feuerungen >50 kW (Kategorien 12-19) nehmen die PM_{exh}-EF mit zunehmender Anlagengrösse ab. Neben dem optimaleren Betrieb von grösseren Anlagen mit mehr Betriebsstunden und weniger An- und Abfahrphasen gibt es auch strengere LRV-Staubgrenzwerte für Anlagen >500 kW. Dies macht den Einsatz von Feinstaubabscheidern praktisch unerlässlich und der stabilere Feuerungsbetrieb führt auch zu höheren Verfügbarkeiten der Feinstaubabscheider. Die PM_{exh}-EF für automatische Pelletfeuerungen >50 kW sind tiefer als jene befeuert mit Waldhackschnitzeln und Restholz. Dies ist vor allem auf die homogenere Brennstoffzusammensetzung (Stückigkeit, Wassergehalt, Holzzusammensetzung) zurückzuführen.

Der Vergleich mit der letzten Erhebung 2014 zeigt für 2020 ähnliche PM_{exh} -EF für Feuerungen <50 kW ausser für Pelletfeuerungen (Kategorien 4b und 11b), deren EF-2020 deutlich tiefer sind. Für die automatischen Feuerungen >50 kW resultierten generell tiefere und für die Feuerungen >500 kW sogar deutlich tiefere PM_{exh} -EF als in der letzten Erhebung 2014. Die tiefen Werte für 2020 der Kategorien 16-17 und 19 zeigen, dass in dieser Kategorie der Anteil an Anlagen mit Feinstaubabscheider sehr hoch ist (verfügbare Daten zeigen 67% für Kat. 16a, 85% für Kat. 16b, 50% für Kat. 17 und 100% für Kat. 19). In 2014 wurde dieser Anteil wohl teilweise unterschätzt bzw. durch Erneuerung und Sanierung des Anlagenbestandes wurde der Anteil an Feinstaubabscheidern im Vergleich zu 2014 grösser. Unterschiede der EF-2020 für CO und PM_{exh} zur letzten Erhebung 2014 sind aber auch auf die verbesserte Datenlage zurückzuführen. Für die automatischen Feuerungen >50 kW wurden die EF in dieser Studie ausschliesslich anhand der grossen Menge an vorhandenen Messdaten bestimmt.

Für die Prognose wurden verbesserte Betriebsbedingungen und ein verjüngter Anlagenbestand (Kat. 12-17 und 19) und ein höherer Anteil an «modernen» Feuerungen (Kat. 2, 3, 4a, 5) angenommen. Die CO-EF-2035 zeigen somit deutlich tiefere Werte als für 2020 (bis zu -40%). Für die PM_{exh} -EF-2035 für Feuerungen <50 kW ergeben sich ähnliche Reduktionen wie für CO und für die Kategorien 12a-17 sogar deutlich grössere Reduktionen im Vergleich zu 2020 (-33 % bis -67 %). Diese Reduktionen spiegeln die Erwartung wider, dass bei Neuanlagen und Sanierungen von automatischen Feuerungen >50 kW zu einem sehr grossen Anteil Feinstaubabscheider installiert werden. Für die Kategorien 18 und 19 gibt es keine Reduktion der PM_{exh} -EF-2035, da die Werte für 2020 bereits sehr tief und sehr deutlich unterhalb der geltenden LRV-Grenzwerte liegen. Für jedes Jahr des Rückblicks wurden schlechtere Betriebsbedingungen und ein älterer Anlagenbestand bzw. tiefere Anteile an «modernen» Feuerungen angenommen, wodurch sich der erwartete Trend mit höheren EF bis 1990 ergibt.

Die Resultate der Emissionen zeigen, dass es durch die schrittweisen Verschärfungen der LRV-Grenzwerte und die damit verbundenen Verbesserungen der Feuerungen und des Anlagenbetriebs seit 1990 zu einer deutlichen Reduktion der PM_{exh} - und CO-Emissionen auf ca. einen Viertel im Jahr 2020 gekommen ist (Abbildung 2), obwohl die Energieholznutzung gleichzeitig um rund 60 Prozent zunahm (siehe Abbildung 3). PM_{exh} - und CO-Emissionen von automatischen Feuerungen >50 kW, Holz-WKK und Anlagen für erneuerbare Abfälle machen dabei in 2020 nur 38% und 17% der Gesamtemissionen aus, obwohl sie einen Anteil von rund 70% an der Energieholznutzung haben. Besonders niedrige Schadstoffemissionen weisen Altholzfeuerungen und WKK-Anlagen auf, weshalb ihr Beitrag zu den Gesamtemissionen sehr gering ist (PM_{exh} : 1%, CO: 2%).

Tabelle 2 Übersicht der Emissionsfaktoren der relevantesten Schadstoffe aus der Holzverbrennung für 2020.

HES-Kat.	Bezeichnung	NO _x	CO	VOC [#] = f * CO		PM _{exh} [*]	BC/PM _{2.5,exh}	TSP/PM _{exh} ⁺	SO _x	NH ₃	Benzol ^{**}	Pb	Zn	Cd	Hg	B(a)P & B(b)F	B(k)F & I(cd)P	PCDD/F	PCB	HCB
		[g/GJ]	[g/GJ]	f [%]	[g/GJ]	[g/GJ]	[%]	[-]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[mg/GJ]	[mg/GJ]	[μg I TEQ/GJ]	[μg/GJ]					
1	Offene Cheminées	80	3000	13%	390	100*	70%			5	10							0.5	0.06	
2-4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe	85	2800	13%	360	90	70%			5	10							0.5	0.06	
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	85	390	5%	20	40	40%			2	1							0.05	0.01	
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	70	4000	13%	500	200*	70%	2.0		5	15							0.5	0.06	
8,9	Stückholzkessel	100	1700	6%	100	60	30%		10	2	5			20	300			0.25	0.02	
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	70	4000	13%	500	200*	70%			5	15							0.5	0.06	
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	120	900	7%	60	90	20%			2	2							0.1	0.02	
11b	Pelletkessel <50 kW	70	330	6%	20	30	25%			2	1							0.05		5
12a	Automatische Holzfeuerungen 50-300 kW a.HVB	130	450		30	60				1								0.05		
12b	Pelletkessel 50–300 kW	75	170		10	30				0.4		15	225	1	2			0.05		
13	Automatische Holzfeuerungen 50-300 kW i.HVB	140	460		30	60	5%			1								0.1		
14a	Automatische Holzfeuerungen 300-500 kW a.HVB	130	450		30	60				1								0.05		
14b	Pelletkessel 300–500 kW	75	170	7%	10	30		1.1	3	2	0.4							0.05		
15	Automatische Holzfeuerungen 300-500 kW i.HVB	140	460		30	60				1								0.1		
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB	120	140		10	10				0.4		10	150					0.05		
16b	Pelletkessel >500 kW	75	50		3	5	2.5%			0.2								0.05		
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB	120	150		10	20				0.4								0.1		1
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	40	10	5%	0.5	0.3	1%		1		0.05							0.01		
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	130	60	3%	2	1.4	2.5%		20	5	0.1	100	1200	2				0.05		

#CH₄ und NMVOC wurden mit demselben fixen Faktor α aus VOC berechnet: CH₄ = α * VOC und NMVOC = (1- α) * VOC mit α = 0.3

*PM_{2.5,exh} und PM_{10,exh}, PM_{2.5,TSP} und PM_{10,TSP} sowie PM_{2.5,cond} und PM_{10,cond} wurden mit denselben fixen Faktoren berechnet: PM_{2.5,xx} = PM_{xx} * 0.9 und PM_{10,xx} = PM_{xx} * 0.95

+TSP wurde mit dem Verhältnis TSP/PM_{exh} berechnet (TSP = PM_{exh} * TSP/PM_{exh}) und PM_{cond} aus der Differenz von TSP und PM_{exh} (PM_{cond} = TSP - PM_{exh})

** Berechnet aus Literaturdaten zu den Verhältnissen Benzol/VOC und Benzol/CH₄ und den EF-2020 für VOC und CH₄

1 Ausgangslage und Zielsetzung

Wie anhand der Daten der Holzenergiestatistik von 1990 bis 2020 [2] zu erkennen ist (Abbildung 3), gibt es eine Verschiebung der Nutzung von handbeschickten Feuerungen zu automatischen Feuerungen >50 kW. Die letzte Aktualisierung der Emissionsfaktoren (EF) wurde 2014 abgeschlossen [1]. Darin wurden hauptsächlich Literaturdaten (Publikationen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften, Berichte von Forschungsprojekten und Umweltämtern) und Messergebnisse der Fachgruppe Bioenergie der Hochschule Luzern verwendet. Für automatische Feuerungen >50 kW generell sowie für Schadstoffe der Gruppe 2 (Schwermetalle, PAK, NH₃, SO_x, Benzol, PCDD/F, PCB, HCB) aller Feuerungskategorien konnten in der Aktualisierung 2014 jedoch nur wenige Daten gefunden werden.

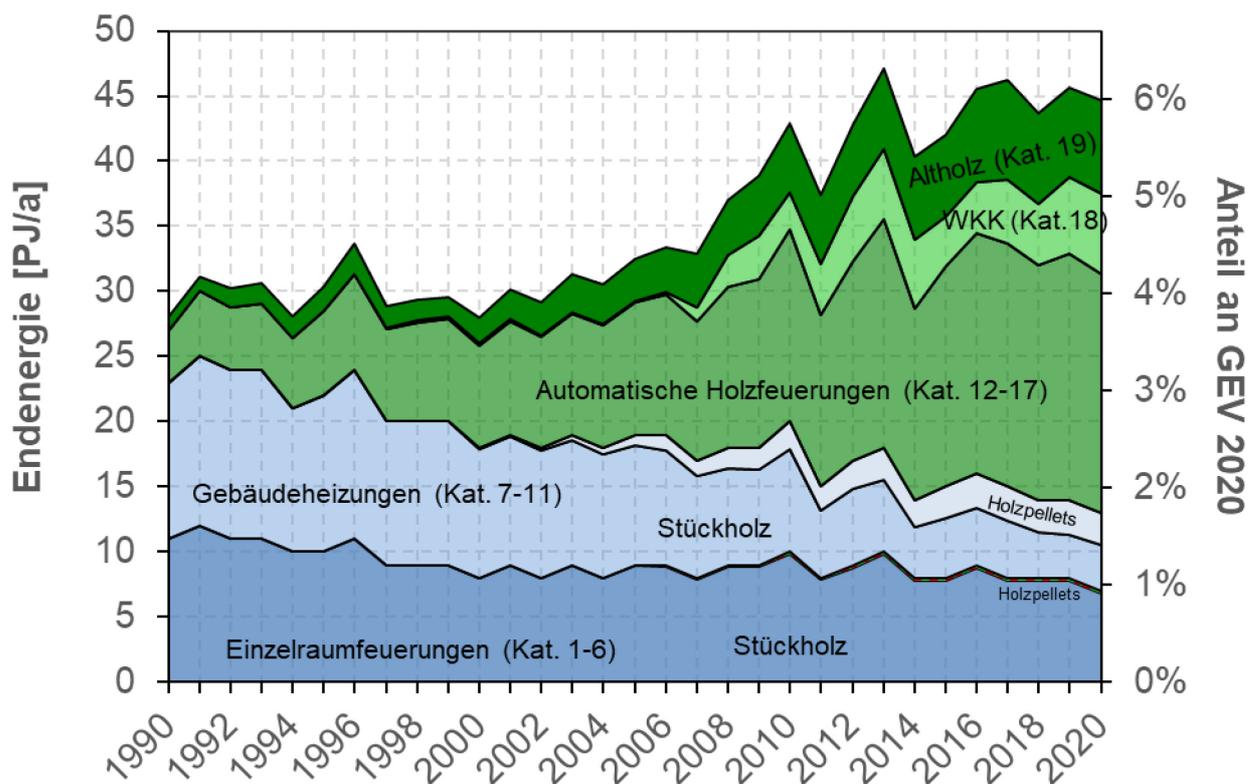


Abbildung 3 Entwicklung der effektiven Holzenergienutzung in der Schweiz von 1990 bis 2020 gemäss Holzenergiestatistik 2020 [2] sowie deren Anteil am Gesamtenergieverbrauch (GEV).

Aufgrund der immer stärkeren Bedeutung der automatischen Feuerungen >50 kW, Holz-WKK und Anlagen für erneuerbare Abfälle (aktuell 70% des Holzenergieverbrauchs), der geringen Datenlage zu diesen Kategorien in der letzten Aktualisierung sowie Technologieänderungen und Verschärfungen der LRV in 2012 und 2018 soll eine erneute Aktualisierung der EF für das Jahr 2020 durchgeführt werden. Zusätzlich haben nun einige Kantone einen grossen Datensatz von LRV-Abnahme- und periodischen Kontrollmessungen von Anlagen >70 kW zur Verfügung gestellt. Ausserdem hat das BAFU im Rahmen des Projekts «Emissionsmessungen an Holzfeuerungen und weiterer Anlagen» zwischen 2018-2020 bei einigen ausgewählten Anlagen >50 kW zusätzlich zu den LRV-Messungen Emissionen der Schadstoffe der Gruppe 2 sowie von NMVOC, CH₄ und BC messen lassen.

Die Aktualisierung der EF-2020 soll für folgender Schadstoffe durchgeführt werden:

- NO_x , CO, VOC, CH_4 und NMVOC
- PM_{exh} , $\text{PM}_{10,\text{exh}}$, $\text{PM}_{2.5,\text{exh}}$, BC, TSP, und PM_{cond}
- Schwermetalle (Pb, Zn, Cd, Hg) und PAK (BaP, BbF, BkF, IcdP)
- NH_3 , SO_x , Benzol, PCDD/F, PCB, HCB.

Dabei soll eine ausführliche Literaturrecherche und Auswertung der verfügbaren aktuellen Messdaten vorgenommen werden. Die aktualisierten EF-2020 sollen einen Standardfall beinhalten, der die für verschiedene Betriebseinflüsse (Benutzerverhalten, Brennstoff, etc.) und Technologien gewichteten Emissionen abbildet. Zusätzlich sollen, wenn möglich, Bandbreiten eingeführt werden, um die Unterschiede zwischen guten und schlechten Bedingungen aufzuzeigen. Dabei sollen, wenn möglich, Berechnungsmodelle erstellt werden, in denen die Inputparameter zur Gewichtung der Technologie und des Betriebseinflusses bei Bedarf einfach verändert werden können. Somit können zukünftig EF aufgrund von Änderungen des Nutzerverhaltens oder der Technologie schnell und einfach angepasst bzw. die Einflüsse auf die gewichteten EF untersucht werden.

2 Datengrundlage

Für die Aktualisierung der Emissionsfaktoren für 2020 wurden sowohl Daten aus einer Literatur-recherche als auch verschiedenste Messdaten zusammengetragen und ausgewertet. Nachfolgend wird beschrieben, welche Daten für die verschiedenen Schadstoffe und Feuerungskategorien verwendet wurden.

2.1 Literatur

Die Literaturrecherche wurde ausschliesslich im Internet durchgeführt. Dabei wurden wissenschaftliche Fachpublikationen und Konferenzbeiträge sowie Berichte von Forschungsinstitutionen, Forschungsprojekten und Umweltbundesämtern berücksichtigt. Ausserdem wurden hauptsächlich Publikationen mit Erscheinungsjahr seit der letzten Aktualisierung und somit nach 2014 selektiert. Vereinzelt wurden auch Publikationen mit Erscheinungsjahr 2014 und älter verwendet, wenn diese relevant und nicht bereits in [1] berücksichtigt sind. Die Literaturrecherche wurde zudem weiter eingegrenzt auf Publikationen mit Feuerungstypen und Brennstoffen, die den in der Schweiz eingesetzten ähnlich sind. Ein weiterer Fokus der Literaturrecherche waren vor allem Emissionsfaktoren (EF), die den realen Betrieb bzw. den gesamten Betriebszyklus abbilden, sowie Daten (EF, Betriebsdauer und Häufigkeit) zu verschiedenen Technologien (alt bzw. konventionell oder neu bzw. modern), die die folgenden Betriebseinflüsse beinhalten:

- Voll- und Teilleistung
- Anfeuern und Ausbrand
- Art des Anfeuerns
- Feuchtigkeit des Brennstoffs.

Von den Literaturstudien, in denen Daten zum realen Betrieb von Feuerungen der Kategorien 2, 3, 4a, 5 und 4b gezeigt werden, sind Publikationen aus dem beReal-Projekt hervorzuheben [4-12]. Darin wurde ein Prüfzyklus für Holz- und Pelletöfen entwickelt, der den realen Betrieb bzw. die Emissionen des realen Betriebs abbilden sollen. Zusätzlich wurden die Emissionen von verschiedenen Prüfzyklen miteinander verglichen und insgesamt 13 Holz- und 4 Pelletöfen untersucht.

Insgesamt wurden Daten aus 63 Publikationen in der Auswertung berücksichtigt. Tabelle 3 zeigt eine Zusammenfassung der Literaturrecherche. Für die Schadstoffe NO_x , CO, VOC, PM_{exh} , und BC wurden zu den Kategorien der Einzelraumfeuerungen (Kat. 1-7) und Gebäudeheizungen (Kat. 8-11b) einige Publikationen gefunden. Da das Emissionsverhalten von Zentralheizungsherden (Kat. 7) vergleichbar ist mit demjenigen von Holzkochherden, werden diese, abweichend zur Holzenergiestatistik, nicht den Gebäudeheizungen, sondern den Einzelraumfeuerungen zugeordnet. Für die automatischen Feuerungen >50 kW sowie für die Schadstoffe der Gruppe 2 (Schwermetalle, PAK, NH_3 , SO_x , Benzol, PCDD/F, PCB, HCB) für alle Feuerungskategorien wurden jedoch nur wenige Daten gefunden. Eine detailliertere Aufschlüsselung der Quellen für Schadstoffe der Gruppe 2 sind in Tabelle A. 22 bis Tabelle A. 36 im Anhang zu finden.

Zur Bestimmung der Anteile bzw. Verhältnisse von CH_4 und VOC (Kapitel 3.5 und Tabelle A. 19 im Anhang A.6), sowie PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ und PM_{exh} (Kapitel 3.6 und Tabelle A. 20 im Anhang A.7) sowie PM_{exh} , PM_{cond} und TSP (Kapitel 3.6 und Tabelle A. 21 im Anhang A.7) wurden teilweise auch Publikationen mitberücksichtigt, die bereits in der letzten Aktualisierung der EF-2014 [1] verwendet wurden.

Tabelle 3 Anzahl der ausgewerteten Publikationen nach Schadstoffen und Feuerungskategorien.

HES-Kat.	Schadstoffe Gruppe 1*						Schadstoffe Gruppe 2*								
	Quelle	NO _x	CO	VOC	PM _{exh}	BC	Quelle	Pb, Zn, Cd, Hg	PAK	NH ₃	SO _x	Ben-zol	PCDD /F	PCB	HCB
1	[3, 13]	1	1	-	-	-	[3, 13]	-	1	-	-	-	-	-	-
2, 3, 4a, 5	[3, 6, 7, 9, 11-38]	14	23	21	16	14	[3, 13, 14, 17, 19, 20, 24, 30-32, 36-44]	5	9	-	2	1	2	1	-
4b	[3, 7, 11-13, 15, 19, 22, 24, 34, 43-55]	18	22	14	8	6	[3, 13, 19, 24, 43, 44, 50-52, 56, 57]	5	7	1	3	-	1	1	-
6,7	[34]	1	1	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8, 9	[3, 15, 22, 36, 41, 49, 58]	2	6	5	4	2	[3, 41, 59, 60]	-	2	-	-	-	1	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11a	[3, 21, 22, 36, 61]	-	3	3	2	3	[36, 61]	1	2	-	-	-	-	-	-
11b	[13, 22, 33, 53, 54, 58, 62]	3	7	6	4	1	[3, 13, 17, 20, 41, 63-65]	2	2	1	4	2	-	-	-
12-17	[3, 15, 66-68]	5	5	1	4	1	[3, 24, 41, 64]	-	3	-	2	-	-	-	-
18-19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

* Anzahl Publikationen zu verschiedenen Kategorien sowie Schadstoffen der Gruppe 1 und 2 kann nicht summiert werden, da einige Publikationen Angaben zu mehreren Feuerungskategorien und Schadstoffen zusammengefasst ausweisen.

2.2 Messdaten

Neben Literaturdaten wurden auch Daten aus Emissionsmessungen in der Schweiz für die Auswertung berücksichtigt, die seit der letzten Aktualisierung der Emissionsfaktoren 2014 [1] (also im Zeitraum 2015 bis 2020) durchgeführt wurden. Eine Übersicht zu den verfügbaren Daten der verschiedenen HES-Kategorien und deren Herkunft ist in Tabelle 4 aufgeführt. Die genauere Beschreibung der Herkunft der Daten ist in den nachfolgenden Kapiteln 2.2.1 bis 2.2.3 zu finden.

Tabelle 4 Übersicht zur Anzahl der Anlagen und Messungen, die ausgewertet wurden sowie zur Datenherkunft. Eine detaillierte Übersicht über die Anzahl Messungen der verschiedenen Schadstoffe ist in Tabelle A. 1 und Tabelle A. 2 im Anhang A.1 zu finden.

Datenherkunft		HES-Kat.									Total
		12a, 14a	12b, 14b	13, 15	16a	16b	17	18	19		
LRV-Emissionsmessungen	Anlagen	547	188	246	222	13	23	12	22	1273	
	Messungen	957	373	443	472	26	39	58	84	2452	
Langzeitmessungen	Anlagen	6	4	9	15	-	1	-	1	36	
	Messungen	6	4	9	15	-	1	-	1	36	
Messungen im Auftrag des BAFU	Anlagen	1	1	1	1	1	3			7	
	Messungen	1	1	1	1	1	3			7	

2.2.1 LRV-Emissionsmessungen

Zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) bei automatischen Holzfeuerungen >70 kW werden Abnahme- und Kontrollmessungen durchgeführt [69]. Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte wird im stationären Betrieb, in der Regel je 30 Minuten bei Voll- und Teilleistung, überprüft [70]. Die Kontrollmessungen werden in der Regel alle zwei Jahre durchgeführt.

Für die Aktualisierung der EF-2020 haben einige Kantone (AG, AR, BE, FR, JU, NW, OW, ZG, ZH; mit den meisten Messberichten aus BE) in Tabellenformat verfügbare LRV-Messdaten für eine anonymisierte Auswertung zur Verfügung gestellt. Die Daten beinhalten Angaben zu Brennstoff und Feuerung (Wärmeleistung und Abgasreinigung) sowie die Messergebnisse der Abnahme- und periodischen Kontrollmessungen. Die Daten liegen für die HES-Kategorien 12-17 und 19 vor, dabei in fast allen Fällen für CO und PM_{exh}, oftmals für NO_x und vereinzelt auch für VOC, Pb und Zn. Das sind jene Schadstoffe, für die Emissionsgrenzwerte in der LRV für die jeweilige HES-Kategorie definiert sind.

Um Messdaten von Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen (WKK, Kategorie 18) in die Auswertung miteinbeziehen zu können, wurden alle Anlagebetreiber der Kategorie 18 vom BFE angefragt, ihre Emissionsmessdaten zur Verfügung zu stellen. Von den total 14 Anlagen (Stand 2019 [2]), die in der Schweiz in Betrieb sind, wurden Daten von 12 Anlagen übermittelt.

Insgesamt konnten für den Zeitraum 2015 bis 2020 somit Daten von 1273 automatischen Holzfeuerungen in der Schweiz ausgewertet werden. Da bei einigen Anlagen mehrere Emissionsmessungen im Auswertez Zeitraum durchgeführt wurden, konnten insgesamt rund 2450 Datensätze berücksichtigt werden (siehe Tabelle 4).

2.2.2 Langzeitmessungen

Die Abnahme- und periodischen Kontrollmessungen zur Überprüfung der Einhaltung der LRV-Emissionsgrenzwerte decken in der Regel nur eine kurze Phase bei stationärem Betrieb der Feuerung ab, die zudem oftmals extra für die Messung optimal eingestellt wurde. Im Praxiseinsatz treten jedoch regelmässig auch instationäre Phasen mit erhöhten Emissionen auf. Um zu kontrollieren, ob die installierten Holzfeuerungen auch unter realen Betriebsbedingungen und über längere Zeit die Emissionsgrenzwerte einhalten, werden von verschiedenen Kantonen deshalb zusätzlich Emissionsmessungen über mehrere Tage, sogenannte „Langzeitmessungen“ (LZM), durchgeführt bzw. verlangt. Diese beurteilen nicht nur die Emissionen des Heizbetriebs, sondern auch des An- und Abfahrens. Zusätzlich liegen auch Daten zu Standby und Glutbettunterhalt vor [71].

Bei LZM werden in der Regel CO, O₂, NO_x und teilweise auch VOC im Abgas gemessen sowie Betriebsdaten der Feuerung (z.B. Abgastemperatur, Abgasvolumenstrom oder Drehzahlen der Ventilatoren, Strom und Spannung des Elektroabscheiders) aufgezeichnet.

Für diese Studie wurden Daten von 36 LZM an automatischen Holzfeuerungen >70 kW (siehe Tabelle 4), die von Verenum AG im Rahmen von „QS Support“ [72] im Zeitraum von 2016 bis 2018 durchgeführt wurden, anonymisiert ausgewertet. Dabei wurden hauptsächlich die Daten der An- und Abfahrphasen (Emissionen und Dauer) sowie von Standby und Glutbettunterhalt (Emissionen) berücksichtigt.

Die 36 LZM wurden hauptsächlich bei Anlagen durchgeführt, bei denen es in der Nachbarschaft Reklamationen gab und die Messungen daher behördlich angeordnet wurden. Zusätzlich wurden die Messungen mehrheitlich in der Übergangszeit zwischen Heizperiode und Sommer durchgeführt. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, dass die EF dieser LZM, vor allem jene für die An- und Abfahrphasen, eher die obere Bandbreite an Werten repräsentieren.

2.2.3 Messungen zusätzlicher Schadstoffe im Auftrag des BAFU

Für Schadstoffe der Gruppe 2 sind nur wenige Daten verfügbar. Diese waren hauptsächlich beschränkt auf Anlagen der Kategorie 18, wobei auch hier nie Daten von allen Schadstoffen der Gruppe 2 gemessen wurden. Einige Daten für Pb und Zn aus den LRV-Messungen waren auch für die Kategorie 19 verfügbar. Daher wurden im Rahmen des Projekts "Emissionsmessungen an Holzfeuerungen und weiterer Anlagen" im Auftrag des BAFU (2018-2020) bei behördlichen LRV-Messungen an einigen ausgewählten, automatischen Feuerungen >50 kW zusätzlich die Emissionen der Schadstoffe der Gruppe 2, wie auch NMVOC, CH₄ und BC gemessen. Da solche Messungen aufwändig und vor allem auch limitiert sind durch die Anlagenzugänglichkeit, die Anzahl und Verfügbarkeit der Messstutzen sowie die Messdauer, wurden nur sieben Anlagen untersucht (siehe Tabelle 4). Die Messungen wurden nach den Messempfehlungen des BAFU durchgeführt [70, 73]. Das bedeutet, dass die Emissionen während der stationären Betriebsphase im Voll- und Teilleistungsbereich im Reingas (also nach der Abgasreinigung) gemessen wurden.

3 Methodische Grundlagen

3.1 Feuerungskategorien

Die Aktualisierung der Emissionsfaktoren 2020 wurde für die Feuerungskategorien 1-19, die in der Holzenergiestatistik (HES, [2]) aufgeführt sind, durchgeführt (Tabelle 1). Analog zur letzten Aktualisierung der EF-2014 [1] werden dabei folgende Kategorien zusammengefasst und somit dieselben EF zugewiesen:

- 2, 3, 4a, 5
- 6, 7
- 8, 9
- 12a, 14a (für Schwermetalle und PAK jedoch separat)
- 12b, 14b (für Schwermetalle und PAK jedoch separat)
- 13, 15 (für Schwermetalle und PAK jedoch separat).

3.2 Datenauswertung

3.2.1 Umrechnung von mg/m_n^3 auf mg/MJ

Die Messdaten waren alle in mg/m_n^3 ausgewiesen und wurden mit Formel (1) aus [74] in g/GJ (Gramm pro Gigajoule Endenergie angegeben als Heizwert) umgerechnet.

$$f = \frac{\lambda_{\text{Bezug}} \cdot V_{L,\text{min}}}{H_{i,\text{atro}} - \Delta h_v \cdot u} = \frac{\lambda_{\text{Bezug}} \cdot 4.55}{18.3 - 2.50 \cdot u} \quad (1)$$

λ_{Bezug}	... Luftüberschusszahl bei Bezugssauerstoffgehalt [-]
$V_{L,\text{min}}$... stöchiometrische Verbrennungsluftmenge bei 0°C [m_n^3/kg]
$H_{i,\text{atro}}$... Heizwert für trockenes Holz bei 0°C [MJ/kg]
Δh_v	... Verdampfungsenthalpie von Wasser bei 0°C [MJ/kg]
u	... Holzfeuchtigkeit [-]

Diese Umrechnung ist abhängig von der Holzfeuchtigkeit bzw. vom Wassergehalt des Brennstoffs. Da in den Messdaten der LRV-Emissionsmessungen und den Langzeitmessungen grösstenteils und teilweise auch in den Literaturdaten Angaben zum Wassergehalt fehlen, wurden die Brennstoffe wie folgt in «feucht» und «trocken» eingeteilt:

- trocken: Restholz, Pellets, Altholz, Stückholz
- feucht: Waldhackschnitzel

In Tabelle A. 3 im Anhang A.2 sind die Umrechnungsfaktoren von mg/m_n^3 in g/GJ für unterschiedliche Wassergehalte und Holzfeuchtigkeiten für die zwei relevanten Bezugssauerstoffgehalte (13 Vol.-% für Feuerungen <1 MW und 11 Vol.-% für Feuerungen >1 MW) gemäss LRV [69]) angeführt. Die Umrechnungsfaktoren für verschiedene Wassergehalte des Brennstoffs unterscheiden sich nur geringfügig, so dass sich bei der Rundung auf eine Nachkommastelle nur je ein Umrechnungsfaktor für «trockenes» und «feuchtes» Holz ergibt. Je nach Bezugssauerstoff wurden Wassergehalte bis 20 % bzw. 30% als

«trocken» und alles darüber als «feucht» verwendet. Diese Einteilung entspricht in etwa auch den Angaben zum Wassergehalt im BAFU-Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen [75] und der HES. Folgende Umrechnungsfaktoren wurden verwendet:

- 1 g/GJ = 1.5 mg/m³ für trockenes Holz bei 13 Vol.-% O₂
- 1 g/GJ = 1.4 mg/m³ für feuchtes Holz bei 13 Vol.-% O₂
- 1 g/GJ = 1.9 mg/m³ für trockenes Holz bei 11 Vol.-% O₂
- 1 g/GJ = 1.8 mg/m³ für feuchtes Holz bei 11 Vol.-% O₂

Wenn in der Literatur Emissionsfaktoren in mg/MJ ausgewiesen werden, fehlen häufig Angaben zur Umrechnung. Es wird davon ausgegangen, dass in der Regel mit konstanten Umrechnungsfaktoren gerechnet wird und dass sich diese auf trockenes Holz beziehen.

3.2.2 LRV-Emissionsmessungen

Mit den Daten der LRV-Emissionsmessungen wurden EF für Voll- und Teilleistung für die Kategorien 12-17 und 19 ermittelt, die dann im EF-Modell für diese Kategorien verwendet wurden (siehe Kapitel 3.4.4). Um die verfügbaren Daten zu verwenden, waren folgende Bearbeitungsschritte notwendig:

- Einteilung in die HES-Kategorien anhand von Feuerungswärmeleistung (FWL) und Brennstoff
- Zuordnung in Kategorien «innerhalb Holzverarbeitungsbetrieben (i.HvB)» anhand des Brennstoffs «Restholz»
 - Gewichtung der Daten der Kategorien i.HvB (Kategorien 13, 15 und 17), da in i.HvB Anlagen nicht ausschliesslich Restholz verbrannt wird.
 - Da für diese Gewichtung keine Datengrundlage vorhanden war, wurde diese anhand der Anteile der Anlagen der Kategorien i.HvB und a.HvB an der Summe aller Anlagen (ohne Pelletfeuerungen) des jeweiligen Leistungsbereichs (vorgenommen. Das Beispiel für die Kategorie 13 ist in Formel (2) zu sehen.

$$EF_{Kat.13,gewichtet} = EF_{Kat.13} * \frac{A_{Kat.13}}{A_{Kat.13+Kat.12a}} + EF_{Kat.12a} * \frac{A_{Kat.12a}}{A_{Kat.13+Kat.12a}} \quad (2)$$

- Zuordnung der Messungen in Voll- und Teilleistung
 - >70 % FWL = Volleleistung; <40 % FWL = Teilleistung
- Umrechnung in mg/MJ mit Berücksichtigung des Wassergehalts (siehe Kapitel 3.2.1)

Bei der Einteilung in die HES-Kategorien nach Brennstoff und FWL musste der gesamte Datensatz überprüft und Korrekturen vorgenommen werden, da bei Stichprobenkontrollen einige Fälle mit offensichtlich falschen Angaben zum Brennstoff bzw. der Brennstoffkategorie nach LRV entdeckt wurden. Ein Beispiel einer solchen Falschangabe ist die Brennstoffkategorie 1a nach LRV (naturbelassenes stückiges Holz, z.B. Scheitholz) für Anlagen mit FWL von mehreren hundert kW und Feuerungshersteller, die keine Stückholzkessel >70 kW im Sortiment haben.

Neben den Schritten zur Datenaufbereitung musste auch ein Auswertzeitraum festgelegt werden. Die Messberichte liegen bis ins Jahr 1992 zurück vor, 98 % der verfügbaren Messungen wurden jedoch ab 2007 bis 2019 erhoben. Zur Berechnung der EF für Voll- und Teilleistung für das EF-Modell (siehe Kapitel 3.2.1) wurde der Zeitraum 2015 bis 2019 gewählt. Zum einen wurde die letzte Aktualisierung 2014 vorgenommen [1] und andererseits führen kürzere Zeiträume (z.B. 2-Jahresschritte) zu einer zu geringen Anzahl an Daten von einzelnen Kategorien (vor allem Kat. 16a, 17 und 19, siehe Abbildung A.

1 im Anhang A.2). Ausserdem zeigen die Emissionen im Zeitraum 2015-2019 keine grossen Änderungen (siehe Abbildung A. 2 im Anhang A.2).

Die in Tabellenformat verfügbaren Messberichte stammen aus neun Kantonen (AG, AR, BE, FR, JU, NW, OW, ZG, ZH) und ein Grossteil davon nur aus einem Kanton (BE). In diesen Daten sind jedoch Messberichte aus kleinen und grossen Kantonen, unterschiedlichen Landesteilen (ausser Tessin), Berggebieten, der Agglomeration und Städten vorhanden, wodurch angenommen werden kann, dass die verfügbaren Daten repräsentativ sind für alle Anlagen der jeweiligen HES-Kategorie der gesamten Schweiz.

3.2.3 Langzeitmessungen

In der Standardauswertung der LZM werden, die auf den Bezugssauerstoff normierten 24 h-Mittelwerte während des Feuerungsbetriebs, die nicht normierten Emissionen der An- und Abfahrvorgänge pro 24 h sowie die Dauer der Grenzwertüberschreitungen pro 24 h ermittelt. Diese Werte werden jedoch nur für CO ausgewiesen und teilweise nur in grafischer Form dargestellt.

Tabelle 5 Übersicht über die verfügbaren Daten der LZM. Der Grund für die unterschiedliche Anzahl an Daten für verschiedene Betriebsphasen und Messparameter ist, dass nicht bei jeder untersuchten Anlage alle Betriebsphasen aufgetreten sind und/oder alle Parameter gemessen wurden.

Kategorie	Betriebs-bedingung	Anzahl Anlagen	Anzahl CO Messungen	Anzahl NO _x Messungen	Anzahl VOC Messungen	Anzahl Daten Q _F #
12a, 14a, 13, 15	Anfahren	14	14	12	1	14
	Abfahren	14	14	12	1	14
	Regelbetrieb	15	15	13	1	15
	Feuerungsbetrieb	15	15	13	1	15
	Teilleistung	14	14	12	1	14
	Volleistung	10	10	8	0	10
	Gb*-Unterhalt	6	4	3	0	4
	Standby	15	15	13	1	15
12b, 14b, 16b	Anfahren	4	4	3	0	3
	Abfahren	4	4	3	0	3
	Regelbetrieb	4	4	3	0	3
	Feuerungsbetrieb	4	4	3	0	3
	Teilleistung	4	4	3	0	3
	Volleistung	2	2	2	0	2
	Gb*-Unterhalt	1	0	0	0	0
	Standby	4	4	3	0	3
16a, 17, 19	Anfahren	13	11	4	5	11
	Abfahren	13	11	4	5	11
	Regelbetrieb	17	17	8	5	17
	Feuerungsbetrieb	17	16	7	4	16
	Teilleistung	17	17	8	5	17
	Volleistung	6	6	5	1	6
	Gb*-Unterhalt	11	5	2	3	5
	Standby	15	13	6	5	13

* Gb ... Glutbettunterhalt

#Q_F ... prozentuale Feuerungswärmeleistung

Aus diesem Grund mussten die Rohdaten der 36 LZM erneut ausgewertet werden, um folgende Werte von jeder untersuchten Feuerung zu ermitteln, die dann im EF-Modell für die Kategorien 12-17 und 19 verwendet wurden (siehe Kapitel 3.4.4):

- Mittlere Dauer aller An- und Abfahrvorgänge

- Mittelwert der Emissionen und Sauerstoffgehalte aller An- und Abfahrvorgänge, sowie zusätzlich des Standby- und des Glutbettunterhaltbetriebs
- Zusätzlich zu CO wurden auch die Emissionen von NO_x und VOC ausgewertet, falls diese Daten vorhanden waren
- Mittlere prozentuale Feuerungswärmeleistung der verschiedenen Betriebsphasen

Da nicht für jede Kategorie Daten verfügbar waren, bzw. teilweise nur wenige Daten vorlagen, wurden folgende Kategorien zusammengefasst:

- 12a, 14a, 13 und 15
- 12b, 14b und 16b
- 16a, 17 und 19

Eine Übersicht über die Anzahl an verfügbaren Anlagen und verfügbaren Emissionsdaten ist in Tabelle 5 zu finden.

3.2.4 Nachweisgrenze

Bei der Auswertung der Messungen, die im Auftrag des BAFU durchgeführt wurden und den LRV-Messdaten der Kategorie 18 gab es für verschiedene Schadstoffe teilweise Werte, die unter der Nachweisgrenze lagen. Um die Daten trotzdem berücksichtigen zu können, wurde für Schadstoffe der Gruppe 1 das Vorgehen angewendet, das in der BAFU-Messempfehlung [73] empfohlen wird. Bei Messwerten unter der Nachweisgrenze wird die halbe Nachweisgrenze eingesetzt. Für Schadstoffe der Gruppe 2 werden die tiefsten Werte der halben Nachweisgrenze eingesetzt, die in den Messungen im Auftrag des BAFU ausgewiesen wurden. Diese Werte sind deutlich tiefer als die üblichen Werte, da längere Probenahmedauern oder sensitivere Messmethoden verwendet wurden.

3.3 Rundung

Die finalen EF (Tabelle 7 bis Tabelle 11 in Kapitel 4) wurden grösstenteils wie folgt gerundet:

- Zahlen ≥ 4 wurden auf ganze 10-er oder 5-er Stellen gerundet. Ein Beispiel für die Rundung auf 5-er Stelle ist die Rundung des Werts 84 bzw. 86 auf den finalen EF von 85.
- Zahlen ≥ 500 wurden auf ganze 50-er Stellen gerundet.
- Zahlen 1-2 wurden in der Regel auf 1 Nachkommastelle gerundet, teilweise auch auf 1.5.
- Bei Zahlen <1 wurde die Anzahl der Nachkommastellen individuell je nach Schadstoff festgelegt.
- Für die EF der PM-Fractionen von TSP und PM_{cond} wurden teilweise auch ein bis zwei Nachkommastellen bei grösseren Zahlen verwendet, damit die Unterschiede zwischen den verschiedenen Fraktionen erkennbar sind.

3.4 EF-2020 – NO_x, CO und PM_{exh}

3.4.1 HES Kat. 2, 3, 4a, 5

Zur Bestimmung der EF für Raumheizer für feste Brennstoffe (Kategorie 2,3,4a,5) wurde ein Modell angewendet, das verschiedene Betriebseinflüsse und Technologien berücksichtigt. Der gewichtete EF des jeweiligen Schadstoffs x (EF_x) wurde mit Formel (3) berechnet:

$$EF_x = A_{tech} \cdot \sum_i EF_{x,optimal,mod} \cdot A_{Betr,i} \cdot V_{x,Betr,i} + (1 - A_{tech}) \cdot \sum_i EF_{x,optimal,konv} \cdot A_{Betr,i} \cdot V_{x,Betr,i} \quad (3)$$

$EF_{x,optimal,mod}$... Emissionsfaktor des Schadstoffs x für Feuerungen mit moderner Technologie, ohne Gewichtung für den Betriebseinfluss
$EF_{x,optimal,konv}$... Emissionsfaktor des Schadstoffs x für Feuerungen mit konventioneller Technologie, ohne Gewichtung für den Betriebseinfluss
A_{tech}	... Anteil an Feuerungen mit konventioneller Technologie am Gesamtanlagenbestand
$A_{Betr,i}$... Anteil der jeweiligen Betriebsweise i am gesamten Feuerungsbetrieb
$V_{x,Betr,i}$... Verhältnis des EF des Schadstoffs x bei Betriebsweise i zum EF des optimalen Betriebs

Mit diesem Modell können durch Variation der Anteile der verschiedenen Betriebsweisen und der Technologie auch Bandbreiten für die EF-2020, sowie die EF der Zukunft (EF-2035) und die EF der Vergangenheit berechnet werden. Die Ergebnisse für die Schadstoffe NO_x, CO und PM_{exh} sind in Tabelle 7 in Kapitel 4.1.1 zu finden. Nachfolgend wird die Herleitung der einzelnen Parameter in Formel (3) beschrieben.

Emissionsfaktoren des «optimalen Betriebs» ($EF_{x,optimal}$)

EF, die den «optimalen Betrieb» (sog. best-case) der Feuerungen repräsentieren, bezeichnen EF, die den gesamten Abbrand inklusive Startphase (ab Schliessen der Ofentür oder kurz danach) und Ausbrand, abbilden. Zusätzlich wurden für den Abbrand des «optimalen Betriebs» kein übermässig feuchtes Holz verwendet, das Holz von oben angezündet und die EF nicht durch nicht-optimale Betriebsweisen negativ beeinflusst. Für die EF des «optimalen Betriebs» für Feuerungen mit konventioneller Technologie ($EF_{x,optimal,konv}$) und moderner Technologie ($EF_{x,optimal,mod}$) wurden dann der Median aus den entsprechenden Literaturdaten gebildet und die Ergebnisse in Tabelle A. 4 im Anhang A.3 zusammengestellt.

Abschätzung des Anteils der verschiedenen Technologie (A_{tech})

Zur Abschätzung des Anteils der Technologie (A_{tech}) wurden Daten zum Anlagenbestand der Kategorien 2, 3, 4a, 5 aus der HES (Tabelle A) [2] herangezogen. In der HES gibt es nur Zahlen zum Anlagenbestand zu verschiedenen Jahren, jedoch keine Angaben zur Technologie der Feuerungen. Um den Anteil verschiedener Technologien für das Jahr 2020 abzuschätzen, wurden drei Zeitperioden erstellt und mit einer Annahme einer mittleren Lebensdauer von 25 Jahren (ausgehend von Tabelle I.1, HES) die Anzahl der Anlagen mit dem Baujahr der drei Zeitperioden im Jahr 2020 ermittelt (siehe Tabelle A. 5 im Anhang A.3). Für die Anlagen in den verschiedenen Perioden musste der Anteil der Technologie angenommen werden. Es wurde dafür nur eine Klassifizierung in die Technologie „konventionell“ und

„modern“ vorgenommen (siehe Tabelle A. 5 im Anhang). Diese Klassifizierung schliesst die Begriffe „alt“ bzw. „neu“ oder „eco-labelled“ ein und beschreibt Feuerungen mit einstufiger Verbrennung (Technologie „konventionell“) und mehrstufiger Verbrennung (Technologie „modern“). Der Anteil der Technologie „modern“ und „konventionell“ im Jahr 2020 wurde dann als gewichteter Mittelwert der Anteile der Anlagen der drei Zeitperioden im Jahr 2020 und des Anteils der Technologie in der jeweiligen Zeitperiode berechnet.

Die Berechnung ergab einen Anteil von 56 % Anlagen mit „konventioneller“ und 44 % „moderner“ Technologie im Jahr 2020. Eine Literaturrecherche zeigt, dass der Anteil an „alten/konventionellen“ Feuerungen in Ländern, die mit der Schweiz vergleichbar sind, zwischen 20 % und 50 % beträgt (siehe Tabelle A. 6 im Anhang A.3). Der tiefere Anteil an modernen Feuerungen in der Schweiz kann einerseits mit eher konservativen Annahmen im Berechnungsmodell (eventuell zu hohe Lebensdauern der Anlagen im Vergleich zum Ausland, zu hohe Anteile an konventionellen Feuerungen in den verschiedenen Perioden) erklärt werden. Andererseits ist ein Vergleich auch nur bedingt möglich, da in anderen Ländern teilweise noch weitere Kategorien unterschieden werden (modern und eco-labelled sowie Kachelöfen) und die Zeitperioden für die Einteilung in „alt“ bzw. konventionell anders sind.

Abschätzung des Betriebseinflusses ($A_{Betr,i}$ und $V_{XBetr,i}$)

Folgende Betriebsweisen wurden im Modell berücksichtigt:

- Anzünden von unten
- Anzünden mit Zeitungspapier
- Betrieb mit feuchtem Holz
- Betrieb mit Überladen der Brennkammer
- Betrieb mit Reduzierung der Luftzufuhr
- «optimaler Betrieb»: Anzünden von oben und geeigneter Holzfeuchtigkeit.

Die Anteile ($A_{Betr,i}$) der jeweiligen Betriebsweisen am durchschnittlichen Betrieb (sog. Standardfall) des gesamten Anlagenbestandes der Kategorie 2, 3, 4a, 5 wurden angenommen (siehe Tabelle A. 7 im Anhang A.3), da dazu keine verwertbaren Literaturangaben gefunden wurden. Ausserdem wurde keine Kombinationen der verschiedenen Betriebsweisen berücksichtigt. Dies kommt zwar durchaus in der Realität vor, aber da bereits die Anteile der einzelnen Betriebsweisen nicht bekannt sind und angenommen werden müssen, würde eine Kombination zu noch mehr Annahmen führen und wurde daher nicht berücksichtigt. Eine Plausibilitätskontrolle zu den getroffenen Annahmen ist indirekt möglich, indem der finale gewichtete EF mit den EF-2014 [1] und den Werten des EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] verglichen werden (siehe Kapitel 4.1.1).

Neben dem «Standardfall» wurde durch Änderungen der Anteile des Betriebseinflusses auch der sog. «Worst-Case» bestimmt. Dazu wurden nur die zwei Betriebseinflüsse mit den höchsten EF für CO, PM_{exh} und VOC mit einem Anteil von je 50% berücksichtigt (siehe Tabelle A. 9 im Anhang A.3).

Die Verhältnisse der EF der verschiedenen Betriebseinflüsse zu den EF des «optimalen» Betriebs der jeweiligen Schadstoffe ($V_{XBetr,i}$) wurden anhand verschiedener Literaturdaten ermittelt (siehe Tabelle A. 8 im Anhang A.3).

3.4.2 HES-Kategorie 4b

Zur Bestimmung der EF für Pelletöfen (Kategorie 4b) wurde ebenfalls versucht, dasselbe Modell, welches für automatische Feuerungen >50 kW (Kategorien 12-17 und 19, siehe Kapitel 3.4.4) angewendet wurde, zu verwenden. Dazu wurden Daten in der Literatur zu EF für Start und Stopp sowie deren Dauer und EF für Voll- und Teilleistung gesucht. Der Betrachtungszeitraum, die Anzahl an Start und Stopps sowie eine Verteilung zwischen Voll- und Teilleistung und der Anteil des Standby/Stillstands mussten in diesem Modell angenommen werden.

Im Vergleich zu den EF aus beReal, dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 und anderen Quellen (Tabelle A. 11 im Anhang A.4) zeigt das Modell (4h Betrachtungszeitraum, 2 An- und Abfahrvorgänge, 20% Stillstand, je 50% Betriebszeit mit Voll- und Teillast) für CO und PM_{exh} die höchsten Werte, auch im Vergleich zu Messungen nach beReal, die sogar drei Starts beinhalten. Ausserdem ist nur eine begrenzte Anzahl an Literaturdaten zu Start und Stopp vorhanden, vor allem für PM_{exh} hauptsächlich wegen der kurzen Dauer dieser Perioden (max. 30 min, siehe Tabelle A. 12 im Anhang A.4).

Aufgrund der geringen Datenlage zu Start und Stopp und der Unsicherheiten, die wegen der Annahmen zum Betrieb gemacht werden mussten, wurde nicht das EF-Modell verwendet, sondern EF aus dem beReal-Projekt. Der beReal-Prüfzyklus beinhaltet verschiedene Betriebsphasen (1 Kalt- und 2 Warmstarts, Voll- und Teillastbetrieb, Lastwechsel, Standby und Reinigungszyklen), basierend auf Nutzerbefragungen in zahlreichen europäischen Ländern und ist in Publikationen dokumentiert [12, 24, 45, 47]. Im beReal-Projekt wurden zudem Faktoren zwischen den EF aus dem beReal-Prüfzyklus und den EF aus Typenprüfungen für Voll- und Teilleistung erhoben. Durch die Korrektur der EF für Voll- und Teilleistung mit diesem «beReal-Faktor» konnte somit eine grössere Anzahl an Literaturdaten verwendet werden (siehe Tabelle 3). Aufgrund fehlender Literaturdaten wurde jedoch keine Differenzierung für unterschiedliche Technologien oder Baujahre vorgenommen. Für die EF-2020 der Kategorie 4b wurde dann der Median über alle verfügbaren Literaturdaten (beReal und andere Studien mit beReal Faktor korrigiert) gebildet. Die Ergebnisse für die Schadstoffe NO_x, CO und PM_{exh} sind in Tabelle 7 in Kapitel 4.1.1 zu finden.

3.4.3 HES-Kategorien 8, 9 sowie 11a und 11b

Zur Bestimmung der EF für Stückholzkessel <50 kW (Kategorie 8) und >50 kW (Kategorie 9) sowie für automatische Holzfeuerungen <50 kW (Kategorie 11a) und Pelletkessel <50 kW (Kategorie 11b) wurden ausschliesslich Literaturdaten ausgewertet. Dabei wurden nur Studien berücksichtigt, die so gut wie möglich EF des realen Betriebs widerspiegeln. Für Stückholzkessel wurden nur Publikationen berücksichtigt, die EF des ganzen Abbrands bzw. grosse Anteile davon (mindestens inklusive Start oder Ausbrand) beinhalten. Für die Kategorien 11a und 11b wurden keine Studien gefunden, die EF der Startphase oder des Ausbrands untersucht haben. Es wurden daher alle Publikationen in der Auswertung berücksichtigt, in denen Daten zu Voll- und Teilleistung vorhanden sind. Lagen die EF dazu separat vor, wurde ein gewichteter Mittelwert mit einem Anteil von je 50 % berechnet. Aufgrund der geringen Datenlage (je nach Kategorie konnten nur 4-7 Studien für die Auswertung verwendet werden, siehe Tabelle 3), wurde keine Gewichtung für unterschiedliche Technologien vorgenommen. Für die vier Kategorien gab es zumindest Daten zu EF aus der Studie des Nordic Council [22], in der ebenfalls versucht wurde, EF des realen Betriebs abzuschätzen. Diese wurden dann für die nationalen Emissionsinventare der beteiligten nordischen Länder herangezogen. Für die EF-2020 der Kategorien 8, 9 sowie 11a und

11b wurde der Median über alle verfügbaren Literaturdaten gebildet. Die Ergebnisse für die Schadstoffe NO_x, CO und PM_{exh} sind in Tabelle 7 in Kapitel 4.1.1 zu finden.

3.4.4 HES-Kategorien 12-17 und 19

Zur Bestimmung der EF für NO_x, CO und PM_{exh} für automatische Feuerungen >50 kW (Kategorie 12-17 und 19) wurde ein Modell angewendet, das verschiedene Betriebseinflüsse berücksichtigt.

$$EF_i = \frac{\sum(EF_{i,j} \cdot t_i \cdot Q_{F,i})}{\sum(t_i \cdot Q_{F,i})} \quad (4)$$

$EF_{i,j}$... Emissionsfaktor des Schadstoffs i für die Betriebsphase j in [g/GJ]
t_i	... Anteil der Zeit im Betrachtungszeitraum der Betriebsphase i in [%]
$Q_{F,i}$... prozentuale Feuerungswärmeleistung der Betriebsphase i in [%]

Dabei wurden folgende Betriebsphasen im Modell berücksichtigt:

- An- und Abfahren
- Betrieb mit Voll- und Teilleistung
- Standby
- Stillstand.

Mit diesem Modell können durch Variation der Anteile der verschiedenen Betriebsphasen auch Bandbreiten für die EF-2020 berechnet werden. Nachfolgend wird die Herleitung bzw. Datenquelle der einzelnen Parameter in Formel (4) beschrieben.

Emissionsfaktoren der verschiedenen Betriebsphasen ($EF_{i,j}$):

- Die EF für NO_x und CO für An- und Abfahren sowie Standby wurden mit der Datenauswertung der Langzeitmessungen ermittelt (siehe Kapitel 3.2.3). Die EF für Standby sind dabei der Mittelwert aus den EF für Standby und Glutbettunterhalt. Für den Stillstand wurden EF mit einem Wert von 0 g/GJ angenommen.
- Für EF für Voll- und Teilleistung für NO_x, CO und PM_{exh} wurden die Daten aus der Auswertung der LRV-Emissionsmessungen herangezogen (siehe Kapitel 3.2.2)
- Für PM_{exh} sind keine Daten in den Langzeitmessungen verfügbar. Daher mussten die EF von PM_{exh} für die Betriebsphasen An- und Abfahren sowie Standby abgeschätzt werden. Dies erfolgte über das Verhältnis von PM_{exh} dieser Betriebsphasen zum Betrieb mit Volleleistung. Für die beiden Verhältnisse Start/Volleistung und Stopp/Volleistung wurde aus Literaturdaten ein Wert von 5 bestimmt und für Standby/Volleistung wurde ein Wert von 1 angenommen. Eine detailliertere Beschreibung zur Herleitung dieser Verhältnisse ist im Anhang A.5 zu finden und deren Einfluss bzw. die Unsicherheit im EF-Modell in Formel (4) wurde durch eine Sensitivitätsanalyse untersucht (siehe Kapitel 4.3.4).

Anteil der Dauer der jeweiligen Betriebsphase am gesamten Betrachtungszeitraum (t_i):

Für das EF-Modell in Formel (4) müssen zur Berechnung von t_i folgende Annahmen getroffen werden:

- Betrachtungszeitraum
- Anteil von Stillstand und Standby

- Anzahl Starts und Stopps
- Anteil des Betriebs mit Voll- und Teilleistung.

Es wurde ein Betrachtungszeitraum von 24 h gewählt. Die Annahmen zum Anteil von Stillstand und Standby wurden anhand der Erfahrungen der Fachstelle QM Holzheizwerke getroffen und so gewählt, dass sich ein realistischer Jahresnutzungsgrad ergibt. Auch die Anzahl Starts und Stopps und die Verteilung zwischen dem Betrieb mit Voll- und Teilleistung wurden anhand der Erfahrungen von QM Holzheizwerke angenommen. Die durchschnittliche Dauer der An- und Abfahrphasen wurde aus den Daten der Langzeitmessungen bestimmt (siehe Kapitel 3.2.3). Durch die Veränderung der Parameter konnte dann eine Bandbreite der Emissionsfaktoren für den «Best Case», den «Standardfall» und den «Worst Case» bestimmt werden. Die detaillierten Werte der Eingabeparameter für t_i sind in Tabelle A. 14 im Anhang A.5 zu finden.

Die gewählten Annahmen für die Eingabeparameter wurden zusätzlich auch noch anhand von Daten von 30 Holzfeuerungsanlagen überprüft, die im Zuge einer Begleitung durch QM Holzheizwerke [76] erhoben wurden (siehe Tabelle A. 18 im Anhang A.5).

Prozentuale Feuerungswärmeleistung der verschiedenen Betriebsphasen ($Q_{F,i}$)

Die Zahlen für $Q_{F,i}$ wurden aus den Daten der Langzeitmessungen (siehe Kapitel 3.2.3) bestimmt. $Q_{F,i}$ wurde dabei aus den Signalen der Primärluftventilatoren oder, wenn diese fehlten, aus den Signalen der Abgasventilatoren berechnet. Da $Q_{F,i}$ aus dem Signal des Primärluftventilator eine bessere Korrelation mit der «konventionell» berechneten Feuerungswärmeleistung zeigt und bei kleineren Feuerungen (<500 kW) meist kein Primärluftventilator vorhanden ist, wurden zur Bestimmung von $Q_{F,i}$ aus den Daten der Langzeitmessungen nur Anlagen > 500 kW ausgewertet, also Anlagen der Kategorie 16a, 17 und 19. Da je nach Betriebsphase für diese drei Anlagenkategorien nur zwischen 6 und 13 Datensätze vorhanden waren, wurde aus allen verfügbaren Daten der verschiedenen Kategorien ein mittleres $Q_{F,i}$ bestimmt, das auf alle Kategorien 12-17 und 19 angewendet wurde. Die detaillierten Werte von $Q_{F,i}$ für die unterschiedlichen Betriebsphasen sind in Tabelle A. 15 im Anhang A.5 zu finden.

Sensitivitätsanalyse

Um den Einfluss der verschiedenen Eingabeparameter und Annahmen im EF-Modell zu zeigen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein Parameter verändert und alle anderen blieben unverändert. Folgende Parameter bzw. Annahmen wurden untersucht:

- Änderung der Anzahl An- und Abfahrvorgänge
- Änderung des Verhältnisses Start und Stopp zu Volleleistung zur Berechnung von PM_{exh} für die An- und Abfahrphase aus den EF- PM_{exh} für Volleleistung
- Änderung des Standby-Anteils
- Änderung am Verhältnis zwischen dem Betrieb mit Voll- und Teilleistung
- Einfluss auf PM_{exh} wenn nur Anlagen mit Feinstaubabscheider berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Kapitel 4.3.4 beschrieben.

3.4.5 HES-Kategorie 18

Zur Bestimmung der EF für NO_x, CO und PM_{exh} von WKK-Anlagen (Kategorie 18) wurden ausschliesslich die zur Verfügung stehenden LRV-Messdaten (siehe Kapitel 2.2.1) ausgewertet. Diese stammen von 12 der 14 Anlagen, die 2019 in der Schweiz in Betrieb waren und beinhalten 58 Messungen aus den Jahren 2010 bis 2019. Die 58 Datensätze werden dominiert von den vier grössten Anlagen, die zusammen 80 % der Leistung ausmachen. Da diese vier Anlagen Leistungen von 27 MW bis 42 MW aufweisen und WKK-Anlagen in der Regel sehr stabil und mit vielen Betriebsstunden betrieben werden, wurde zur Bestimmung der EF für die Kategorie 18 keine Gewichtung für den Betriebseinfluss vorgenommen. Für die EF-2020 der Schadstoffe NO_x, CO und PM_{exh} wurde der Median über alle verfügbaren Daten gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 in Kapitel 4.1.1 zu finden.

3.5 EF-2020 – VOC, CH₄, NMVOC

VOC und CO sind Produkte der unvollständigen Verbrennung und in den meisten Betriebsphasen wird in der Regel daher ein gleichläufiges Verhalten dieser beiden Schadstoffe beobachtet. Auch zwischen CH₄ und VOC tritt in der Holzverbrennung eine starke Gleichläufigkeit auf. Daher wurden EF für VOC sowie CH₄ und NMVOC anhand von Faktoren aus CO bzw. VOC berechnet (Formel (5) bis (7)), was analog zum Vorgehen der letzten Aktualisierung der Emissionsfaktoren 2014 [1] ist.

$$VOC = f \cdot CO \quad (5)$$

$$CH_4 = \alpha \cdot VOC \quad \text{mit} \quad \alpha = 0.30 \pm 0.14 \quad (6)$$

$$NMVOC = VOC - CH_4 = (1 - \alpha) \cdot VOC \quad (7)$$

Der Faktor *f* für die Berechnung von VOC aus CO in Formel (5) wurde aus vorhandenen Literatur- und Messdaten für die verschiedenen HES-Kategorien bestimmt. Für den VOC-EF der HES-Kategorien 2, 3, 4a und 5 wurde das gleiche Modell und Literaturdaten wie für NO_x, CO und PM_{exh} angewendet, das verschiedene Betriebseinflüsse und Technologien berücksichtigt (siehe Formel (3) in Kapitel 3.4.1) und daraus der Faktor *f* hergeleitet. Teilweise wurden jedoch mehrere Kategorien zusammengefasst und für einzelne Kategorien, für die keine Daten verfügbar waren, wurde derselbe *f*-Wert von ähnlichen Kategorien angenommen (z.B. für die HES-Kategorie 1 «Offene Cheminées» wurde derselbe *f*-Wert angenommen wie für die HES-Kat. 2,3,4a und 5 «Raumheizer für feste Brennstoffe»). Die detaillierten Werte für den Faktor *f* sind in Tabelle 7 in Kapitel 4.1.1 zu finden.

Der Faktor *α* in Formel (6) und (7) wurde analog zur letzten Aktualisierung der Emissionsfaktoren 2014 [1] für alle Kategorien als konstant angenommen. Zur Bestimmung von *α* wurden Daten von verschiedenen Holzfeuerungskategorien unterschiedlicher Technologien und Betriebsphasen ausgewertet wie auch Daten aus der Aktualisierung 2014 [1] verwendet. Es wurde der Median über alle ausgewerteten Daten gebildet (siehe Tabelle A. 19 im Anhang A.6).

3.6 EF-2020 – PM-Fraktionen und BC

3.6.1 $PM_{10,exh}$ und $PM_{2.5,exh}$

$PM_{10,exh}$ und $PM_{2.5,exh}$ wurden wie bei der letzten Aktualisierung mit konstanten und für alle Anlagekategorien gleichen Faktoren aus PM_{exh} berechnet (Formel (8) und (9)).

$$PM_{2.5,exh} = PM_{exh} \cdot PM_{2.5,exh}/PM_{exh} \quad \text{mit} \quad PM_{2.5,exh}/PM_{exh} = 0.90 \quad (8)$$

$$PM_{10,exh} = PM_{exh} \cdot PM_{10,exh}/PM_{exh} \quad \text{mit} \quad PM_{10,exh}/PM_{exh} = 0.95 \quad (9)$$

Die Bestimmung der aktualisierten Faktoren $PM_{2.5,exh}/PM_{exh}$ und $PM_{10,exh}/PM_{exh}$ ist in Kapitel 4.1.2 zu finden.

3.6.2 BC

Die EF für BC wurden ebenfalls analog zur letzten Aktualisierung der Emissionsfaktoren 2014 [1] über das Verhältnis von BC zu $PM_{2.5,exh}$ berechnet (Formel (10)).

$$BC = PM_{2.5,exh} \cdot BC/PM_{2.5,exh} \quad (10)$$

Für einige Kategorien gab es dazu Daten aus der Literatur oder den Messungen im Auftrag des BAFU. Teilweise wurden jedoch mehrere Kategorien zusammengefasst und für Kategorien, zu denen keine Daten verfügbar waren, wurde derselbe Wert von ähnlichen Kategorien angenommen. Die detaillierten Werte für das Verhältnis $BC/PM_{2.5,exh}$ und die resultierenden EF für BC sind in Tabelle 8 in Kapitel 4.1.2 zu finden.

3.6.3 TSP und PM_{cond}

Die EF für Gesamtstaub bei Umgebungsbedingungen («total suspended particles», TSP) werden in dieser Studie mit dem Verhältnis TSP/PM_{exh} berechnet:

$$TSP = PM_{exh} \cdot TSP/PM_{exh} \quad (11)$$

Das Verhältnis von TSP/PM_{exh} wurde aus einer Gegenüberstellung von Daten und verschiedenen Varianten zur Abschätzung des kondensierenden Staubanteils (PM_{cond}) aus der Literatur abgeschätzt (siehe Tabelle A. 21 im Anhang A.7). Die detaillierten Werte für das Verhältnis TSP/PM_{exh} und die EF für TSP sind in Tabelle 8 in Kapitel 4.1.2 zu finden.

PM_{cond} wurde anschliessend als Differenz aus TSP und PM_{exh} berechnet:

$$PM_{cond} = TSP - PM_{exh} \quad (12)$$

Die Berechnung von TSP und PM_{cond} mit den Formeln (11) und (12) unterscheidet sich zum Vorgehen der letzten Aktualisierung 2014 [1]. Dort wurde PM_{cond} über einen Faktor aus NMVOC berechnet ($PM_{cond} = NMVOC \cdot \epsilon$) und TSP wiederum aus der Differenz von PM_{exh} und PM_{cond} ($TSP = PM_{exh} + PM_{cond}$). Dieses Vorgehen wird sonst in keiner Publikation angewendet und beinhaltet neben der Unsicherheit des Faktors ϵ noch weitere Unsicherheiten, die im Anhang Kapitel A.7 beschrieben werden.

PM Fraktionen von TSP und PM_{cond}

Für die PM_{2.5}- und PM₁₀-Fraktionen von TSP ($PM_{2.5,TSP}$ und $PM_{10,TSP}$) und von PM_{cond} ($PM_{2.5,cond}$ und $PM_{10,cond}$) wurden dieselben Verhältnisse wie für PM_{exh} angenommen, wodurch jene für PM_{cond} auch als Differenz aus TSP und PM_{exh} gebildet werden können (siehe Formel (13) bis (16)). Die Begründung für das Verwenden derselben Faktoren wie für die PM_{exh}-Fraktionen ist in Kapitel 4.1.2 beschrieben.

$$PM_{2.5,TSP} = TSP \cdot PM_{2.5,TSP}/TSP \quad \text{mit} \quad PM_{2.5,TSP}/TSP = 0.90 \quad (13)$$

$$PM_{10,TSP} = TSP \cdot PM_{10,TSP}/TSP \quad \text{mit} \quad PM_{10,exh}/TSP = 0.95 \quad (14)$$

$$PM_{2.5,cond} = PM_{2.5,TSP} - PM_{2.5,exh} \quad (15)$$

$$PM_{10,cond} = PM_{10,TSP} - PM_{10,exh} \quad (16)$$

3.7 EF-2020 – Schwermetalle, PAK, NH₃, SO_x, Benzol, PCDD/F, PCB, HCB (Schadstoffe Gruppe 2)

Zur Herleitung der EF-2020 für die Schadstoffe der Gruppe 2 wurde pro Schadstoff eine Übersichtstabelle erstellt (siehe Tabelle A. 22 bis Tabelle A. 36 in Anhang A.8 bis A.15). In diesen Tabellen werden Werte für jede Kategorie der folgenden Quellen aufgelistet:

- Literaturwerte, die für die letzte Aktualisierung der EF-2014 verwendet wurden (Literatur 2014)
- EF-Werte der letzten Aktualisierung 2014 inklusive kurzer Begründung
- Werte aus dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3]
- Literaturwerte, die in dieser Studie für die Aktualisierung der EF-2020 herangezogen werden (Literatur 2020)
- Daten aus den Messungen, die im Auftrag des BAFU durchgeführt wurden (Kapitel 2.2.3)
- Daten aus den LRV-Emissionsmessungen für Pb und Zn der Kat. 18 und 19 (Kapitel 2.2.1).

Für jede Quelle werden für alle Kategorien die Anzahl der Datensätze, der Mittelwert und der Bereich (Minimal- bis Maximalwert) angegeben. Die EF für 2020 wurden anschliessend auf Basis dieser Übersichtstabellen festgelegt, wobei Messwerte und Literaturwerte 2020 teilweise höher gewichtet wurden als die Zahlen aus der Literatur 2014 und aus dem EMEP/EEA Guidebook – 2019.

Für die Bestimmung der EF von Benzol wurde die Übersichtstabelle noch ergänzt mit den Werten für Benzol, die aus den Literaturwerten (Tabelle A. 32 im Anhang A.12) für die Verhältnisse von Benzol/VOC und Benzol/CH₄ und den EF-2020 für VOC und CH₄ berechnet wurden (Tabelle A. 33 im Anhang A.12).

3.8 EF-Prognosen bis 2035

Für die Prognosen der künftigen Emissionsfaktoren ist zu beachten, dass mit der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise nur die positiven Entwicklungstrends durch verbesserte Technik und verbesserten Anlagenbetrieb berücksichtigt werden. Mögliche negative Auswirkungen, zum Beispiel ein Trend zur vermehrten Nutzung heute kaum genutzter alter Holzfeuerungen oder die Verwendung ungeeigneter Brennstoffe - zum Beispiel als Folge einer Energiekrise - werden für die EF-2035 nicht abgedeckt.

3.8.1 NO_x, CO, PM_{exh}

EF-Modell 2035 HES-Kategorie 2, 3, 4a, 5

Für NO_x, CO, PM_{exh} (und auch für VOC) wurden die EF-2035 mit dem EF-Modell (siehe Kapitel 3.4.1) berechnet. Dazu wurden höhere Anteile von modernen Feuerungen und geringere Anteile an nicht-optimalen Betriebsphasen für 2035 im Vergleich zu 2020 angenommen (siehe Tabelle A. 4 und Tabelle A. 7 im Anhang A.3).

EF-Modell 2035 HES-Kategorie 12 – 17 und 19

Für die Prognose der EF für NO_x, CO und PM_{exh} der automatischen Holzfeuerungen >50 kW (Kategorien 12-17 und 19) wurde dasselbe EF-Modell, wie für die EF-2020 verwendet (siehe Kapitel 3.4.4). Dabei wurden folgende Annahmen für das EF-Modell 2035 getroffen:

- 1 Start und Stopp weniger für den Standardfall als für 2020
- Gleiche Verteilung Voll-/Teilleistung und Anteil Stillstand wie für 2020
- Gleiche Dauer und EF für Anfahren, Abfahren und Standby wie für 2020
- Gleiche Faktoren für PM_{exh} für Anfahren/Vollleistung, Abfahren/Vollleistung und Standby/Vollleistung wie für 2020
- Gleicher Anteil der Feuerwärmeleistung der unterschiedlichen Phasen am Gesamtbetrieb wie für das EF-Modell 2020.

Die EF für Voll- und Teilleistung für 2035 für NO_x, CO und PM_{exh} wurden wie folgt berechnet:

$$EF_{i,j,2035} = EF_{i,j,2015} \cdot A_{2015} + EF_{i,j,2020} \cdot A_{2020} + EF_{i,j,2025} \cdot A_{2025} + EF_{i,j,2030} \cdot A_{2030} + EF_{i,j,2035} \cdot A_{2035} \quad (17)$$

$EF_{i,j,20xx}$... Emissionsfaktor für den Schadstoff i und die Leistung j. Die Jahreszahl 20xx bezeichnet das Ende einer 5 Jahresperiode, z.B. $EF_{i,2015}$ entspricht dem Zeitraum 2010-2014

A_{20xx} ... Anteil Anlagen mit Baujahr der 5 Jahresperiode mit Ende im Jahr 20xx in 2035

Dabei wurde zuerst der Anlagenbestand der jeweiligen Kategorie bis ins Jahr 2035 in Schritten von je fünf Jahren abgeschätzt. Dazu wurden durchschnittliche jährlichen Zuwachsraten aus den Zahlen zum Anlagenbestand aus der Holzenergiestatistik der letzten fünf Jahre ermittelt und eine Lebensdauer von 25 Jahren angenommen. Damit wurden anschliessend fünf Baujahr-Perioden von je fünf Jahren für die EF-Prognose 2035 berücksichtigt:

- 2010-2014
- 2015-2019
- 2020-2024
- 2025-2029
- 2030-2035

Die Anzahl Anlagen mit dem Baujahr 2010-2014 und 2015-2019 sowie deren EF für NO_x, CO und PM_{exh} der jeweiligen Kategorie wurde aus den vorhandenen Messdaten bestimmt. Für die EF bei Voll- und Teilleistung der drei Perioden in der Zukunft (2020-2035) wurden dieselben EF wie für 2015-2019 angenommen.

Die Medianwerte der EF über die verfügbaren Daten der jeweiligen Kategorien mit Baujahr 2015-2019 liegen deutlich unter den heute geltenden Emissionsgrenzwert (Faktor 2.5-40 für CO und 1.6-19 für

PM_{exh}). Für NO_x, wo es nur für wenige Anlagen einen Emissionsgrenzwert gibt, würden alle Kategorien den Grenzwert von 250 mg/m³ für Anlagen <10 MW mit Massenströmen > 2500 g/h einhalten. Aus diesem Grund ist nicht anzunehmen, dass es in nächster Zeit grosse technische Verbesserungen der Feuerungen geben wird, wenn nicht der Prüfzyklus zur Überprüfung der Emissionsgrenzwerte geändert wird und auch instationäre Phasen, wie An- und Abfahren, eingeschlossen werden. Deshalb wurden keine Verbesserungen der EF für Anlagen mit Baujahr 2020-2035 bei Voll- und Teilleistung im Vergleich zu 2015-2019 angenommen.

Restliche HES-Kategorien (6-11, 18)

Für die anderen Kategorien wurden entweder Werte aufgrund von Annahmen abgeschätzt oder die 25 % Perzentile der vorhandenen Daten (Literatur oder Messungen) verwendet. Für NO_x wurden, ausser für Kategorie 18, dieselben Werte wie für 2020 angenommen.

3.8.2 VOC, CH₄ und NMVOC

Analog zum Vorgehen zur Bestimmung der EF für 2020 wurde für 2035 VOC ebenfalls über den Faktor f aus CO berechnet (siehe Formel (5)). Die detaillierten Werte für den Faktor f und die EF für VOC für 2035 sind in Tabelle A. 37 im Anhang A.16 zu finden.

Die EF für CH₄ und NMVOC für 2035 wurden ebenfalls analog zu den EF-2020 aus VOC mit dem Faktor α berechnet (siehe Formel (6) und (7)). Es wurde derselbe Wert wie für 2020 angenommen.

3.8.3 PM Fraktionen und BC

Zur Berechnung der EF der PM-Fraktionen PM₁₀ und PM_{2.5} von PM_{exh} (Formel (8) und (9)), TSP und PM_{cond} (Formel (13) bis (16)) wurden dieselben Faktoren verwendet wie für die EF-2020. Für die Faktoren BC/PM_{2.5} und TSP/PM_{exh} zur Berechnung von BC und TSP (Formel (10) und (11)) wurden für einige Feuerungskategorien <50 kW verbesserte Werte angenommen, die zu tieferen EF in 2035 für BC und TSP führen. Die detaillierten Werte für die Faktoren und EF für 2035 sind in Tabelle A. 38 und Tabelle A. 39 im Anhang A.16 zu finden.

3.8.4 Schadstoffe der Gruppe 2

Die EF für 2035 für die Schadstoffe der Gruppe 2 wurden über die relative Änderung zwischen 2020 und 2035 von PM_{exh} (Schwermetalle Pb, Zn und Cd, Formel (18)) oder CO (alle anderen Schadstoffe ausser Hg, Formel (19)) berechnet

$$EF_{i,2035} = PM_{exh,2020} / PM_{exh,2035} \cdot EF_{i,2020} \quad (18)$$

$$EF_{i,2035} = CO_{2020} / CO_{2035} \cdot EF_{i,2020} \quad (19)$$

Dabei wurden zuerst die Werte für alle Kategorien individuell berechnet. Für den finalen EF wurden grösstenteils mehrere Kategorien zusammengefasst, der Mittelwert gebildet und gerundet. Die EF von Hg wurden über die ganze Zeitdauer 1990-2035 als konstant angenommen. Die detaillierten Werte der EF für 2035 sind in Tabelle A. 41 bis Tabelle A. 44 im Anhang A.16 zu finden.

3.9 EF Rückblick bis 1990

Zusätzlich zur Bestimmung der EF für das Jahr 1990 wurden auch die EF der Jahre 2008 und 2014 ermittelt. 2010 wurde das erste EF-Modell basierend auf den HES-Feuerungskategorien im Auftrag des BAFU für das Jahr 2008 erarbeitet [77] und 2014 eine erste Aktualisierung des EF-Modells durchgeführt [1]. Zudem stimmen die Jahre (1990, 2008, 2014 und 2020) dieser Zeitreihe gut mit Anpassungen der LRV-Vorschriften (1992, 2007, 2012, 2018) überein, bei denen Emissionsgrenzwerte verschärft wurden, so dass in den EF jeweils die vorangegangene LRV-Änderung grösstenteils erkennbar sein sollte.

3.9.1 NO_x, CO, PM_{exh}

Für die NO_x-EF aller HES-Kategorien und aller Jahre des Rückblicks wurden keine Änderungen gegenüber den Werten in 2020 angenommen. Es wurden somit dieselben Werte wie für 2020 eingesetzt. Für CO und PM_{exh} wurden die Werte des Rückblicks entweder mit den EF-Modellen der Kategorien 2, 3, 4a, 5 sowie 12-17 und 19 berechnet, oder mit Annahmen abgeschätzt. Die detaillierten Werte der EF für 1990-2014 sind in Tabelle 12 bis Tabelle 14 in Kapitel 4.2 zu finden und genauer beschrieben.

EF-Modell Rückblick HES-Kategorien 2, 3, 4a, 5

Für CO, PM_{exh} (und auch für VOC) wurden die EF mit dem EF-Modell (siehe Kapitel 3.4.1) berechnet. Dazu wurden jeweils höhere Anteile von konventionellen Feuerungen und höhere Anteile an nicht-optimalen Betriebsphasen im Vergleich zum vorherigen Zeitpunkt angenommen (siehe Tabelle A. 4 und Tabelle A. 7 im Anhang Kapitel A.3).

EF-Modell Rückblick HES Kategorie 12 – 17 und 19

Um dasselbe EF-Modell für automatische Holzfeuerungen >50 kW wie für 2020 anwenden zu können, waren nicht genügend Messdaten verfügbar. Vor allem waren keine Daten vorhanden, die vor 1994 gemessen wurden. Aus diesem Grund wurden die EF für CO und PM_{exh} für den Rückblick ausgehend von den EF-2020 und Änderungen der Anzahl Start und Stopps wie folgt berechnet

$$EF_{i,2014} = EF_{i,2020} \cdot EF_{i,2020,Messung} / EF_{i,2014,Messung} \quad (20)$$

$$EF_{i,2008} = EF_{i,2014} \cdot EF_{i,2014,Messung} / EF_{i,2008,Messung} \cdot \Delta EF_{i,+1 \text{ Start/Stop}} \quad (21)$$

$$EF_{i,1990} = EF_{i,2008} \cdot EF_{i,2008,Messung} / EF_{i,1990,Messung} \cdot \Delta EF_{i,+1 \text{ Start/Stop}} \quad (22)$$

Die relative Änderung der Gesamtemissionen aufgrund eines zusätzlichen An- und Abfahrvorgangs ($\Delta EF_{i,+1 \text{ Start/Stop}}$) wurde durch die Sensitivitätsanalyse bestimmt (siehe Kapitel 3.4.4). Für die EF-2014 wurde keine Änderung im Betriebsverhalten der Feuerungen im Vergleich zu 2020 angenommen. Für 2008 und 1990 wurde je ein zusätzliches An- und Abfahren der Feuerungen angenommen.

Zur Bestimmung von $EF_{i,xxxx,Messung}$ (wobei i für PM_{exh} oder CO steht) in den Formeln (20) bis (22) wurden die Messdaten von je 4 Jahren zusammengefasst und der Medianwert gebildet. Es wurden keine Unterscheidung zwischen Voll- und Teilleistung gemacht und die Kategorien 12a, 14a, 13 und 15

sowie 16a, 17 und 19 zusammengefasst. Für Pelletfeuerungen (Kategorie 12b, 14b und 16b) waren generell zu wenig Messdaten verfügbar, um diese in der Auswertung separat zu berücksichtigen.

$EF_{i,2020,Messung}$ bezeichnet den Median aller Messwerte zwischen 2015 und 2020, und $EF_{i,2014,Messung}$ sowie $EF_{i,2008,Messung}$ den Median für die Jahre 2012-2016 und 2006-2010. Der EF für 1990 ($EF_{i,1990,Messung}$) wurde aus dem EF für die Jahre 1994-1998 extrapoliert. Aufgrund der sehr tiefen EF in 2020 und 2014 resultierten mit diesem Herleitungsansatz für PM_{exh} der Kategorien 16a, 17 und 19 sehr hohe Werte. Daher wurde für PM_{exh} dieser Kategorien der Absolutwert der Differenz der jeweiligen Zeitreihenzeitpunkte verwendet.

3.9.2 VOC, CH₄ und NMVOC

Die EF von VOC bzw. CH₄ und NMVOC des Rückblicks wurden ebenfalls über die Faktoren f aus CO bzw. α aus VOC berechnet (siehe Formeln (5) bis (7)). Dabei wurden für alle Jahre dieselben Werte für die Faktoren f und α angenommen. Die detaillierten Werte für die Faktoren und EF sind in Tabelle A. 37 im Anhang A.16 zu finden.

3.9.3 PM-Fraktionen und BC

Zur Berechnung der EF der PM Fraktionen PM₁₀ und PM_{2.5} von PM_{exh} (Formel (8) und (9)), TSP und PM_{cond} (Formel (13) bis (16)) wurden dieselben Faktoren verwendet wie für die EF-2020. Für die Faktoren BC/PM_{2.5} zur Berechnung von BC (Formel (10)) wurden für 2014 dieselben Faktoren verwendet, wie für 2020. Für die anderen beiden Jahre (2008 und 1990) wurde der Faktor BC/PM_{2.5} für jeden Zeitpunkt weiter in der Vergangenheit zurückliegend um je 5 % erhöht.

Für die Faktoren TSP/ PM_{exh} zur Berechnung von TSP (Formel (11)) wurden für 2008 und 2014 dieselben Werte angenommen, wie für 2020. Für 1990 wurden 40 % bis 50 % höhere Werte für TSP/ PM_{exh} angenommen.

Die detaillierten Werte für die Faktoren und EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 38 und Tabelle A. 39 im Anhang A.16 zu finden.

3.9.4 Schadstoffe der Gruppe 2

Die EF für den Rückblick für die Schadstoffe der Gruppe 2 wurden, analog zur EF-Prognose, über die relativen Änderungen zwischen den Zeitpunkten der Zeitreihe von PM_{exh} (Schwermetalle Pb, Zn und Cd,) oder CO (alle anderen Schadstoffe) berechnet.

$$EF_{i,2014} = EF_{j,2014} / EF_{j,2020} \cdot EF_{i,2020} \quad (23)$$

$$EF_{i,2008} = EF_{j,2008} / EF_{j,2014} \cdot EF_{i,2014} \quad (24)$$

$$EF_{i,1990} = EF_{j,1990} / EF_{j,2008} \cdot EF_{i,2008} \quad (25)$$

$EF_{j,xxx}$... Emissionsfaktor für CO oder PM_{exh} im Jahr xxxx

$EF_{i,xxx}$... Emissionsfaktor des Schadstoffs i im Jahr xxxx

Dabei wurden zuerst die Werte für alle Kategorien individuell berechnet. Für den finalen EF wurden grösstenteils mehrere Kategorien zusammengefasst, der Mittelwert gebildet und gerundet. Die EF von Hg wurden über die ganze Zeitdauer 1990-2035 als konstant angenommen. Die detaillierten Werte der EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 41 bis Tabelle A. 44 im Anhang A.16 zu finden.

3.10 Unsicherheiten

3.10.1 EF-2020 - Schadstoffe Gruppe 1

Die Unsicherheiten der Schadstoffe NO_x , CO und PM_{exh} wurden anhand der vorhandenen Daten (Literatur und Messungen) ermittelt und entsprechen grösstenteils der Standardabweichung des Mittelwerts oder der mittleren Bandbreite der vorliegenden Werte.

Für die Schadstoffe, die aus CO und PM_{exh} abgeleitet wurden, wurde eine Fehlerfortpflanzung angewendet. Dabei wurden folgende Unsicherheiten für die verschiedenen Faktoren angenommen:

- $f: \pm 50\%$ in $\text{VOC} = f \cdot \text{CO}$
- $\alpha: \pm 50\%$ in $\text{CH}_4 = \alpha \cdot \text{VOC}$ und $\text{NMVOC} = (1 - \alpha) \cdot \text{VOC}$
- $\frac{\text{PM}_{10}}{\text{PM}_{\text{exh}}}: \pm 50\%$ und $\frac{\text{PM}_{2.5}}{\text{PM}_{\text{exh}}}: \pm 50\%$ in $\text{PM}_{xx,\text{exh}} = \text{PM}_{\text{exh}} \cdot \text{PM}_{xx}/\text{PM}_{\text{exh}}$
- $\text{BC}/\text{PM}_{2.5,\text{exh}}: \pm 100\%$ in $\text{BC} = \text{PM}_{2.5,\text{exh}} \cdot \text{BC}/\text{PM}_{2.5}$
- $\frac{\text{TSP}}{\text{PM}_{\text{exh}}}: \pm 100\%$ für Kat. 1-11 und $\pm 50\%$ für Kat. 12-19 in

$$\text{TSP} = \text{PM}_{\text{exh}} \cdot \text{TSP}/\text{PM}_{\text{exh}}$$
- $\frac{\text{PM}_{10}}{\text{TSP}}: \pm 50\%$ und $\frac{\text{PM}_{2.5}}{\text{TSP}}: \pm 50\%$ in $\text{PM}_{xx,\text{TSP}} = \text{TSP} \cdot \text{PM}_{xx}/\text{TSP}$

Für einige Schadstoffe ergeben sich Unsicherheiten $>100\%$. Für Werte im unteren Bereich, also bei der Subtraktion der Unsicherheit vom EF-Wert, sind solche Unsicherheiten jedoch physikalisch nicht möglich. Daher wurde für diesen Fall ein Wert von 80% für die Unsicherheit im unteren Bereich angegeben. Die unterschiedlichen Unsicherheiten für den oberen und unteren Bereich berücksichtigen zudem die Tatsache, dass die Bandbreiten in der Realität meist nicht symmetrisch um den Mittelwert verteilt sind, also keine Gauss'sche Verteilung vorliegt.

Die detaillierten Unsicherheiten für die verschiedenen Schadstoffe und Kategorien sind in Tabelle 16 bis Tabelle 20 in Kapitel 4.3.1 zu finden.

3.10.2 EF-2020 - Schadstoffe Gruppe 2

Für die Schadstoffe Schwermetalle, PAK, NH_3 , SO_x , Benzol, PCDD/F, PCB und HCB sind zu wenige Datensätze vorhanden, um die Unsicherheiten aus den vorhandenen Daten abzuleiten. Daher wurden die Unsicherheiten anhand der Unsicherheitsklassen des EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] abgeschätzt (siehe Tabelle 6). Nachdem für alle Schadstoffe der Gruppe 2 Unsicherheiten von $\geq 100\%$ resultierten, wurde, analog zu den Unsicherheiten der Schadstoffe der Gruppe 1, ein Wert von 80% für die Unsicherheit im unteren Bereich angenommen.

Die detaillierten Unsicherheiten für die verschiedenen Schadstoffe und Kategorien sind in Tabelle 19 und Tabelle 20 in Kapitel 4.3.1 zu finden.

Tabelle 6 Definitionen verschiedener Unsicherheitsklassen (Rating) aus dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 (vgl. Table 2-2 Part. A, Chapter 5 Uncertainties [3])

Rating	Definition	Typical error range	Mittelwert*
A	An estimate based on a large number of measurements made at a large number of facilities that fully represent the sector	10% to 30%	20%
B	An estimate based on a large number of measurements made at a large number of facilities that represent a large part of the sector	20% to 60%	40%
C	An estimate based on a number of measurements made at a small number of representative facilities, or an engineering judgement based on a number of relevant facts	50% to 200%	100%
D	An estimate based on single measurements, or an engineering calculation derived from a number of relevant facts	100% to 300%	200%
E	An estimate based on an engineering calculation derived from assumptions only	order of magnitude	500%

*Das BAFU verwendet meistens den Mittelwert, begründete Abweichungen sind jedoch möglich

3.10.3 EF-1990

Für die EF-1990 wurden Unsicherheiten nur für NO_x, CO, VOC, CH₄, NMVOC, PM_{exh}, PM_{2.5,exh}, PM_{10,exh}, SO_x und NH₃ angegeben. Da die EF für 1990 ausgehend von den EF-2020 abgeschätzt wurden, wurden auch entsprechend höhere Unsicherheiten gewählt, die für NO_x, CO, SO_x, NH₃ und PM_{exh} anhand der Unsicherheitsklassen (Tabelle 6) aus dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] bestimmt wurden. Die Unsicherheiten für NMVOC, CH₄, PM_{2.5,exh}, PM_{10,exh} wurden mit Fehlerfortpflanzung und der Annahme der gleichen Unsicherheiten für die Faktoren wie in 2020 (siehe Kapitel 3.10.1) berechnet. Für Unsicherheiten ≥100 % wurde analog zu den Unsicherheiten für die EF-2020 ein Wert von 80 % für die Unsicherheit des unteren Bereichs angenommen.

Die detaillierten Unsicherheiten für die verschiedenen Schadstoffe und HES-Kategorien sind in Tabelle 21 in Kapitel 4.3.2 zu finden.

4 Resultate

4.1 EF-2020

4.1.1 NO_x, CO, VOC, CH₄, NMVOC und PM_{exh}

Die EF-2020 für alle HES-Kategorien für die gasförmigen Schadstoffe der Gruppe 1 (NO_x, CO, VOC, CH₄, NMVOC und PM_{exh}) sind in Tabelle 7 zu finden. Zusätzlich werden in Tabelle 7 auch die EF-2020 mit den Werten der letzten EF-Aktualisierung in 2014 [1] (in den Tabellen und im Folgenden als EF-2014 bezeichnet) und des EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] verglichen. Der Vergleich der EF-2020 mit den Werten des EMEP/EEA Guidebook – 2019 ist jedoch nur bedingt möglich, da nur teilweise ähnliche Feuerungskategorien wie in der Schweizer HES aufgeführt sind. Ausserdem basieren die EF im Guidebook auf nur sehr wenigen Quellen bzw. Studien, die oftmals in Ländern (z.B. Portugal oder nordische Länder) durchgeführt wurden, in denen Technologien oder Brennstoffe angewendet wurden, die in der Schweiz nicht unbedingt üblich sind.

Für alle Schadstoffe der Kategorien 1, 6, 7 und 10 (Offene Cheminées, Holzkochherde, Zentralheizungsherde und Doppel-/Wechselbrandkessel) sowie für NO_x der Kategorie 11a wurden im Vergleich zu 2014 [1] keine neuen Daten gefunden. Auch ist für diese Kategorien nicht von einer deutlichen Verbesserung der Technologie auszugehen. Daher wurden für die EF-2020 dieser Kategorien und Schadstoffe dieselben Werte wie für 2014 eingesetzt. Für alle anderen Kategorien waren genügend Literaturdaten oder Messwerte verfügbar, um die EF daraus abzuleiten. Vor allem für automatische Feuerungen >50 kW (Kategorien 12-19) konnte für diese Studie eine grosse Anzahl an aktuellen Messdaten von realen Anlagen in der Schweiz für die Auswertung verwendet werden (siehe Kapitel 2.2). Für die EF der Kategorien 2, 3, 4a, 5 und 12-17, 19, die über ein Modell aus Literaturdaten und Messdaten berechnet wurden, mussten teilweise auch Annahmen getroffen werden, die wenn möglich, aber anhand von Daten validiert wurden (siehe Kapitel 3.4.1 und 3.4.4).

Nachfolgend werden die Trends bzw. Unterschiede zwischen verschiedenen Kategorien und deren Ursachen sowie Vergleiche der EF-2020 mit der letzten Erhebung 2014 [1] und teilweise mit dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] für die verschiedenen Schadstoffe der Gruppe 1 beschrieben.

NO_x

Die Unterschiede und Proportionalitäten zwischen den Kategorien entsprechen den erwarteten Trends, die bereits bei den EF-2010 [77] und EF-2014 [1] vorhanden waren. Die Werte für handbeschickte Stückholzfeuerungen <50 kW sind tiefer als für automatische Feuerungen >50 kW, was auf den gegenläufigen Trend zwischen CO und NO_x (für konventionelle Verbrennungsbedingungen ohne Low-NO_x-Massnahmen, [78]) zurückzuführen ist. Weitere Unterschiede zwischen den HES-Kategorien sind auch mit dem Stickstoffgehalt im Brennstoff zu erklären. Die tieferen EF für Pelletfeuerungen sind darauf zurückzuführen, dass bis anhin in der Schweiz verwendete Holzpellets grossteils aus rindenfreiem Sägemehl aus Nadelholz stammen.

Die NO_x-EF-2020 für Pelletkessel (Kategorie 11b) sind geringfügig und für Pelletöfen <50 kW (Kategorie 4b) deutlich höher als jene für 2014 (siehe Tabelle 7) und der Trend von höheren EF für grössere Pelletfeuerungen (Kategorien 12b, 14b und 16b) zeigt sich nicht mehr so ausgeprägt. Die Unterschiede zur

letzten Erhebung sind zum einen auf eine teilweise grössere Datenbasis zurückzuführen. Andererseits beinhaltet diese grössere Datenbasis auch vermehrt neue Feuerungen, welche eine verbesserte Verbrennung erzielen, aber damit auch höhere NO_x-Emissionen aufweisen können. Im Vergleich mit EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] zeigen die NO_x-EF-2020 nur geringfügige Unterschiede von max. 10 g/GJ.

Für die Kategorien 1, 2, 3, 4a, 5, 6, 7, 10 und 11a wurden ähnliche oder dieselben EF für 2020 wie für 2014 festgelegt. Die EF-2020 für Raumheizer für feste Brennstoffe (Kat. 2, 3, 4a, 5) sind vergleichbar mit den EF für «energy efficient wood stoves» und «advanced/ecolabelled stoves and boilers» jedoch deutlich höher als jene für «conventional wood stoves» des EMEP/EEA Guidebook – 2019. Die EF-2020 für Stückholzkessel (Kategorie 8, 9) sind höher als die EF-2014, aber jenen für «advanced/ecolabelled stoves and boilers» des EMEP/EEA Guidebook - 2019 sehr ähnlich. Die höheren Werte für 2020 im Vergleich zu 2014 spiegeln den Trend wider, dass alte Stückholzkessel mehr und mehr ausser Betrieb gesetzt werden und neuere Feuerungen mit effizienterer Verbrennung tiefere CO-Werte aber höhere NO_x-Emissionen aufweisen.

Die EF-2020 für automatische Feuerungen >50 kW (Kategorien 12-17) zeigen im Vergleich zu den EF-2014 keinen grossen Unterschied mehr zwischen den Kategorien innerhalb (i.HvB) und ausserhalb von Holzverarbeitungsbetrieben (a.HvB). Für die Festlegung der EF-2014 [1] wurde davon ausgegangen, dass in i.HvB ein Teil der Betriebe Restholz mit Spanplattenanteilen verbrennt, die einen deutlich höheren Stickstoffgehalt aufweisen. Da die EF-2020 ausschliesslich auf Messdaten beruhen, deuten die Werte der EF-2020 darauf hin, dass der Anteil solcher Betriebe geringer ist, als in der Studie 2014 angenommen wurde. Eine Unterschätzung der NO_x-EF-2020 kann jedoch nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da die Datenlage für i.HvB Anlagen gering ist (n < 20).

Für die Kategorie 18 (WKK-Anlagen) wurden deutlich tiefere und für die Kategorie 19 (Anlagen für erneuerbare Abfälle) höhere EF in 2020 gefunden als für 2014. Für 2014 musste der Anteil an Anlagen mit Entstickung (SNCR, SCR) oder effizienter Low-NO_x-Technik abgeschätzt werden. Für 2020 liegen nun, vor allem für die Kategorie 18, Messdaten vom Grossteil der in der Schweiz betriebenen Anlagen vor. Diese zeigen, dass die installierte Leistung der Kategorie 18 von Anlagen >27 MW dominiert wird, die zur Einhaltung der NO_x-Grenzwerte mit Entstickung (SNCR, SCR) und/oder Low-NO_x-Technik (z.B. Wirbelschicht) betrieben werden, was die tiefen EF-2020 erklärt.

CO

Die Unterschiede und Proportionalitäten zwischen den Kategorien entsprechen den erwarteten Trends, die bereits bei den EF-2010 [77] und EF-2014 [1] vorhanden waren. Pelletfeuerungen und automatische Feuerungen weisen tiefere EF als handbeschickte Feuerungen auf, was auf folgende Gründe zurückzuführen ist:

- Mit zunehmender Anlagengrösse werden höhere Feuerraumtemperaturen erzielt. Zudem führt die Vergrösserung von Feuerräumen bei sonst unveränderten Bedingungen zu grösserer Reynolds-Zahl und somit verstärkter Turbulenz, was die Mischung verbessert und Strahlenbildung verringert.
- Ein automatisierter Betrieb ermöglicht eine Verbrennung bei einem Luftüberschuss, der auf ein Optimum geregelt wird und eine höhere Ausbrandqualität sicherstellt.

- In der LRV sind mit der Anlagengrösse sinkende Grenzwerte vorgeschrieben, deren Einhaltung bei Anlagen >70 kW, und seit der letzten LRV Revision 2018 auch für Holzkessel <70 kW, mit periodischen Messungen kontrolliert wird.
- Für Feuerungen kleiner Leistung bieten Holzpellets im Vergleich zu Waldhackschnitzeln vorteilhafte Verbrennungsbedingungen, da die Brennstoffqualität konstant und der Heizwert dank geringem Wassergehalt hoch ist.
- Bei handbeschickten Holzfeuerungen tragen die An- und Ausbrandphase entscheidend zu den Gesamtemissionen bei. Das Verhältnis dieser Phasen am gesamten Abbrand ist bei einfachen Feuerungen gross, was zu höheren Emissionsfaktoren führt.

Ein Vergleich der Erhebungen von 2014 [1] und der vorliegenden von 2020 zeigt, dass die CO EF-2020 für Feuerungen <50 kW (Kategorien 2, 3, 4a, 4b, 5, 8, 9 & 11b) höher sind als 2014. Für die Kategorien 12-15 sind die CO-EF-2020 dagegen sehr ähnlich wie 2014 und für automatische Feuerungen >50 kW (Kategorien 16-19, ohne Pelletkessel 16b) sind die CO-EF-2020 deutlich tiefer als 2014.

Der höhere CO-EF-2020 für die Kategorie 4b im Vergleich zur Erhebung 2014 und dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 ist darauf zurückzuführen, dass der EF-2020 auf der Grundlage des beReal Projektes [12] bestimmt wurde, in dem ein Prüfzyklus entwickelt wurde, der auch Kalt- und Warmstarts berücksichtigt. Solche Messungen waren für Pelletöfen in der Literatur vor dem Jahr 2014 praktisch nicht verfügbar und wurden im EMEP/EEA Guidebook – 2019 nicht berücksichtigt.

Der höhere CO-EF-2020 für Raumheizer für feste Brennstoffe (Kategorien 2, 3, 4a, 5) im Vergleich zur Erhebung 2014 ist darauf zurückzuführen, dass für 2020 mit einem Modell der Einfluss der Technologie und verschiedener Betriebseinflüsse anhand vorhandener Daten quantifiziert wurde. In 2014 konnten diese Einflüsse nur aufgrund von Erfahrungen abgeschätzt werden. Im Vergleich mit dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 ist zu sehen, dass der CO-EF-2020 zwischen dem EF für «conventional wood stoves» (4000 g/GJ) und «advanced/ecolabelled stoves and boilers» (2000 g/GJ) liegt. Wenn die Technologie der in der Schweiz installierten Anlagen (56 % konventionell, 44 % modern, siehe Tabelle A. 4 im Anhang A.3) berücksichtigt und auf die EF des EMEP/EEA Guidebook – 2019 angewendet wird, würde sich ein EF für CO von rund 3100 g/GJ ergeben.

Unterschiede der CO-EF-2020 zur letzten Erhebung 2014 der anderen Feuerungen <50 kW (8, 9 und 11b) sind eine teilweise verbesserte Datenlage, und dass diese ausschliesslich anhand der vorhandenen Daten ohne Gewichtung aufgrund von Erfahrungswerten oder Werten des EMEP/EEA Guidebook – 2019 bestimmt wurden.

Der Unterschied der CO-EF-2020 für automatische Feuerungen >50 kW im Vergleich zur Erhebung 2014 [1] ist hauptsächlich auf die unterschiedliche Datenlage zurückzuführen. Im Gegensatz zu 2014 waren für die aktuelle Erhebung eine grosse Anzahl an LRV-Mess- und Langzeitmessdaten verfügbar. Zu einem kleinen Teil sind die tieferen CO-EF in 2020 auch mit neuen verbesserten Anlagen zu erklären.

VOC

Die VOC-EF-2020 wurden analog zur Erhebung 2014 [1] über einen Faktor f aus den CO-EF berechnet (siehe Formel (5)). In der letzten Erhebung 2014 [1] wurden zwei konstante Faktoren aus Literaturwerten bestimmt: ein Wert von 10 % für alle Feuerungen der Kategorien 1-10 und ein Wert von 3.3% für die Kategorien 11-19. Im Gegensatz dazu wurden für die EF-2020 für Feuerungen <50 kW individuelle

Faktoren aus den verfügbaren Literaturdaten für die jeweiligen Kategorien bestimmt. Da für die Kategorien 1, 6, 7 und 10 keine Literaturdaten gefunden wurden, wurde derselbe Faktor wie für die Kategorien 2, 3, 4a und 5 angenommen. Dieser Faktor ist mit 13 % höher als in der Erhebung 2014. Für die Pelletöfen (Kategorie 4b) und die Stückholzkessel (Kategorie 8 und 9) wurden tiefere Faktoren ($f = 5-6 \%$) und für die automatischen Feuerungen <50 kW (Kategorie 11a) und die Pellet-feuerungen <50 kW (Kategorie 11b) wurden höhere Faktoren ($f = 6-7 \%$) angewendet als in der letzten Erhebung 2014.

Für die Kategorien 12-17 wurde ein konstanter Faktor f angenommen (7%), der als Mittelwert über alle verfügbaren Daten aller Feuerungen >50 kW (Kategorien 12-19) gebildet wurde. Für die Kategorien 18 und 19 waren genügend Daten vorhanden, um einen individuellen Faktor f anzuwenden. Diese Werte sind tiefer als jene der anderen automatischen Feuerungen >50 kW. Dies ist zu erwarten, da Anlagen der Kategorien 18 und 19 im Mittel grössere Leistungen aufweisen und in der Regel sehr konstant mit vielen Vollbetriebsstunden und wenigen An- und Abfahrphasen betrieben werden.

Da die Faktoren f aber auch die CO-EF-2020 grösstenteils andere Werte aufweisen als jene der letzten Erhebung 2014 [1], sind die VOC-EF-2020 nur bedingt mit jenen von 2014 vergleichbar. Im EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] werden keine EF für VOC ausgewiesen.

CH₄ und NMVOC

CH₄ und NMVOC wurden analog zur letzten Aktualisierung der Emissionsfaktoren 2014 [1] über einen Faktor α bestimmt (siehe Formel (6) und (7)), der für alle HES-Kategorien als konstant angenommen wurde. Zur Bestimmung des Faktors α wurden nicht nur Daten aus neuen Studien seit 2014, sondern auch diejenigen, die bereits in der Erhebung 2014 [1] verwendet wurden, ausgewertet (siehe Tabelle A.19 im Anhang A.6). Insgesamt liegen 40 Datenpunkte von insgesamt 6 Kategorien (Kat. 2, 3, 4a, 5; 4b, 8, 9, 11a und 11b) bei unterschiedlichen Betriebsphasen (Voll-, Teil- und mittlere Leistung, ganzer Abbrand, Ausbrand, gute und schlechte Verbrennung) und Technologien (modern, konventionell, Öfen und Kessel) vor. Anhand der verfügbaren Daten wurde für α ein Mittelwert von 0.3 ± 0.1 ermittelt. Dieser ist etwas tiefer als der Wert von 0.4, der in [1] angewendet wurde.

PM_{exh}

Für Kleinfeuerungen wird eine gewisse Abhängigkeit von Feinstaub in Form von Russ und organischem Feinstaub von der Ausbrandqualität vorausgesetzt. Ausserdem wird von einer gewissen Gleichläufigkeit von CO und Feinstaubemissionen ausgegangen. Bei automatischen Feuerungen dagegen besteht der Feinstaub grossteils aus anorganischen Verbindungen, die durch vollständige Verbrennung nicht vermindert werden und die PM_{exh}-EF werden in erster Linie durch die Abgasreinigung beeinflusst. Neben der Art der Staubabscheidung ist auch deren Verfügbarkeit im Praxisbetrieb entscheidend. So ist bei Heizanwendungen wegen der geringen Vollbetriebsstundenzahl der Feuerungen eine niedrigere Verfügbarkeit anzunehmen als bei WKK-Anlagen. Letztere werden aus ökonomischen Gründen nur bei mindestens doppelt so hoher Vollbetriebsstundenzahl betrieben und ein Ein-/Aus-Betrieb kann grundsätzlich ausgeschlossen werden, da diese Betriebsart für Dampferzeuger nicht infrage kommt.

Die PM_{exh}-EF-2020 (siehe Tabelle 7) zeigen die Unterschiede und Abstufungen zwischen den Kategorien entsprechend den erwarteten Trends, die bereits bei den EF-2010 [77] und EF-2014 [1] vorhanden waren. Pelletfeuerungen und automatische Feuerungen weisen tiefere EF auf als handbeschickte. Zudem nehmen die PM_{exh}-EF bei den automatischen Feuerungen >50 kW (Kategorien 12-19) mit zuneh-

mender Anlagengrösse ab. Neben dem optimaleren Betrieb von grösseren Anlagen mit mehr Betriebsstunden und weniger An- und Abfahrphasen gibt es auch strengere LRV-Staubgrenzwerte für Anlagen >500 kW. Dies macht den Einsatz von Feinstaubabscheidern praktisch unerlässlich und der stabilere Feuerungsbetrieb führt auch zu höheren Verfügbarkeiten der Feinstaubabscheider. Die PM_{exh} -EF für automatische Pelletfeuerungen >50 kW sind tiefer als jene befeuert mit Waldhackschnitzeln und Restholz. Dies ist vor allem auf die homogenere Brennstoffzusammensetzung (Stückigkeit, Wassergehalt, Holzzusammensetzung) zurückzuführen.

Der Vergleich mit der letzten Erhebung 2014 zeigt ähnliche PM_{exh} -EF für Feuerungen <50 kW ausser für Pelletfeuerungen (Kategorien 4b und 11b), deren EF-2020 deutlich tiefer sind. Für die automatischen Feuerungen >50 kW resultierten generell tiefere und für die Feuerungen >500 kW sogar deutlich tiefere PM_{exh} -EF als in der letzten Erhebung 2014. Die tiefen Werte für 2020 der Kategorien 16-17 und 19 zeigen, dass in dieser Kategorie der Anteil an Anlagen mit Feinstaubabscheider sehr hoch ist (verfügbare Daten zeigen 67% für Kat. 16a, 85% für Kat. 16b, 50% für Kat. 17 und 100% für Kat. 19). In 2014 wurde dieser Anteil wohl teilweise unterschätzt bzw. durch Erneuerung und Sanierung des Anlagenbestandes wurde der Anteil an Feinstaubabscheidern im Vergleich zu 2014 grösser. Unterschiede zu den EF der letzten Erhebung 2014 sind aber teilweise auch auf eine verbesserte Datenlage zurückzuführen, sodass die PM_{exh} -EF-2020 ausschliesslich anhand der vorhandenen Daten ohne Gewichtung aufgrund von Erfahrungswerten und/oder Werte des EMEP/EEA Guidebook – 2019 bestimmt wurden.

Der Vergleich der PM_{exh} -EF-2020 mit den Werten des EMEP/EEA Guidebook – 2019 zeigt ähnliche Werte für die Pelletfeuerungen <50 kW (Kategorien 4b und 11b). Ausserdem zeigt sich, dass der EF-2020 für Stückholzkessel (Kategorien 8 und 9) jenem für «advanced/ecolabelled stoves and boilers» ähnlich ist. Auch die PM_{exh} -EF-2020 für Raumheizer für feste Brennstoffe und offene Chemineés (Kategorien 1-4a und 5) sind tiefer als jene des EMEP/EEA Guidebook – 2019.

Tabelle 7 Emissionsfaktoren von NO_x, CO, VOC, CH₄, NMVOC und PM_{exh} für 2020 und Vergleich mit den Werten aus der letzten Aktualisierung der EF in 2014 [1] und dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3]. Werte in schwarzer Schrift wurden aus vorhandenen Daten bestimmt, Werte in blauer Schrift wurden berechnet (Kapitel 3.5).

HES-Kat.	Bezeichnung	NO _x	CO	VOC =		CH ₄ ^{##}	NMVOC ^{##}	PM _{exh}
		[g/GJ]	[g/GJ]	f * CO f [%]	[g/GJ]	α * VOC [g/GJ]	(1-α) * VOC [g/GJ]	[g/GJ]
1	Offene Cheminées	80*	3000*	13%**	390	120	270	100*
	EF-2014	80	3000	10%	300	120	180	100
	EMEP, open fireplaces	50	4000				600	270
2, 3, 4a, 5	Raumheizer für feste Brennstoffe	85	2800	13%	360	110	250	90
	EF-2014	80	2500	10%	250	100	150	100
	EMEP, Conventional wood stoves	50	4000				600	200
	EMEP, Energy efficient wood stoves	80	4000				350	170
	EMEP, Advanced/ecolabelled stoves and boilers	95	2000				250	54
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	85	390	5%	20	6	14	40
	EF-2014	60	300	10%	30	12	18	60
	EMEP, Pellet stoves and boilers	80	300				10	32
6, 7	Einzelherde f. feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	70*	4000*	13%**	500	150	350	200*
	EF-2014	70	4000	10	400	160	240	200
8,9	Stückholzkessel	100	1700	6%	100	30	70	60
	EF-2014	80	1250	10%	125	50	75	50
	EMEP, conventional boilers < 50 kW	80	4000				350	170
	EMEP, Advanced/ecolabelled stoves and boilers	95	2000				250	54
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	70*	4000*	11%**	500	150	350	200*
	EF-2014	70	4000	10%	400	160	240	200
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	120*	900	7%	60	20	40	90
	EF-2014	120	600	3.3%	20	8	12	100
11b	Pelletkessel <50 kW	70	330	6%	20	6	14	30
	EF-2014	60	200	3.3%	6.7	2.7	4	50
	EMEP, Pellet stoves and boilers	80	300				10	32
12a,14a	Autom. Holzfeuerungen 50–500 kW a.HVB	130	450	7%#	30	10	20	60
	EF-2014	120	500	3.3%	16.7	6.7	10	80
12b,14b	Pelletkessel 50–500 kW	75	170	7%#	10	3	7	30
	EF-2014	60	150	3.3%	5	2.0	3	40
13, 15	Autom. Holzfeuerungen 50–500 kW i.HVB	140	460	7%#	30	10	20	60
	EF-2014	220	500	3.3%	16.7	6.7	10	80
	EMEP, Wood combustion <1MW – Boilers	91	300				12	36
16a	Autom. Holzfeuerungen >500 kW a. HVB	120	140	7%#	10	3	7	10
	EF-2014	135	300	3.3%	10	4	6	70
16b	Pelletkessel >500 kW	75	50	7%#	3	1	2	5
	EF-2014	70	150	3.3%	5	2	3	35
17	Autom. Holzfeuerungen >500 kW i. HVB	120	150	7%#	10	3	7	20
	EF-2014	220	300	3.3%	10	4	6	70
	EMEP, Wood combustion >1MW – Boilers	210	300				12	-
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	40	10	5%	0.5	0.2	0.3	0.3
	EF-2014	120	100	3.3%	3.3	1.3	2.0	12
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	130	60	3%	2	0.6	1.4	1.4
	EF-2014	100	100	3.3%	3.3	1.3	2.0	8

^{##} α = 0.3

* Gleiche Werte wie im EF Modell 2014 [1], da keine neuen Daten verfügbar sind.

** Annahme des gleichen Wertes, wie für die Kat. 2,3,4a,5

Mittelwert aus den Werten für Kat. 16a (n = 4), Kat. 17 (n = 1), Kat 18 (n = 32) und Kat. 19 (n = 65) aus kantonalen Messberichten sowie Kat. 12a, 14a (n = 1) und 16a (n = 4) aus LZM von der Betriebsphase «Feuerungsbetrieb».

4.1.2 PM-Fraktionen und BC

Die EF für BC und die verschiedenen PM-Fraktionen für 2020 und der Vergleich mit den Werten aus dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 sind in Tabelle 8 aufgeführt. Die EF-Berechnung der verschiedenen Schadstoffe ist im Kapitel 3.6 zu finden. Nachfolgend werden die Festlegung der EF-Werte inklusive Unterschiede zwischen verschiedenen Kategorien und Vergleiche mit der letzten Erhebung 2014 [1] und dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] beschrieben.

TSP und PM_{cond}

Die EF für TSP wurden mit dem Verhältnis TSP/PM_{exh} aus PM_{exh} berechnet. Das Verhältnis von TSP/PM_{exh} wurde anhand einer Gegenüberstellung von Daten und verschiedenen Varianten zur Abschätzung von PM_{cond} aus der Literatur abgeschätzt (siehe Tabelle A. 21 im Anhang A.7). Die detaillierten Werte für das Verhältnis TSP/PM_{exh} und die TSP-EF sind in Tabelle 8 zu finden. PM_{cond} wurde anschliessend als Differenz aus TSP und PM_{exh} berechnet.

Literaturdaten zu TSP/PM_{exh} liegen hauptsächlich für Feuerungen <50 kW vor und zeigen einen Bereich von 1.4 bis 7.15. Die Werte im EMEP/EEA Guidebook – 2019 haben eine Bandbreite von 1.9 bis 4.0. Da nur wenige Literaturdaten vorliegen und TSP-EF in diesen Studien auf verschiedene Arten bestimmt wurden, wird für alle Kategorien 1-11a ein TSP/PM_{exh} Verhältnis von 2.0 festgelegt. Dieser Wert ist am unteren Ende der Bandbreite der Werte im EMEP/EEA Guidebook – 2019. Er berücksichtigt aber, dass im Vergleich zu Laborbedingungen in der Atmosphäre höhere Verdünnungsraten von um die 10'000 vorherrschen und sich durch den geringeren Partialdruck viele COC wieder verflüchtigen. Im Umkehrschluss würde eine generelle Umstellung der Staubmessungen auf Messungen mit Verdünnungstunnel zu einer Überschätzung von TSP führen. Ein Wert von 2.0 für das TSP/PM_{exh} -Verhältnis für alle Kategorien 1-11a unterschätzt eventuell die TSP-EF von alten oder schlecht betriebenen handbeschickten Einzelraumfeuerungen. Aufgrund der geringen Datenbasis sind individuelle Werte für einzelne Kategorien jedoch mit noch grösseren Unsicherheiten verbunden als die Festlegung eines gemeinsamen Wertes für alle Feuerungen <50 kW.

Für automatische Feuerungen >50 kW liegen nur zwei Werte für das TSP/PM_{exh} -Verhältnis in der Literatur vor mit Werten von 1.0 und 1.1. Diese Werte spiegeln auch die Erwartungen wider, dass bei optimalem Betrieb und Verbrennung praktisch keine COC anfallen. Aus diesem Grund wird für die Kategorien 12-19 der Wert von 1.1 gewählt, der dem Wert des EMEP/EEA Guidebook – 2019 entspricht. Für Pelletkessel <50 kW (Kategorie 11b) wird ebenfalls der Wert 1.1 festgelegt, da die CO-, VOC- und PM_{exh} -Emissionen dieser Kategorie eher den Emissionen der automatischen Feuerungen >50 kW ähnlich sind als den anderen Feuerungen <50 kW.

Die Verhältnisse TSP/PM_{exh} in der letzten Erhebung 2014 (TSP berechnet als Summe von PM_{exh} und PM_{cond}) sind den aktuellen Werten der Erhebung EF-2020 sehr ähnlich. Dort ergaben sich für die Kategorien 1-4a und 5-10 Werte von 1.6-1.9 und für die Kategorien 11b-19 ein Wert von 1.0. Für die Kategorien 4b und 11a wurden 2014 jedoch tiefere Werte von 1.2 und 1.1 ausgewiesen.

Im Vergleich mit dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 zeigen die TSP-EF-2020 und damit auch die PM_{cond} -EF, ausser für advanced/ecolabelled stoves and boilers und Pelletöfen (Kategorie 4b), deutlich tiefere Werte. Die PM_{cond} -EF der letzten Erhebung 2014 der Kategorien 1-11a zeigen tiefere Werte als die EF-2020. Für die Kategorien 12-19 gibt es eine relativ gute Übereinstimmung, da die Werte auf tiefem Niveau sind (2-5 g/GJ in der Erhebung 2014 und 0.03-6 g/GJ in dieser Studie).

PM Fraktionen – $PM_{10,exh}$, $PM_{2.5,exh}$, $PM_{10,TSP}$, $PM_{2.5,TSP}$, $PM_{10,cond}$, $PM_{2.5,cond}$

$PM_{10,exh}$ und $PM_{2.5,exh}$ wurden wie bei der letzten Aktualisierung mit konstanten Faktoren aus PM_{exh} berechnet. Zur Festlegung der Faktoren $PM_{2.5,exh}/PM_{exh}$ und $PM_{10,exh}/PM_{exh}$ wurden die verfügbaren Daten aus der Literatur mit den Zahlen des EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] und den Zahlen, die in der letzten Aktualisierung 2014 verwendet wurden, verglichen (Tabelle A. 20 im Anhang A.7). Die Zahlen wurden auf ganze 5-er Stellen gerundet, da die Datengrundlage nicht sehr gross ist und die Daten hauptsächlich für Kessel und nur wenige für handbeschickte Öfen vorliegen. Folgende Werte wurden festgelegt:

- $PM_{2.5,exh}/PM_{exh} = 0.90$
- $PM_{10,exh}/PM_{exh} = 0.95$

Diese Werte sind jenen, die im EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] für TSP ausgewiesen sind (0.93 und 0.95) sehr ähnlich, sie sind jedoch höher, als die in der letzten Erhebung 2014 [1] verwendeten Werte (0.80 und 0.90). Es ist anzumerken, dass in der EMIS-Datenbank für die Berechnung des Luftschadstoffemissionsinventars nicht die vorgeschlagenen Fraktionierungswerte der EF-Erhebung 2014 verwendet wurden, sondern die Werte des EMEP/EEA Guidebook – 2013 [79], da erstere vom BAFU als zu tief erachtet wurden.

Für die Fraktionen von TSP ($PM_{10,TSP}$, $PM_{2.5,TSP}$) und PM_{cond} ($PM_{10,cond}$, $PM_{2.5,cond}$) werden dieselben Werte wie für die Verhältnisse $PM_{2.5,exh}/PM_{exh}$ und $PM_{10,exh}/PM_{exh}$ angenommen. Es ist zwar bei TSP und PM_{cond} eine gewisse Verschiebung hin zu grösseren Partikelgrössen im Vergleich zu PM_{exh} durch den höheren Anteil an kondensierten Stoffen zu erwarten, diese dürfte aber maximal wenige 100 nm betragen. Die Partikelgrössen bei Emissionen im heissen Abgas der Holzverbrennung liegen grösstenteils zwischen 70 – 300 nm [80], je nach Feuerungstyp, Brennstoff und Betriebsphase. Eine Verschiebung der Grössenverteilung um einige wenige 100 nm führt daher nicht zum Verlassen der $PM_{2.5}$ Grössenklasse von Partikeln kleiner 2500 nm.

BC

Die EF für BC wurden ebenfalls analog zur letzten Aktualisierung 2014 [1] über das Verhältnis von BC zu $PM_{2.5,exh}$ berechnet. Die festgelegten BC-EF-2020 bzw. $BC/PM_{2.5}$ -Verhältnisse (siehe Tabelle 8) zeigen ähnliche Trends bzw. Abstufungen wie jene für CO und PM_{exh} mit höheren Werten für handbeschickte Feuerungen und einem generellen Trend hin zu tieferen Werten mit zunehmender Anlagengrösse. BC-Emissionen stammen aus unvollständiger Verbrennung, hauptsächlich aus nicht-optimalen Betriebsphasen wie Anfahrphasen oder durch Fehlbetrieb (z.B. Drosselung der Luftzufuhr). Solche treten bei handbeschickten Feuerungen <50 kW deutlich häufiger auf als bei automatischen Feuerungen. Die BC-EF von automatischen Feuerungen sind dagegen tief, da deren Feinstaub aufgrund der besseren Verbrennungsbedingungen sowie längeren und stabileren Betriebszeiten grossteils aus anorganischen Verbindungen besteht und BC-Emissionen ebenfalls in Feinstaubabscheidern reduziert werden.

Für die Kategorien 2, 3, 4a, 5 sowie 4b und 8, 9 wurden die $BC/PM_{2.5}$ -Verhältnisse anhand der vorhandenen Literaturdaten bestimmt. Für Kategorien 1, 6, 7 und 10 gab es keine neuen Daten und daher wurde für diese Kategorien das $BC/PM_{2.5}$ -Verhältnis der Kategorien 2, 3, 4a, 5 eingesetzt.

Zur Bestimmung der $BC/PM_{2.5}$ -Verhältnisse für die automatischen Feuerungen >50 kW (Kategorien 12-19) waren keine verwendbaren Literaturdaten verfügbar. Die $BC/PM_{2.5}$ -Verhältnisse wurden anhand der wenigen verfügbaren Messdaten abgeschätzt. Dabei wurde neben den erwarteten tieferen Werten im

Vergleich zu Feuerungen <50 kW wurde ausserdem berücksichtigt, dass in den Aschen in der Schweiz, je nach Deponieklasse, nur 2-5% Kohlenstoff enthalten sein darf.

Aufgrund der sehr geringen Anzahl an Literaturdaten, wurden die BC/PM_{2.5}-Verhältnisse für die Kategorien 11a und 11b ebenfalls abgeschätzt. Der Wert für Kategorie 11a entspricht dem Mittelwert der BC/PM_{2.5}-Verhältnisse der Kategorien 12a, 14a und Kat. 8,9. Für Kategorie 11b wurde der Mittelwert der BC/PM_{2.5}-Verhältnisse der Kategorien 4b und 12b gebildet und aufgerundet.

Die BC-EF-2020 stimmen für einige Kategorien relativ gut mit den Werten des EMEP/EEA Guidebook – 2019 überein, obwohl es für die PM_{exh} und damit PM_{2.5exh} derselben Kategorien nicht immer eine ähnlich gute Übereinstimmung gibt. Die Ursache dafür ist, dass die BC/PM_{2.5}-Verhältnisse im EMEP/EEA Guidebook – 2019 für Feuerungen <50 kW (mit Ausnahme von Kat. 4b und 11b, wo die Werte relativ gut übereinstimmen) deutlich tiefer sind als jene in dieser Studie.

Im Vergleich zur letzten Erhebung 2014 wurden für die Kategorien 1-10 um 10 Prozentpunkte tiefere und auch für die Kategorien 12a-18 (ohne 12b, 14b und 16b) geringfügig tiefere (2.5 bis 5 Prozentpunkte) BC/PM_{2.5}-Verhältnisse angenommen. Im Gegensatz zu 2014 (mit höheren Verhältnissen für Pelletfeuerungen) wurde aktuell keine Unterscheidung für automatische Pelletfeuerungen (Kategorie 12b, 14b und 16b) und anderen automatischen Feuerungen derselben Grösse gemacht, da es dazu keine Daten gibt. Für die Kategorie 19 sind die Werte 2014 und 2020 identisch. Einzig für die Kategorien 11a und 11b wurden nun höhere (10 bzw. 5 Prozentpunkte) Verhältnisswerte angenommen.

Tabelle 8 Emissionsfaktoren der verschiedenen PM Fraktionen und BC für 2020 und Vergleich mit den Werten aus dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 (Tabelle 3.49 für PM_{exh} und BC und Tabellen 3.39-3.48 für TSP) und der letzten Erhebung 2014 [1]. Zahlen in schwarzer Schrift wurden aus vorhandenen Daten bestimmt, Zahlen in blauer Schrift wurden berechnet (siehe Kapitel 3.6).

HES-Kat	Bezeichnung	PM _{exh}	PM _{10,exh} [g/GJ]	PM _{2.5,exh}	BC/PM _{2.5,exh} [%]	BC [g/GJ]	TSP/PM _{exh} [-]	TSP	PM _{10,TSP} [g/GJ]	PM _{2.5,TSP}	PM _{cond}	PM _{10,cond} [g/GJ]	PM _{2.5,cond}
1	Offene Kaminöfen	100	95	90	70%	60	2.0	200	190	180	100	95	90
	EF-2014	100	90	80	80%	64	1.9	190			90		
	EMEP, open fireplaces	270	260	240	24%	58	3.3	880	840	820	610	580	580
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe	90	86	81	70%	57	2.0	180	171	162	90	85	81
	EF-2014	100	90	80	80%	64	1.8	175			75		
	EMEP, conventional wood stoves	200	160	140	53%	74	4.0	800	760	740	600	600	600
	EMEP, energy efficient wood stoves	170	150	140	43%	60	2.4	400	380	370	230	230	230
	EMEP, advanced/ecolabelled stoves and boilers	54	49	47	55%	26	1.9	100	95	93	46	46	46
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	40	38	36	40%	14	2.0	80	76	72	40	38	36
	EF-2014	60	54	48	50%	24	1.2	69			9		
	EMEP, pellet stoves and boilers	32	30	30	30%	9	1.9	62	60	60	30	30	30
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	200	190	180	70%	130	2.0	400	380	360	200	190	180
	EF-2014	200	190	180	80%	144	1.6	320			120		
8,9	Stückholzkessel	60	57	54	30%	16	2.0	120	114	108	60	57	54
	EF-2014	50	45	40	40%	16	1.8	88			38		
	EMEP, conventional boilers < 50 kW	170	150	140	54%	76	2.9	500	480	470	330	330	330
	EMEP, advanced/ecolabelled stoves and boilers	54	49	47	55%	26	1.9	100	95	93	46	46	46
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	200	190	180	70%	130	2.0	400	380	360	200	190	180
	EF-2014	200	190	180	80%	144	1.6	320			120		
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	90	86	81	20%	16	2.0	180	171	162	90	85	81
	EF-2014	100	90	80	10%	8	1.1	106			6		
11b	Pelletkessel <50 kW	30	29	27	25%	7	1.1	33	31	30	3.0	2.9	2.7
	EF-2014	50	45	42	20%	8	1.0	52			2.0		
	EMEP, pellet stoves and boilers	32	30	30	30%	9	1.9	62	60	60	30	30	30
12a,14a	Automatische Holzfeuerungen 50-500 kW a.HVB	60	57	54	5%	3	1.1	66	63	59	6.0	5.7	5.4
	EF-2014	80	72	64	10%	6	1.1	85			5.0		
12b,14b	Pelletkessel 50–500 kW	30	29	27	5%	1	1.1	33	31	30	3.0	2.9	2.7
	EF-2014	40	36	32	20%	6	1.0	42			1.5		
13,15	Automatische Holzfeuerungen 50-500 kW i.HVB	60	57	54	5%	3	1.1	66	63	59	6.0	5.7	5.4
	EF-2014	80	72	64	10%	6	1.1	85			5.0		
	EMEP, wood combustion <1MW – Boilers automatic	36	34	33	17%	6	1.1	40	38	37	4	4	4
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a HVB	10	9.5	9.0	2.5%	0.2	1.1	11	10.5	9.9	1.0	0.95	0.90
	EF-2014	70	63	56	5%	3	1.0	73			3.0		
16b	Pelletkessel >500 kW	5	4.8	4.5	2.5%	0.1	1.1	5.5	5.2	5.0	0.50	0.48	0.45
	EF-2014	35	32	28	10%	3	1.0	34			1.5		
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i.HVB	20	19	18	2.5%	0.5	1.1	22	21	20	2.0	1.9	1.8
	EF-2014	70	63	56	5%	3	1.0	73			3.0		
	EMEP, wood combustion >1MW – Boilers	-	-	-	-	-	-	40	38	37	-	-	-
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	0.3	0.31	0.30	1%	0.003	1.1	0.36	0.35	0.33	0.03	0.03	0.03
	EF-2014	12	11	10	5%	0.5	1.1	13			1.0		
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	1.4	1.33	1.26	2.5%	0.03	1.1	1.54	1.46	1.39	0.14	0.13	0.13
	EF-2014	8	7.2	6.4	2.5%	0.2	1.1	9			1.0		

4.1.3 Schwermetalle und PAK

Zur Herleitung der EF-2020 für Schwermetalle und PAK wurde pro Schadstoff eine Übersichtstabelle erstellt (siehe Tabelle A. 22 bis Tabelle A. 29 im Anhang A.8 und A.9), in der alle verfügbaren Daten verglichen werden. Die EF für 2020 wurden anschliessend auf Basis dieser Übersichtstabellen festgelegt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 dargestellt und werden nachfolgend näher beschrieben.

Tabelle 9: Emissionsfaktoren 2020 für Schwermetalle und PAK, sowie Vergleich mit den Werten des EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3].

HES-Kat.	Bezeichnung	Pb	Zn	Cd	Hg	B(a)P	B(b)F	B(k)F	I(cd)P
		[mg/GJ]				[mg/GJ]			
1	Offene Cheminées	20	300	1	2	50	50	30	30
	EMEP, open fireplaces	27	512	13	0.6	121	111	42	71
2, 3, 4a, 5	Raumheizer für feste Brennstoffe	20	300	1	2	50	50	30	30
	EMEP, conventional wood stoves	27	512	13	0.6	121	111	42	71
	EMEP, energy efficient wood stoves	27	512	13	0.6	121	111	42	71
	EMEP, advanced/ecolabelled stoves and boilers	27	512	13	0.6	10	16	5	4
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	20	300	1	2	10	10	4	4
	EMEP, pellet stoves and boilers	27	512	13	0.6	10	16	5	4
6,7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	20	300	1	2	50	50	30	30
8, 9	Stückholzkessel	20	300	1	2	30	30	15	15
	EMEP, conventional boilers < 50 kW	27	512	13	0.6	121	111	42	71
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	20	300	1	2	100	100	60	60
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	20	300	1	2	10	10	4	4
11b	Pelletkessel <50 kW	20	300	1	2	10	10	4	4
	EMEP, pellet stoves and boilers	27	512	13	0.6	10	16	4	4
12a	Automatische Holzfeuerungen 50–300 kW a. HVB	15	225	1	2	5	5	3	3
12b	Pelletkessel 50–300 kW	15	225	1	2	5	5	3	3
13	Automatische Holzfeuerungen 50–300 kW i. HVB	15	225	1	2	5	5	3	3
14a	Automatische Holzfeuerungen 300–500 kW a. HVB	10	150	1	2	1	1	1	1
14b	Pelletkessel 300–500 kW	10	150	1	2	1	1	1	1
15	Automatische Holzfeuerungen 300–500 kW i. HVB	10	150	1	2	1	1	1	1
	EMEP, wood combustion <1MW – Boilers	27	512	13	0.6	10	16	5	4
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB	10	150	1	2	1	1	1	1
16b	Pelletkessel >500 kW	10	150	1	2	1	1	1	1
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB	10	150	1	2	1	1	1	1
	EMEP, wood combustion >1MW – Boilers	27	512	13	0.6	10	16	5	4
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	10	150	1	2	0.1	0.1	0.1	0.1
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	100	1200	2	2	1	1	1	1

4.1.3.1 Schwermetalle

Die Schwermetallemissionen vor einer allfälligen Abscheideeinheit sind hauptsächlich von den entsprechenden Schwermetallgehalten im Brennstoff abhängig. Diese unterliegen allerdings einer grossen Schwankungsbreite. Während für naturbelassenes Waldholz in der Regel von niedrigen Gehalten ausgegangen werden kann, kann der Schwermetallgehalt einerseits in verarbeitetem Holz und insbesondere in Altholz deutlich erhöht sein. Andererseits sind beispielsweise aber auch in Holz aus Obstplantagen oder von Autobahn- und Eisenbahnböschungen erhöhte Schwermetallgehalte möglich.

Pb und Zn

Für Pb und Zn wurden jeweils folgende HES-Kategorien zusammengefasst und deren EF bestimmt. Die Werte wurden auf ganze Zahlen gerundet. Dieses Vorgehen ist identisch mit der letzten Erhebung 2014 [1].

- 1-11b
- 12a-13
- 14a-18
- 19

Für die Kategorien 12a bis 18 gab es eine gewisse Anzahl an Messdaten. Für den Pb- und Zn-EF-2020 der Kategorien 14a bis 18 wurde der Mittelwert über diese Daten angewendet. Für die Feuerungen <50 kW (Kategorien 1-11b) wird analog zur letzten Erhebung 2014 von einer Verdopplung dieser Werte ausgegangen. Aufgrund der tieferen Verbrennungstemperaturen gibt es zwar weniger Schwermetalle im Abgas, jedoch sind bei grösseren Anlagen (>500 kW) oftmals Feinstaubabscheider installiert, die einen Grossteil von Blei und Zink abscheiden. Durch Bildung eines gewichteten Mittelwertes aus den verfügbaren neuen Literaturdaten (Mittelwert * 0.9 + max. Wert * 0.1) ergeben sich für die Kategorien 1-11b dieselben Werte wie mit der Verdopplung der EF für die Kategorien 16a-18. Für die Feuerungen mit 50-300 kW (Kategorien 12a-13) werden für den Pb- und Zn-EF ein Mittelwert zwischen den Werten der Kategorien 1-11b und 16a-18 eingesetzt. In der letzten Erhebung 2014 wurden für diese Kategorien noch dieselben EF wie für die Kategorien 1-11b eingesetzt. Für die Feuerungen mit 300-500 kW (Kategorien 14a-15) wird derselbe Werte wie für die Kategorien 16a bis 18 eingesetzt. Da davon ausgegangen wird, dass auch immer mehr Feuerungen mit 50-300 kW bzw. eine überwiegende Anzahl der Anlagen mit 300-500 kW eine Feinstaubabscheidung aufweisen, um die seit 2012 geltenden Grenzwerte für PM_{exh} von 50 mg/m³ einhalten zu können. Für Altholzfeuerungen (Kategorie 19) sind zahlreiche Daten von LRV-Messungen vorhanden. Da diese Messungen angekündigt sind und die Feuerungen meist im optimalen Zustand betrieben werden, wird für den EF-2020 eine Verdopplung des Messwerts aus den LRV-Messungen angenommen.

Die Pb- und Zn-EF-2020 sind deutlich tiefer als in der letzten Erhebung 2014 [1] und für Zn auch deutlich tiefer als im EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3]. Für die Kategorien 12-19 wurden in diesen beiden Quellen jedoch keine bzw. nur sehr wenige Literaturdaten (n < 4) verwendet. Für die EF-2020 waren nun aber einige aktuelle Messdaten von Anlagen in der Schweiz verfügbar (LRV-Messungen und Zusatzmessungen). Diese werden als zuverlässiger angesehen als die Quellen des EMEP/EEA Guidebook – 2019. Es ist anzumerken, dass aufgrund der sehr geringen Datenlage in der EMIS-Datenbank für die Berechnung des Luftschadstoffemissionsinventars (Submissionen 2016-2020) nicht die vorgeschlagenen EF-Werte der Erhebung 2014, sondern die Werte des EMEP/EEA Guidebook – 2013 verwendet wurden (EF-Werte des EMEP/EEA Guidebook – 2019 sind identisch mit EMEP/EEA Guidebook – 2013).

Cd und Hg

Für Cd wird für die Kategorien 1-18 derselbe Wert eingesetzt, der dem Mittelwert über alle verfügbaren Daten (Literaturwerte, die für diese Studie gefunden wurden, Literaturwerte der Erhebung 2014 und verfügbare Messdaten) entspricht. Cd-Emissionen werden ausschliesslich durch das im Brennstoff vorhandene Cd verursacht. Ähnlich wie für Pb und Zn kann angenommen werden, dass bei Feuerungen <50 kW aufgrund der tieferen Verbrennungstemperaturen und des geringeren Wirkungsgrades weniger

Cd in das Abgas transferiert wird als bei grösseren Feuerungen. Andererseits wird Cd zu einem grossen Teil in Feinstaubabscheidern abgeschieden, die aufgrund der geltenden Staubgrenzwerte bei praktisch allen neu installierten Feuerungen >300 kW eingesetzt werden. Da die Abscheideeffizienz für Cd geringer ist als für Pb und Zn (in [1] wird von 50 % ausgegangen) wird für die Kategorien 12-18 nicht von tieferen Cd-EF ausgegangen. Für den Cd-EF-2020 der Kategorie 19 wird ein doppelt so hoher Wert angenommen, aus demselben Grund wie für Pb und Zn.

Für die Hg-EF-2020 wird derselbe Wert für alle HES-Kategorien angenommen. Dies entspricht dem Vorgehen der letzten Erhebung 2014 [1] und dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3]. Hg ist leichtflüchtig und wird in Elektroabscheidern oder Gewebefiltern praktisch nicht abgeschieden, weshalb der Hg-EF hauptsächlich vom Hg-Gehalt des Brennstoffs abhängig ist. Im Gegensatz zu Pb, Zn und Cd wird für die Altholzfeuerungen (Kategorie 19) kein höherer EF als für die anderen Kategorien festgelegt, da die verfügbaren Messdaten dies nicht zeigen.

Im Vergleich zur letzten Erhebung 2014 und dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 sind die Cd-EF-2020 deutlich tiefer und die Hg-EF-2020 deutlich höher. Für die EF-2020 waren nun aber einige aktuelle Messdaten von Praxisanlagen in der Schweiz verfügbar und diese werden als zuverlässiger angesehen als die Quellen des EMEP/EEA Guidebook – 2019.

Es ist anzumerken, dass in der EMIS-Datenbank für die Berechnung des Luftschadstoffemissionsinventars (Submissionen 2016-2020) die EF-Werte des EMEP/EEA Guidebook – 2013 und nicht die vorgeschlagenen Werte der Erhebung 2014 verwendet wurden (EF-Werte des EMEP/EEA Guidebook – 2019 sind identisch mit EMEP/EEA Guidebook – 2013).

4.1.3.2 PAK

Zur Festlegung der PAK-EF-2020 wird dasselbe Vorgehen wie bei der letzten Erhebung 2014 [1] verwendet. Für B(a)P und B(b)F sowie B(k)F und I(cd)P werden für die Kategorien 1-13 dieselben EF eingesetzt und für die Kategorien 14a-19 werden für alle vier PAK dieselben EF festgelegt. Nachfolgend wird die Herleitung der EF der verschiedenen Kategorien beschrieben, die anhand der Tabelle A. 26 bis Tabelle A. 29 im Anhang A.9 vorgenommen wurde. Die Festlegung der PAK-EF-2020 beruht hauptsächlich auf Literaturwerten, da nur von zwei Anlagen aktuelle Messdaten verfügbar sind. Ausserdem ist anzumerken, dass die Literaturdaten einzelner PAK grosse Bandbreiten aufweisen, die für einige Feuerungskategorien mehrere Grössenordnungen ausmachen. PAK stammen von nicht-optimalen Betriebsphasen und dabei hauptsächlich von Anfahrphasen. Aus diesem Grund wird für die PAK-EF-2020 von einem ähnlichen Trend wie für CO mit abnehmenden Werten bei zunehmender Anlagengrösse ausgegangen. Für automatische Feuerungen >50 kW wird erwartet, dass sie weniger Starts aufweisen und grundsätzlich besser betrieben werden als Feuerungen <50 kW.

Der EF der verschiedenen PAK für Raumheizer für feste Brennstoffe (Kategorien 2, 3, 4a, 5) entspricht den Mittelwerten der Literaturdaten (Mittelwert über B(a)P und B(b)F sowie B(k)F und I(cd)P) und ist identisch mit dem Wert der letzten Erhebung 2014 [1].

Für die Kategorien 1, 6, 7 wurde derselbe Wert eingesetzt wie für die Kat. 2, 3, 4a, 5, da für diese Anlagen keine Daten gefunden wurden und dieses Vorgehen bereits für andere EF-2020 (z.B. CO, siehe Kapitel 4.1.1) angewendet wurde.

Für die Pelletfeuerungen <50 kW (Kategorien 4b und 11b) wird der Mittelwert über alle verfügbaren Literaturdaten gebildet und für die Kategorie 4b (Pelletöfen) und 11b (Pelletkessel) derselbe Wert eingesetzt.

Für die Stückholzkessel (Kategorien 8 und 9) werden als EF die Mittelwerte aus den EF für die Kat. 2, 3, 4a, 5 sowie 4b und 11b gebildet. Für B(k)F und I(cd)P ist der Wert identisch mit dem Wert der letzten Erhebung 2014.

Für die Kategorie 10 (Doppel und Wechselbrandkessel) wird derselbe Werte wie in 2014 eingesetzt. Aus Expertensicht ist aufgrund des technologischen Prinzips dieser Kategorie von einer Verdoppelung des EF im Vergleich zur Kategorie 8 und 9 auszugehen. Ausserdem ist aufgrund der geringen Anlagenzahl nicht zu erwarten, dass es für diese Technologie noch Weiterentwicklungen gibt. Zudem zeigt die HES [2], dass die Anlagenzahl in der Schweiz in den letzten Jahren stark gesunken ist und es wird erwartet, dass sich dieser Trend fortsetzt.

Aufgrund der geringen Datenlage wird für die Kategorie 11a derselbe Wert wie für die Kategorien 4b und 11b angenommen.

Der PAK-EF für die Kategorien 14a-17 und 19 entspricht ungefähr dem Mittelwert aus den minimalen und maximalen Werten der Bandbreite der acht vorhandenen Quellen (sieben Literaturstudien und ein Messwert). Dieser Wert ist im Vergleich zur letzten Erhebung 2014 [1] tiefer. Zudem wird für 2020 keine Unterscheidung mehr für Kategorien 300-500 kW (Kategorien 14a-15) und >500 kW (Kategorien 16a, 17 und 19) vorgenommen, was den Trend widerspiegelt, dass 2020 deutlich mehr Anlagen mit Feinstaubabscheider (in allen Kategorien >300 kW) ausgerüstet sind als noch 2014.

Für die automatischen Feuerungen 50-300 kW (Kategorien 12a-13) wird ein Wert zwischen jenen der Kategorien 14a-17 sowie 19 und den Kategorien 11a und 11b gewählt. Aufgrund der grösseren Anlagengrössen kann von einer geringeren Anzahl Starts und Stopps als für die Kategorien 11a und 11b ausgegangen werden, jedoch ist der Anteil an Anlagen mit Feinstaubabscheider geringer als jener der Kategorien 14a-17 und 19.

Für die Kategorie 18 (WKK-Anlagen) wird ein deutlich tieferer Wert als für die anderen automatischen Feuerungen >500 kW angenommen, da diese Anlagen meist sehr gross sind (>10 MW) und daher praktisch durchgehend ohne Start und Stopp betrieben werden.

Die PAK-EF-2020 sind für die meisten HES-Kategorien deutlich tiefer als jene im EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] und nur für die Pelletfeuerungen <50 kW sind die Werte gleich. Die EF-2020 sind aber nur bedingt mit jenen des EMEP/EEA Guidebook – 2019 vergleichbar, da diese auf einer geringen Anzahl Studien beruhen die zudem teilweise mit Brennstoffen und/oder Technologien durchgeführt wurden, die für die Schweiz nicht üblich sind bzw. in der Schweiz von einer höheren Qualität der Feuerungen ausgegangen werden kann.

4.1.4 NH₃, SO_x, Benzol

Die EF-2020 für SO_x und NH₃ wurden, analog zum Vorgehen für Schwermetalle und PAK, anhand einer Übersichtstabelle festgelegt (Tabelle A. 30 im Anhang A.10 und Tabelle A. 31 im Anhang A.11), in der alle verfügbaren Daten verglichen wurden. Die Benzol-EF-2020 wurden anhand der Verhältnisse Benzol/VOC und Benzol/CH₄ aus der Literatur berechnet und als Mittelwert der mit den verschiedenen Verhältnissen berechneten Benzolwerte je Kategorie bestimmt. (siehe Tabelle A. 32 und Tabelle A. 33 im

Anhang A.12). Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 dargestellt und die Herleitung der EF für die verschiedenen HES-Kategorien wird nachfolgend näher beschrieben.

Tabelle 10 Emissionsfaktoren 2020 für SO_x, NH₃ und Benzol sowie Vergleich mit den Werten des EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3].

HES-Kat.	Bezeichnung	SO _x	NH ₃ [g/GJ]	Benzol
1	Offene Cheminées EMEP, open fireplaces	10	5	10
		11	70	-
2, 3, 4a, 5	Raumheizer für feste Brennstoffe EMEP, conventional wood stoves EMEP, energy efficient wood stoves EMEP, advanced/ecolabelled stoves and boilers	10	5	10
		11	70	-
		11	37	-
		11	37	-
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets EMEP, pellet stoves and boilers	10	2	1
		11	12	-
6,7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	10	5	15
8, 9	Stückholzkessel EMEP, conventional boilers < 50 kW EMEP, conventional boilers < 50 kW	10	2	5
		11	74	-
		11	37	-
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	10	5	15
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	10	2	2
11b	Pelletkessel <50 kW EMEP, pellet stoves and boilers	10	2	1
		11	11	-
12a, 14a	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW a. HVB	3	2	1
12b, 14b	Pelletkessel 50–500 kW	3	2	0.4
13, 15	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW i. HVB EMEP, wood combustion <1MW – Boilers	3	2	1
		11	37	-
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB	3	2	0.4
16b	Pelletkessel >500 kW	3	2	0.2
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB EMEP, wood combustion >1MW – Boilers	3	2	0.4
		11	37	-
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	1	2	0.05
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	20	5	0.1

SO_x

In der letzten Erhebung der EF-2014 [1] wurde für die SO_x-EF der Kategorien 1-18 derselbe Wert gewählt und nur für Altholzfeuerungen (Kategorie 19) ein höherer Wert eingesetzt. Für die SO_x-EF-2020 wurden vier verschiedene EF-Werte festgelegt:

- Für die Kategorien 1-11b wurde der Mittelwert über alle verfügbaren Literaturdaten gebildet und auf 10 g/GJ aufgerundet. Dieser Wert entspricht auch dem Wert der letzten Erhebung 2014 und ist den Werten des EMEP/EEA Guidebook – 2019 sehr ähnlich.
- Für die SO_x-EF der Kategorien 12a-17 wurde ebenfalls der Mittelwert über alle verfügbaren Literaturdaten gebildet. Dieser Wert (3 g/GJ) entspricht dem Maximalwert der Bandbreite der verfügbaren Messdaten (inkl. Kategorie 18) und ist deutlich tiefer als der EF der letzten Erhebung 2014 und des EMEP/EEA Guidebook – 2019. Beim Einsatz von naturbelassenem Holz oder Pellets hängen die SO_x-Emissionen in erster Linie vom Schwefelgehalt des Brennstoffs und nicht von der Verbrennungsart ab. Die tieferen EF für automatische Feuerungen >50 kW wird auf den besseren Wirkungsgrad zurückgeführt, sodass für dieselbe Leistung weniger Holz

verbrannt werden muss als in kleinen Feuerungen. Bei Feuerungen innerhalb holzverarbeitenden Betrieben (i.HvB) kann davon ausgegangen werden, dass je nach Verarbeitung in der Holzindustrie ein Schwefeleintrag (z.B. durch Sulfate in Klebern und Härterkomponenten von Spanplatten) stattfindet [1]. Aufgrund der unsicheren Datenlage wurde jedoch wie bereits bei der letzten Erhebung 2014 auf eine Unterscheidung des SO_x-EF-2020 zwischen i.HvB und a.HvB Anlagen verzichtet.

- Für Kategorie 18 sind 26 und für Kategorie 19 drei Messungen verfügbar. Die SO_x-EF werden mit dem Mittelwert aus diesen Messdaten je Kategorie bestimmt. Für die Kategorie 19 ergibt sich derselbe Wert wie für die letzte Erhebung 2014. Dort wurde der erhöhte Wert im Vergleich zu den anderen automatischen Feuerungen >50 kW damit erklärt, dass nicht alle Altholzfeuerungen über Gewebefilter mit Schadgas-Sorption verfügen.

NH₃

Zur Festlegung der NH₃-EF-2020 sind für die meisten Kategorien im Vergleich zur letzten Erhebung 2014 keine neuen Daten verfügbar. Nur für die Kategorien 18 (n = 37) und 19 (n = 3, 2 SNCR mit Harnstoff, 1 SCR) können einige neue Messdaten herangezogen werden. Daher wurden für die Kategorien 1-17 dieselben NH₃-EF wie für 2014 festgelegt. Die Literaturdaten (je eine Studie) für die Kategorien 4b, 11b und ein Messwert für die Kategorie 16a stützen die angenommenen Werte.

Für die Kategorien 18 und 19 wurde der NH₃-EF-2020 als Mittelwert über die verfügbaren Messdaten gebildet und grosszügig gerundet.

Im Vergleich zum EMEP/EEA Guidebook – 2019 sind die NH₃-EF-2020 deutlich tiefer, teilweise sogar um mehr als eine Grössenordnung. Die Werte im Guidebook beruhen jedoch nur auf einer einzigen Studie und die Zahlen werden daher als wenig belastbar eingestuft. Zudem ist in [1] angeführt, dass grundsätzlich davon auszugehen ist, dass Ammoniak bei Anwesenheit von Sauerstoff in der Flamme zu NO oxidiert und somit bei einem Luftüberschuss von deutlich über 1 und nahezu vollständiger Verbrennung nur noch Spuren von Ammoniak im Abgas zu erwarten sind. Die Erfahrung, dass Ammoniak in der Flamme rasch verbrennt, wurde in [1] auch durch Erkenntnisse bei der Ammoniak-Eindüsung in SNCR-Verfahren bestätigt, wo durch zu frühes Eindüsen von Ammoniak kaum mehr eine NO-Minderung erzielt wurde, da Ammoniak grossteils verbrennt. Als weitere Erklärung für die tieferen NH₃-EF-2020 im Vergleich zum EMEP/EEA Guidebook – 2019 wurde bereits in [1] angeführt, dass Ammoniak als Vergasungsprodukt aus Brennstoffstickstoff entsteht, erhöhte Emissionen im Abgas allenfalls infolge von Gassträhnen, die unvermischt den Feuerraum passieren, denkbar sind, was aber gleichzeitig mit hohen CO-Emissionen verbunden und in erster Linie nur bei einfachen handbeschickten Feuerungen zu erwarten ist.

Benzol

In der Regel entstehen Benzol-, VOC- und CH₄-Emissionen in Holzfeuerungen während ähnlichen Bedingungen. Daher kann von einer gewissen Proportionalität dieser Emissionen ausgegangen werden. Aus diesem Grund wurden Literaturdaten zu den Verhältnissen von Benzol zu VOC und von Benzol zu CH₄ zusammengestellt (siehe Tabelle A. 32 im Anhang A.12). Neben dem Vergleich mit den Werten der letzten Erhebung 2014, dem EMEP/EEA Guidebook – 2019, den Literaturdaten und den verfügbaren Messdaten, wurden in Tabelle A. 33 im Anhang A.12 die Benzol-EF mit verschiedenen Varianten

(mit individuellen Verhältnissen für verschiedene Kategorien oder mit einem einzigen mittleren Verhältnis für alle Kategorien) aus den VOC- und CH₄-EF-2020 berechnet. Da die Datenlage für VOC und CH₄ viel besser ist als für Benzol (Literatur und Messdaten) wurden die Benzol-EF-2020 anhand der Verhältnisse Benzol/VOC und Benzol/CH₄ aus der Literatur berechnet. Dazu sind insgesamt 32 Datenpunkte zu verschiedenen Feuerungen, Technologien und Betriebsphasen aus 11 Studien verfügbar (siehe Tabelle A. 32 im Anhang A.12). Die Benzol-EF-2020 der verschiedenen Kategorien wurden schliesslich als Mittelwert der mit den verschiedenen Verhältnissen berechneten Benzolwerte je Kategorie bestimmt. Im Vergleich zu den EF der letzten Erhebung 2014 sind die EF-2020 für alle Kategorien tiefer, vor allem für die Kategorien 1-10. Im EMEP/EEA Guidebook – 2019 sind keine Benzol-EF ausgewiesen.

4.1.5 PCDD/F, PCB, HCB

Die EF-2020 für PCDD/F, PCB, HCB wurden, analog zum Vorgehen für Schwermetalle, PAK, NH₃ und SO_x anhand von Übersichtstabellen festgelegt (siehe Tabelle A. 34 bis Tabelle A. 36 im Anhang A.13 bis A.15), in der alle verfügbaren Daten verglichen wurden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 dargestellt. Die Herleitung der EF für die Schadstoffe und HES-Kategorien wird nachfolgend näher beschrieben.

Tabelle 11 Emissionsfaktoren 2020 für PCDD/F, PCB, HCB sowie Vergleich mit den Werten des EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3].

HES-Kat.	Bezeichnung	PCDD/F	PCB	HCB
		[µg TEQ/GJ]	[µg/GJ]	[µg/GJ]
1	Offene Cheminées EMEP, open fireplaces	0.5	0.06	5
		0.8	0.06	5
2, 3, 4a, 5	Raumheizer für feste Brennstoffe EMEP, conventional wood stoves EMEP, energy efficient wood stoves EMEP, advanced/ecolabelled stoves and boilers	0.5	0.06	5
		0.8	0.06	5
		0.25	0.03	5
		0.1	0.07	5
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets EMEP, pellet stoves and boilers	0.05	0.01	5
		0.1	0.01	5
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	0.5	0.06	5
8, 9	Stückholzkessel EMEP, conventional boilers < 50 kW EMEP, conventional boilers < 50 kW	0.25	0.02	5
		0.55	0.06	5
		0.1	0.07	5
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	0.5	0.06	5
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	0.1	0.02	5
11b	Pelletkessel <50 kW EMEP, pellet stoves and boilers	0.05	0.01	5
		0.1	0.01	5
12a, 14a	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW a. HVB	0.05	0.01	5
12b, 14b	Pelletkessel 50–500 kW	0.05	0.01	5
13, 15	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW i. HVB EMEP, wood combustion <1MW – Boilers	0.1	0.01	5
		0.1	0.01	5
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB	0.05	0.01	1
16b	Pelletkessel >500 kW	0.05	0.01	1
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB EMEP, wood combustion >1MW – Boilers	0.1	0.01	1
		0.1	0.01	5
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	0.01	0.01	1
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	0.05	0.01	1

PCDD/F

Zur Festlegung der PCDD/F-EF-2020 konnte eine geringe Anzahl an Literaturdaten und Messdaten, vor allem für Kategorie 18 (n = 10), herangezogen werden. Weiter ist zu beachten, dass PCDD/F-Emissionswerte sehr stark durch den Brennstoff und insbesondere die Verwendung unzulässiger Brennstoffe (v. a. mit PVC und evtl. Kupfer belastet) beeinflusst werden. Insofern hängt die Festlegung des Emissionsfaktors stark von der Annahme des Anteils unzulässig betriebener Holzfeuerungen ab. Mit den vorgeschlagenen Emissionsfaktoren wird vorausgesetzt, dass der Grossteil der Feuerungen korrekt betrieben wird. Zudem wird der zu erwartende Trend zu tieferen PCDD/F-Werten mit zunehmender Anlagengrösse berücksichtigt.

Für die HES-Kategorien 1-3, 4a, 5-7 und 10 wurde derselbe Wert eingesetzt. Dieser wurde als Mittelwert über alle verfügbaren Literaturdaten (inklusive jener, die bereits für die letzte Erhebung 2014 [1] verwendet wurden) gebildet und der Wert dann von ~0.2 µg I TEQ/GJ auf 0.5 µg I TEQ/GJ nach oben korrigiert. Dies wurde gemacht, um den missbräuchlichen Einsatz von falschem Brennstoff zu berücksichtigen, der in wenigen Einzelfällen nicht auszuschliessen ist und überproportional zu den Emissionen beiträgt. Die Werte sind mit jenen des EMEP/EEA Guidebook – 2019 vergleichbar.

Die PCDD/F-EF-2020 für die Kategorien 4b, sowie 11 bis 17 wurden mangels neuer Daten anhand der Werte der letzten Erhebung 2014 abgeschätzt. Für Pelletfeuerungen (Kategorien 4b, 11b, 12b, 14b und 16b) wurden dieselben Werte wie bereits 2014 eingesetzt. Der tiefere PCDD/F-EF-2020 für Pelletfeuerungen <50 kW im Vergleich zum EMEP/EEA Guidebook – 2019 wurde bereits in [1] damit erklärt, dass in der Schweiz die Verwendung von DINplus-Pellets bzw. ENplus-A1 vorausgesetzt wird und dadurch ein erhöhter Eintrag von Chlor und Kupfer in die Feuerungen weitgehend ausgeschlossen werden kann. Im Gegensatz zu 2014 wurden für die Kategorien ausserhalb von Holzverarbeitungsbetrieben (Kategorien 12a, 14a und 16a) dieselben Werte angenommen wie für Pelletfeuerungen >50 kW, die tiefer sind als jene für i.Hv.-Betriebe (Kategorien 13, 15 und 17). Damit wird berücksichtigt, dass in i.Hv.-Betrieben auch Restholz verbrannt wird, welches vereinzelt unerlaubte Inhaltsstoffe aufweisen kann. Die Werte sind mit jenen des EMEP/EEA Guidebook – 2019 vergleichbar bzw. liegen knapp über den minimalen Werten der Bandbreite, die im Guidebook angegebenen sind.

Für die Kategorien 18 und 19 sind aktuelle Messdaten (n = 10 bzw. n = 2) von Schweizer Anlagen verfügbar. Der für Kategorie 18 festgelegte PCDD/F EF-2020 entspricht dem maximalen Wert aller Messdaten. Da die Messwerte der Kategorie 19 sehr tief sind, wird für diese Kategorie wiederum derselbe Wert wie für die letzte Erhebung 2014 eingesetzt. Damals wurde für die Kategorie 19 vorausgesetzt, dass bei der Anlagenauslegung und im Betrieb die Einhaltung des für die Siedlungsabfallverbrennung gültigen LRV-Dioxingrenzwerts entweder ebenfalls verlangt oder durch entsprechende Massnahmen (Feinstaubabscheidung in der Regel mit Gewebefilter und Trockensorption, DeNOx, stationärer Betrieb) auch ohne expliziten Grenzwert eingehalten wird.

PCB und HCB

Zur Festlegung der EF-2020 für PCB sind nur zwei und für HCB keine Literaturangaben verfügbar. Aus diesem Grund wurden für 2020 dieselben Werte wie für die letzte Erhebung 2014 [1] gewählt.

Für PCB wurden wiederum die (teilweise gerundeten) EF des EMEP/EEA Guidebook – 2019 (PCB-EF des EMEP/EEA Guidebook – 2019 sind identisch mit EMEP/EEA Guidebook – 2013), verwendet, ausser für die Kategorien 8, 9 und 11a, für die geringfügig tiefere Werte gewählt wurden. Die PCB-EF-

2020 zeigen den erwarteten ähnlichen Trend wie die PAK und PCDD/F-EF, nämlich tiefere Werte mit zunehmender Anlagengrösse, da diese Anlagen eine deutlich höhere Verbrennungsqualität aufweisen.

Bereits für die HCB-EF-2014 waren praktisch keine Daten vorhanden und für die Kategorien 1 bis 15 wurden darum damals die HCB-EF des EMEP/EEA Guidebook – 2013, welche für alle Anlagentypen gleich sind, verwendet. Da die Anlagen >500 kW (Kategorien 16a-19) mittlerweile zu einem Grossteil mit Feinstaubabscheidern ausgerüstet sind und davon ausgegangen wird, dass ein Teil der HCB durch Adsorption an Feinstaub abgeschieden wird, wird für diese Kategorien ein um 80% tieferer HCB-EF angenommen.

4.2 EF-Zeitreihe – Prognose bis 2035 und Rückblick bis 1990

Die Prognose bis 2035 sowie der Rückblick bis 1990 wurden ausgehend von den EF-2020 berechnet. Dabei wurden zuerst die Werte für NO_x, CO und PM_{exh} für die verschiedenen Jahre bestimmt. Die Schadstoffe der Gruppe 2 wurden ausgehend von den EF-2020 und den relativen Änderungen von CO oder PM_{exh} bestimmt. Für Schadstoffe, die ausgehend von PM_{exh} oder CO mittels Faktoren berechnet werden, wurden diese Faktoren teilweise im Vergleich zu 2020 mittels Annahmen für die verschiedenen Zeitpunkte geändert. Die Details zur Berechnung der Prognose und des Rückblickes sind in den Kapiteln 3.8 und 3.9 zu finden. Die Zeitreihe für die Schadstoffe NO_x, CO und PM_{exh}, sowie jene Faktoren, die sich über die Zeit ändern, sind in Tabelle 12 bis Tabelle 15 zu finden. Eine detailliertere Beschreibung zur Festlegung der verschiedenen Schadstoffe für die Prognose und den Rückblick sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

Tabelle 12 NO_x-EF der Jahre 1990, 2008, 2014, 2020 und 2035 sowie relative Änderungen von 1990 und 2035 im Vergleich zu 2020.

HES-Kat.	Bezeichnung	NO _x						
		Δ 2020-1990 [%]	1990 [g/GJ]	2008 [g/GJ]	2014 [g/GJ]	2020 [g/GJ]	2035 [g/GJ]	Δ 2035-2020 [%]
1	Offene Cheminées			80		80	80	
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe			85		85	85	
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets			85		85	85	
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)			70		70	70	
8,9	Stückholzkessel			100		100	100	0%
10	Doppel-/Wechselbrandkessel			70		70	70	
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW			120		120	120	
11b	Pelletkessel <50 kW			70		70	70	
12a,14a	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW a. HVB	0%		130		130	120	-8%
12b,14b	Pelletkessel 50–500 kW			75		75	75	0%
13,15	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW i. HVB			140		140	130	-7%
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB			120		120	110	-8%
16b	Pelletkessel >500 kW			75		75	60	-20%
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB			120		120	110	-8%
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen			40		40	35	-13%
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)			130		130	120	-8%

Tabelle 13 CO-EF der Jahre 1990, 2008, 2014, 2020 und 2035 sowie relative Änderungen von 1990 und 2035 im Vergleich zu 2020.

HES-Kat.	Bezeichnung	CO						Δ 2035-2020 [%]
		Δ 2020-1990 [%]	1990 [g/GJ]	2008 [g/GJ]	2014 [g/GJ]	2020 [g/GJ]	2035 [g/GJ]	
1	Offene Cheminées	-25%	4000	3500	3000	3000	2500	-17%
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe	-30%	4000	3400	3000	2800	2200	-21%
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	-61%	1000	700	420	390	300	-23%
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	-33%	6000	5000	4000	4000	3200	-20%
8,9	Stückholzkessel	-58%	4000	2100	1800	1700	1100	-35%
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	-33%	6000	5000	4000	4000	4000	0%
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	-70%	3000	1600	1000	900	600	-33%
11b	Pelletkessel <50 kW	-67%	1000	600	360	330	210	-36%
12a,14a	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW a. HVB	-72%	1600	800	500	450	320	-29%
12b,14b	Pelletkessel 50–500 kW	-72%	600	300	200	170	110	-35%
13,15	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW i. HVB	-71%	1600	800	500	460	330	-28%
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB	-72%	500	300	150	140	100	-29%
16b	Pelletkessel >500 kW	-75%	200	100	50	50	40	-20%
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB	-75%	600	400	160	150	120	-20%
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	-80%	50	30	10	10	6	-40%
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	-70%	200	150	60	60	40	-33%

Tabelle 14 PM_{exh}-EF der Jahre 1990, 2008, 2014, 2020 und 2035 sowie relative Änderungen von 1990 und 2035 im Vergleich zu 2020.

HES Kat.	Bezeichnung	PM _{exh}						Δ 2035-2020 [%]
		Δ 2020-1990 [%]	1990 [g/GJ]	2008 [g/GJ]	2014 [g/GJ]	2020 [g/GJ]	2035 [g/GJ]	
1	Offene Cheminées	-50%	200	150	100	100	80	-20%
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe	-55%	200	130	100	90	60	-33%
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	-60%	100	80	50	40	30	-25%
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	-33%	300	200	200	200	150	-25%
8,9	Stückholzkessel	-70%	200	100	70	60	40	-33%
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	-33%	300	200	200	200	200	0%
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	-55%	200	150	100	90	80	-11%
11b	Pelletkessel <50 kW	-70%	100	60	40	30	25	-17%
12a,14a	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW a. HVB	-60%	150	100	70	60	20	-67%
12b,14b	Pelletkessel 50–500 kW	-70%	100	60	40	30	20	-33%
13,15	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW i. HVB	-60%	150	100	70	60	25	-58%
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB	-92%	125	70	15	10	5	-50%
16b	Pelletkessel >500 kW	-95%	100	60	6	5	3	-40%
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB	-84%	125	80	40	20	10	-50%
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	-99%	50	10	0.4	0.3	0.3	0%
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	-99%	100	60	2	1.4	1.4	0%

Tabelle 15 Faktoren zur Berechnung von BC aus PM_{2.5,exh} und TSP aus und PM_{exh} für die verschiedenen Jahre.

HES Kat.	Bezeichnung	BC/PM _{2.5}					TSP/PM _{exh}				
		1990 [%]	2008 [%]	2014 [%]	2020 [%]	2035 [%]	1990 [-]	2008 [-]	2014 [-]	2020 [-]	2035 [-]
1	Offene Cheminées					70%					2
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe	80%	75%	70%	70%	60%					1.5
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	50%	45%	40%	40%	30%					1.3
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	80%	75%	70%	70%	70%	3	2	2	2	2
8,9	Stückholzkessel	40%	35%	30%	30%	25%					1.5
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	80%	75%	70%	70%	70%					2
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	30%	25%	20%	20%	20%					1.5
11b	Pelletkessel <50 kW	35%	30%	25%	25%						
12a,14a	Automatische Holzfeuerungen 50-500 kW a.HvB										
12b,14b	Pelletkessel 50–500 kW		10%	5%	5%	5%					
13,15	Automatische Holzfeuerungen 50-500 kW i.HvB										
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a.HvB	15%					1.5	1.1	1.1	1.1	1.1
16b	Pelletkessel >500 kW		7.5%	2.5%	2.5%	2.5%					
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i.HvB										
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen		6%	1.0%	1.0%	1%					
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)		7.5%	2.5%	2.5%	2.5%					

4.2.1 Prognose bis 2035

4.2.1.1 NO_x

Für die Feuerungen <50 kW (Kategorien 1-11b) wurde für 2035 derselbe NO_x-EF wie für 2020 festgelegt. Dieses Vorgehen – ausser bei Kat. 2, 3, 4a und 5 – wurde bereits in der letzten Aktualisierung 2014 [1] gewählt und nachfolgend begründet.

- Für die Kategorien 1, 6, 7 und 10 wird von keiner technologischen Weiterentwicklung ausgegangen, die eine Änderung der NO_x-EF für 2035 notwendig machen würde.
- Der NO_x-EF-2035 für die Kategorien 2, 3, 4a und 5 wurde mit dem EF Modell dieser Kategorien berechnet (siehe Kapitel 3.8.1). Im Modell wurden höhere Anteile an modernen Feuerungen (75 %) und geringere Anteile an nicht-optimalen Betriebsphasen für 2035 im Vergleich zu 2020 angenommen (siehe Tabelle A. 7 im Anhang A.3). Der daraus resultierende NO_x-EF für 2035 (siehe Tabelle A. 4 im Anhang A.3) gibt gerundet denselben Wert wie für 2020.
- Die EF-2020 für Stückholzkessel (Kategorie 8, 9) sind jenen für «advanced/ecolabelled stoves and boilers» des EMEP/EEA Guidebook – 2019 sehr ähnlich, was den relativ modernen Anlagenbestand bzw. Kessel mit effizienter Verbrennung in der Schweiz zeigt. Es wird daher davon ausgegangen, dass der Anlagenbestand sich nicht mehr signifikant verbessern wird und deshalb wurden für die NO_x-EF-2020 der Kategorien 8 und 9 dieselben Werte wie für 2020 gewählt.
- Die unveränderten NO_x-EF für 2035 der Pelletfeuerungen <50 kW (Kategorien 4b und 11b) werden ebenfalls damit begründet, dass für das Festlegen der Werte für 2020 bereits grösstenteils Daten von neueren Feuerungen verwendet wurden und die NO_x-EF-2020 bereits höher sind als jene in der Erhebung 2014. Ausserdem ist für diese Feuerungskategorien nicht von weiteren grossen technologischen Neuerungen bis ins Jahr 2035 auszugehen, die eine signifikante Änderung der NO_x-EF in 2035 andeuten würde.
- Für den NO_x-EF der Kategorie 11a waren bereits für die Festlegung des Wertes für 2020 zu wenige Daten verfügbar. Daher wird auf weitere Annahmen bezüglich der EF-Entwicklung für 2035 verzichtet und derselbe Wert wie für 2020 verwendet.

Die NO_x-EF für 2035 der automatischen Holzfeuerungen >50 kW (HES. Kategorien 12-17 und 19) wurden mit dem EF-Modell dieser Kategorien berechnet. Die Annahmen dazu sind in Kapitel 3.8.1 beschrieben. Für den NO_x-EF der Kategorie 18 wurde das 25 %-Perzentil der vorhandenen Daten verwendet. Für die NO_x-EF der automatischen Holzfeuerungen >50 kW (HES-Kategorien 12-19) resultieren in 2035 somit, ausser für Pelletfeuerungen 50-500 kW, etwas tiefere Werte als für 2020 (-20 % bis -7 %). Dieser Trend ist zu erwarten, da immer mehr Feuerungen mit Low-NO_x-Technologien zum Einsatz kommen, vor allem auch deshalb, da immer mehr Feuerungen in lufthygienischen Massnahmegebieten erstellt werden, in denen strengere NO_x-Grenzwerte gelten.

4.2.1.2 CO und PM_{exh}

Da für die EF-2020 der Kategorie 1 bereits die Werte der letzten Aktualisierung 2014 [1] übernommen wurden, wurde auch für die EF-2035 die Werte aus [1] für 2035 angenommen. Für die Kategorien 4b, 11a und 11b wurden die EF-2035 als 25 %-Perzentil der verfügbaren Daten bestimmt. Für die CO- und PM_{exh}-EF-2035 der Kategorien 6 und 7 wurde eine Verbesserung im Vergleich zu 2020 angenommen, die dem Mittel der Verbesserung bei Kategorie 1 und Kategorien 2, 3, 4a, 5 entspricht. Dies wird damit

begründet, dass ein besseres Nutzerverhalten und der Wegfall von sehr alten Herden angenommen werden.

Die EF-2035 der Kategorien 8 und 9 wurden als Median über die EF von ausschliesslich modernen Stückholzkesseln festgelegt. Für die Kategorie 10 wurden keine Veränderungen der EF-2035 im Vergleich zu 2020 angenommen, da für diese Kategorie praktisch keine technologische Entwicklung stattfindet. Ausserdem wurde die Annahme getroffen, dass Anlagen in 2035 keine Neuanlagen sind, sondern sehr alte Bestandsanlagen mit demselben EF wie 2020.

Für Kategorie 18 wurde der CO-EF-2035 ebenfalls als 25 %-Perzentil der verfügbaren Daten festgelegt. Für den PM_{exh} -EF-2035 wurde hingegen keine Verbesserung im Vergleich zu 2020 angenommen, da der Wert 2020 bereits sehr tief und nahe an der Nachweisgrenze ist. Ausserdem ist der PM_{exh} -EF-2020 hauptsächlich von den grossen WKK Anlagen (>30 MW) dominiert, bei denen der Anlagenbetrieb und die Abgasreinigung bereits sehr optimiert sind.

Für die Kategorien 2, 3, 4a und 5 sowie 12a-17 und 19 wurden die EF-2035 für CO und PM_{exh} über die jeweiligen EF-Modelle berechnet mit verbesserten Annahmen zur Technologie der Anlagen und zur Betriebsweise im Vergleich zu 2020 (siehe Kapitel 3.8.1).

Die CO-EF-2035 zeigen somit, ausser für die Kategorie 10, um 17 % bis 40 % tiefere Werte als für 2020 (siehe Tabelle 13). Für die PM_{exh} -EF-2035 für Feuerungen <50 kW, ausser für Kategorie 10, ergeben sich mit -20 % bis -33 % ähnliche Reduktionen wie für CO (siehe Tabelle 14). Für die Kategorien 12a-17 ergeben sich mit dem gewählten Vorgehen und den getroffenen Annahmen deutlich grössere Reduktionen für die PM_{exh} -EF-2035 im Vergleich zu 2020 (-33 % bis -67 %). Diese Reduktionen spiegeln die Erwartung wider, dass bei Neuanlagen und Sanierungen von automatischen Feuerungen >50 kW zu einem sehr grossen Anteil Feinstaubabscheider installiert werden. Für die Kategorien 18 und 19 gibt es keine Reduktion des PM_{exh} EF-2035, da die Werte für 2020 bereits sehr tief und sehr deutlich unterhalb der geltenden LRV-Grenzwerte liegen.

4.2.1.3 VOC, CH₄ und NMVOC

Die Faktoren f zur Berechnung der VOC-EF-2035 aus CO sind für Einzelraumfeuerungen und Gebäudeheizungen (Kat. 1-11b) tiefer als jene für 2020 (siehe Tabelle A. 37 im Anhang A.16). Für die Kategorien 12a-18 wurden für 2035 dieselben Werte angenommen wie für 2020 und für Kategorie 19 wurde derselbe Faktor f wie für Kategorie 18 angenommen. Für die Kategorien 2, 3, 4a und 5 wurde der VOC-EF-2035 direkt über das EF-Modell für diese Kategorien bestimmt und der Faktor f direkt berechnet. Für die Kategorien 1, 6, 7 und 10 wurde der aufgerundete Faktor f der Kategorien 2, 3, 4a und 5 verwendet. Für die Kategorien 4b, 11a und 11b wurden die VOC-EF-2035 als 25 %-Perzentil der verfügbaren Daten bestimmt. Die VOC-EF-2035 der Kategorien 8 und 9 wurden als Median über die EF von ausschliesslich modernen Stückholzkessel festgelegt.

Der Faktor α zur Berechnung der CH₄- und NMVOC-EF-2035 aus VOC wurde im Vergleich zu 2020 ($\alpha = 0.3$) nicht verändert.

4.2.1.4 BC und PM-Fraktionen

Die Anteile von PM_{10} und $PM_{2.5}$ an PM_{exh} , PM_{cond} und TSP wurden gleich wie in 2020 mit Werten von 95 % und 90 % angenommen.

Für die BC/PM_{2,5}-Verhältnisse zur Berechnung von BC aus PM_{2,5,exh} wurde eine Verbesserung der Werte für 2035 im Vergleich zu 2020 für die Kategorien 2-5, 8-9 und 11b angenommen, aufgrund von zu erwartenden, technologischen Verbesserungen wie z.B. Verbesserungen nicht-optimaler Betriebsphasen (z.B. Anfahrphase bei Stückholzkesseln) und gesteigerter Sensibilisierung der Nutzer für einen optimalen Feuerungsbetrieb. Für alle anderen Kategorien werden für 2035 dieselben Verhältnisse wie für 2020 angenommen.

Für die TSP/PM_{exh}-Verhältnisse zur Berechnung der TSP-EF-2035 aus PM_{exh} wurden folgende Annahmen getroffen:

- Kat. 1, 6, 7 und 10: Gleiche Werte wie für 2020.
- Kat. 2, 3, 4a, 5, 8, 9 und 11a: Annahme einer 25 % Verbesserung für 2035 im Vergleich zu 2020.
- Kategorie 4b: Annahme einer 33 % Verbesserung für 2035 im Vergleich zu 2020.
- Kategorien 11b-19: Gleiche Werte wie für 2020, da die VOC-EF-2020 bereits tief sind und somit fast keine COC erwartet werden die zu PM_{cond} beitragen.

4.2.1.5 Pb und Zn

Als staubförmige Komponenten wurden die Pb- und Zn-EF-2035 über die proportionale Änderung von PM_{exh} zwischen 2020 auf 2035 für jede Kategorie individuell berechnet. Danach wurden dieselben Kategorien wie in 2020, mit Ausnahme von Kategorie 10, zusammengefasst, der Mittelwert über diese Werte gebildet, gerundet und als EF-2035 für Pb und Zn dieser Kategorien festgelegt. Die detaillierten Werte sind in Tabelle A. 41 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.1.6 Cd und Hg

Für die Cd- und Hg-EF-2035 werden dieselben Werte wie in 2020 angenommen. Cd und Hg im Abgas von Holzfeuerungen stammen praktisch ausschliesslich aus dem Brennstoff. Wenn also eine Reduktion der EF für 2035 angenommen werden würde, würde dies eine Reduktion dieser Elemente in der Umwelt und entsprechend reduzierte Gehalte im Brennstoff voraussetzen. Es gibt jedoch keine Anzeichen bzw. Gründe, dass diese Annahmen plausibel wären. Ein weiterer Grund für die Annahme einer möglichen Reduktion der Cd- und Hg-EF-2035 im Vergleich zu 2020 wäre die Verbesserung des feuerungstechnischen Wirkungsgrades. Da dieser jedoch bereits heute sehr hoch ist, ist von einer eher geringen Verbesserung bis 2035 von maximal 5 % auszugehen, wodurch sich ebenfalls keine Reduktion der EF in 2035 rechtfertigen lässt. Für Cd gäbe es zudem eventuell eine Gegenläufigkeit zwischen reduzierten Emissionen aufgrund des verbesserten Wirkungsgrades und einem grösseren Transfer von Cd aus der Asche ins Abgas, bedingt durch die höheren Temperaturen.

4.2.1.7 PAK

Die PAK-EF-2035 wurden über die relative Änderung von CO zwischen 2020 und 2035 berechnet. Die Werte wurden zuerst für jede Kategorie individuell berechnet und danach wurden gerundete Mittelwerte über jene Kategorien gebildet, die bereits für die EF-2020 identische Werte zugewiesen bekamen. Die detaillierten Werte sind in Tabelle A. 42 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.1.8 NH₃

Die NH₃-EF-2035 wurden über die relative Änderung von CO zwischen 2020 und 2035 berechnet. Die Werte wurden zuerst für jede Kategorie individuell berechnet und danach wurde der Mittelwert über folgende Kategorien gebildet und gerundet:

- 1, 2, 3, 4a, 5, 6, 7 und 10
- 4b, 8, 9, 11a-15

Die detaillierten Werte sind in Tabelle A. 43 im Anhang A.16 zu finden. NH₃ wird aus dem N im Brennstoff gebildet und je besser die Verbrennung ist, desto mehr wird in NO_x umgewandelt. Da für die EF-2035 für CO und PM_{exh} der meisten Kategorien von einer Verbesserung ausgegangen wurde, kann grundsätzlich auch von einer NH₃-Reduktion in der Zukunft ausgegangen werden. Für die NH₃-EF der Feuerungen zwischen 50 kW und 500 kW wurde der gleiche Wert wie für die automatischen Feuerungen <50 kW angenommen, da eine Entstickung erst ab 500 kW technisch sinnvoll ist und bei Anlagen <1 MW wohl die Ausnahme bleiben wird. Für grosse Anlagen (Kat. 16a-19) wird von keiner Verbesserung der EF-2035 im Vergleich zu 2020 ausgegangen, da vor allem bei Anlagen >1 MW in Zukunft vermehrt Abgasreinigung mit Entstickung aufgrund strengerer NO_x-Grenzwerte in lufthygienischen Massnahmegebieten erwartet wird.

4.2.1.9 SO_x

Für die SO_x-EF-2035 der Kategorien 1-18 wird keine Veränderung im Vergleich zu 2020 angenommen aus denselben Gründen wie für Cd (siehe Tabelle A. 43 im Anhang A.16). Für die Kategorie 19 wird eine Reduktion des SO_x-EF-2035 angenommen, wegen einer möglichen Zunahme von Anlagen mit Eindüsen von Kalkhydrat zur Abgasreinigung.

4.2.1.10 Benzol

Die Benzol-EF-2035 wurden für jede Kategorie individuell über die relative Änderung zwischen 2020 und 2035 von CO berechnet und gerundet. Dabei ergeben sich für die EF-2035 jeweils dieselben Werte für die gleichen Kategorien, die bereits 2020 dieselben Werte hatten. Zusätzlich bleiben die Abstufungen zwischen den verschiedenen Kategorien ungefähr gleich wie bereits 2020. Die detaillierten Werte sind in Tabelle A. 43 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.1.11 PCDD/F

Die PCDD/F-EF-2035 wurden über die relative Änderung zwischen 2020 und 2035 von CO berechnet. Die Werte der Kategorien 1-11b sowie 18 und 19 wurden individuell berechnet und gerundet.

Für die automatischen Feuerungen >50 kW a.HvB und Pelletfeuerungen >50 kW (Kategorien 12a, 12b, 14a, 14b, 16a und 16b) sowie die Kategorien i.HvB (Kategorien 13, 15 und 17) wurden die Mittelwerte gebildet und gerundet. Die Unterscheidung der Werte für Kategorien a.HvB und i.HvB ist analog zu den EF-2020 und soll die Annahme repräsentieren, dass in einigen wenigen Fällen missbräuchlich PVC-haltige Spanplatten innerhalb HvB-Anlagen verbrannt werden könnten. Die detaillierten Werte sind in Tabelle A. 44 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.1.12 PCB

Die PCB-EF-2035 wurden für jede Kategorie individuell über die relative Änderung zwischen 2020 und 2035 von CO berechnet und gerundet. Aufgrund der geringen Datenlage und damit grösseren Unsicherheiten wurde grosszügig auf die 2. Nachkommastellen gerundet. Dabei ergeben sich für die EF-2035 der Kategorien 4b, 10 und 11b-19 dieselben Werte wie für 2020 und für die restlichen Kategorien nur geringfügig tiefere EF (Tabelle A. 44 im Anhang A.16).

4.2.1.13 HCB

Die HCB-EF-2035 wurden über die relative Änderung zwischen 2020 und 2035 von CO berechnet. Die Werte wurden zuerst für jede Kategorie individuell berechnet und danach wurde der Mittelwert über folgende Kategorien gebildet und gerundet:

- 1-9, 11a-11b
- 10
- 12a-15
- 16a-19

Die detaillierten Werte sind in Tabelle A. 44 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2 Rückblick bis 1990

4.2.2.1 NO_x

Für die NO_x-EF aller HES Kategorien für alle Jahre des Rückblicks wurden keine Änderungen gegenüber den NO_x-EF-2020 angenommen. Es wurden somit dieselben Werte wie für 2020 eingesetzt.

4.2.2.2 CO und PM_{exh}

Kategorie 1:

- Für 2014 wurden dieselben Werte wie für 2020 angenommen.
- Für 2008 wurden die EF anhand der relativen Zunahme der Werte der Kategorien 2, 3, 4a und 5 desselben Zeitraums berechnet und dann nach oben korrigiert. Diese Korrektur wurde durchgeführt, damit sich ein leicht höherer Wert als für die Kategorien 2, 3, 4a und 5 ergibt und damit die zu erwartende Proportionalität zw. den Kategorien stimmt und die zeitliche Entwicklung dem erwarteten Trend folgt.
- Für 1990 wurde für CO derselbe Wert wie bereits im Rückblick der letzten Aktualisierung angenommen. Dieser Wert entspricht auch dem Wert für 1990 der Kategorien 2, 3, 4a und 5. Der CO-EF für 1990 ist somit um 25% höher als für 2020 (siehe Tabelle 13). Für PM_{exh} wurde ein Wert von 200 g/GJ angenommen, damit die zu erwartende Proportionalität zwischen den Kategorien stimmt und die zeitliche Entwicklung dem erwarteten Trend folgt. Dieser Wert ist um 50% höher als jener für 2020.

Für die HES-Kategorien 2, 3, 4a und 5 wurden die Werte des Rückblicks mit dem EF-Modell dieser Kategorien berechnet (siehe Kapitel 3.9.1). Dazu wurden jeweils höhere Anteile von konventionellen Feuerungen (100 % für 1990, 90 % für 2008 und 75 % für 2014) und höhere Anteile an nicht-optimalen Betriebsphasen im Vergleich zum vorherigen Zeitpunkt angenommen (siehe Tabelle A. 4 und Tabelle A. 7 im Anhang Kapitel A.3). Die EF des gesamten Abbrandes ohne Gewichtung des Betriebseinflusses

für CO und PM_{exh} für konventionelle und moderne Feuerungen wurden im Vergleich zum EF-Modell 2020 nicht verändert. Für das Jahr 1990 ergeben sich somit für CO 30 % und für PM_{exh} 55 % höhere EF als 2020.

Für die Kategorien 4b und 11b wurden die Werte anhand der relativen Zunahme der Werte der Kategorie 12b derselben Zeiträume abgeschätzt. Für CO und PM_{exh} sind die Werte 1990 rund 60 % (Kat. 4b) und rund 70% (Kat. 11b) höher als für 2020 (siehe Tabelle 13).

Für die Kategorien 6, 7 und 10 wurden dieselben Werte, wie für den Rückblick in der letzten Aktualisierung [1] angenommen. Die EF für CO und PM_{exh} sind für 1990 somit 33% höher als für 2020.

Kategorien 8 und 9:

- Für 2014 und 2008 wurden die EF mit der relativen Änderung von Kategorien 2, 3, 4a und 5 derselben Zeiträume berechnet.
- Für 1990 wurden dieselben Werte für die Kategorien 2, 3, 4a und 5 angenommen. Die CO-EF sind damit um 58 % und die PM_{exh}-EF um 70 % höher als die EF-2020.

Für die Kategorie 11a wurden die Werte anhand der relativen Zunahme der Werte der Kategorie 12a derselben Zeiträume abgeschätzt. Die EF-1990 sind somit um 70 % (für CO) und 55 % (für PM_{exh}) höher als die EF-2020.

Kategorien 12a-19:

- Die EF für CO und PM_{exh} der verschiedenen Jahre des Rückblickes wurden anhand der relativen Änderungen der LRV-Messdaten zwischen den Jahren berechnet (siehe Formeln (20)-(22) im Kapitel 3.9.1). Für die EF sowie Betriebsdauern der An- und Abfahrphasen sowie Standby wurden die gleichen Werte wie für 2020 angenommen.
- Für 2014 wurden die gleichen Betriebsbedingungen wie 2020 angenommen.
- Für 2008 wurde ein weiterer An- und Abfahrvorgang im Vergleich zu 2014 angenommen.
- Für 1990 wurde ein weiterer An- und Abfahrvorgang im Vergleich zu 2008 angenommen.
- Für die relativen Änderungen der LRV-Messdaten (ohne Unterscheidung zw. Voll- und Teilleistung) wurden folgende Werte bestimmt:
 - EF_{2020/2014}
 - Kat. 12a, 14a, 13, 15: 9% für CO und 20% für PM_{exh}
 - Kat. 16a, 17, 19: 5% für CO und 24% für PM_{exh}
 - EF_{2014/2008}
 - Kat. 12a, 14a, 13, 15: 40% für CO und 42% für PM_{exh}
 - Kat. 16a, 17, 19: 90% für CO und 50 g/GJ für PM_{exh}
(Aufgrund sehr hoher prozentualer Änderungen für PM_{exh} wurden die absoluten Zahlen verwendet (siehe Kapitel 3.9.1).)
 - EF_{2008/1990}
 - Kat. 12a, 14a, 13, 15: 60% für CO und 10% für PM_{exh}
 - Kat. 16a, 17, 19: 29% für CO und 26 g/GJ für PM_{exh}
(Aufgrund sehr hoher prozentualer Änderungen für PM_{exh} wurden die absoluten Zahlen verwendet (siehe Kapitel 3.9.1).)

- Für Pelletfeuerungen (Kategorie 12b, 14b und 16b) waren generell zu wenig Messdaten verfügbar, um diese in der Auswertung separat zu berücksichtigen.
- Die Erhöhung der EF, bedingt durch zusätzliche An- und Abfahrvorgänge, wurde ebenfalls anhand der relativen Änderung der Gesamtemissionen aufgrund eines zusätzlichen An- und Abfahrvorgangs berücksichtigt. Diese relative Änderung wurde mit der Sensitivitätsanalyse (siehe Kapitel 4.3.4) bestimmt. Dabei wurden die relativen Änderungen über alle Kategorien, für die Daten aus den LZM zu An- und Abfahren verfügbar sind (Kat. 12a-16a und 17), gemittelt. Somit ergibt sich eine relative Änderung aufgrund eines zusätzlichen An- und Abfahrvorgangs (gerundet auf ganze 10er Stellen) von +20% für CO und von +10% für PM_{exh}.
- Die PM_{exh}-EF für 2008 und 1990 der Kat. 18 wurden nicht mit dem Modell berechnet, sondern angenommen. Für 2008 wurde ein Wert abgeschätzt und für 1990 derselbe Wert wie für den Rückblick der letzten Aktualisierung [1] angenommen. Diese Annahmen für 2008 und 1990 wurden getätigt, damit die Proportionalität zw. den Kategorien stimmt und die zeitliche Entwicklung einem Trend folgt.
- Die CO-EF 1990 der Kategorien 12-19 sind zwischen 70 % und 80% höher als die EF-2020.
- Die PM_{exh}-EF 1990 der Kategorien 12a-15 sind um 60-70 %, jene der Kategorien 16a-17 um 84-95% und jene der Kategorien 18-19 um 99% höher als die PM_{exh}-EF-2020.

4.2.2.3 VOC, CH₄ und NMVOC

Die EF von VOC bzw. CH₄ und NMVOC des Rückblicks wurden ebenfalls über die Faktoren f aus CO bzw. α aus VOC berechnet (siehe Formeln (5) bis (7) in Kapitel 3.5). Für den Faktor f der Kategorien 1-17 wurden dabei für alle Jahre des Rückblicks dieselben Faktoren wie für 2020 angenommen. Für die Kategorien 18 und 19 wurde derselbe Wert (f = 7 %) wie für die Kategorien 12-17 angenommen, der im Vergleich zu 2020 geringfügig höher sind. Der Faktor α wurde ebenfalls für alle Jahre als konstant angenommen (α = 0.3). Die detaillierten Werte für die Faktoren und EF sind in Tabelle A. 37 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2.4 BC

Für die Faktoren BC/PM_{2.5} zur Berechnung von BC (Formel (10)) wurden für 2014 dieselben Faktoren verwendet, wie für 2020. Für die anderen Jahre wurde der Faktor BC/PM_{2.5} für jeden Zeitpunkt weiter in der Vergangenheit zurückliegend um je 5 % erhöht (ausser für Kat. 16a-19 in 1990). Diese Erhöhung wird aufgrund einer zu erwartenden höheren Anzahl an Anfahrvorgängen in der Vergangenheit vorgenommen, da vor allem die Anfahrvorgänge für BC-Emissionen verantwortlich sind. Für Kategorien 16a bis 19 wurden in 1990 derselbe Wert wie für Kategorien 12a bis 15 eingesetzt. Die Verhältnisswerte der Kategorien 1-15 entsprechen denselben Werten wie sie bereits im Rückblick der letzten Aktualisierung [1] verwendet wurden.

4.2.2.5 PM-Fraktionen

Zur Berechnung der EF der PM-Fraktionen PM₁₀ und PM_{2.5} von PM_{exh} (Formel (8) und (9)), TSP und PM_{cond} (Formel (13) bis (16)) wurden für alle Jahre des Rückblicks dieselben Faktoren verwendet wie für die EF-2020 (PM_{2.5,xx} = PM_{xx} * 0.9 und PM_{10,xx} = PM_{xx} * 0.95).

Für die Faktoren TSP/PM_{exh} zur Berechnung von TSP (Formel (11)) wurden für 2008 und 2014 dieselben Werte angenommen, wie für 2020. Für 1990 wurden 40 % bis 50 % höhere Werte für TSP/PM_{exh}

angenommen, um die zu erwartenden schlechteren Betriebsbedingungen, die sich auch in den höheren CO- und VOC-EF-1990 widerspiegeln, zu berücksichtigen. Die detaillierten Werte für die Faktoren und EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 38 und Tabelle A. 39 im Anhang A.16 zu finden.

Pb und Zn

Die EF für den Rückblick für Pb und Zn wurden, analog zur EF-Prognose, über die relativen Änderungen zwischen den PM_{exh} -EF derselben Jahre berechnet. Für 2014 wurden die individuellen Werte der Kategorien 1-11, 12-13 und 14-18 zusammengefasst, der Median gebildet und für diese Kategorien als EF für Pb und Zn festgelegt. Für 2008 und 1990 wurde nur eine Unterscheidung zwischen den Kategorien 1-13 und 14a-18 vorgenommen. Die Differenzierung der Kategorien wurde reduziert, da davon auszugehen ist, dass 1990 und 2008 keine bzw. nur wenige Feinstaubfilter installiert waren, vor allem bei automatischen Feuerungen zwischen 50-300 kW (Kat. 12a-13). Der geringe Unterschied der EF für Feuerungen <300 kW und >300 kW ist zu erwarten, da für automatische Feuerungen >300 kW und fehlendem Elektroabscheider von mindestens ähnlichen bis höheren Schwermetallgehalten auszugehen ist wie für die Kat. 1-13. Die Pb- und Zn-EF-2014 der Kategorie 19 wurden über die individuelle relative Änderung von PM_{exh} berechnet. Für 2008 und 1990 wurden die Werte über die relativen Änderungen der EF der Vorperioden berechnet, da die relativen PM_{exh} -Zunahmen dieser Jahre zu hoch erschienen. Die detaillierten Werte der Pb- und Zn-EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 41 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2.6 Cd und Hg

Die Cd-EF der verschiedenen Jahre des Rückblicks wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet. Für Die Cd-EF-2014 wurde dann der Median über die Kategorien 1-18 gebildet und dieser als EF für alle diese Kategorien festgelegt. Für 2008 und 1990 wurde der Median für die Kategorien 1-13 und 14a-17 gebildet. Diese Unterscheidung wurde eingeführt, da davon auszugehen ist, dass 1990 und 2008 keine bzw. nur wenige Feinstaubfilter installiert waren, die zu tieferen Cd-EF führen würden. Der kleinere Unterschied der EF für Feuerungen <300 kW und >300 kW ist zu erwarten, da für automatische Feuerungen >300 kW und fehlendem Elektroabscheider von mindestens ähnlichen bis höheren Schwermetallgehalten auszugehen ist wie für die Kat. 1-13. Für die Kategorie 18 wurde derselbe Wert wie für die Kat. 14a-17 gewählt, da die Berechnung über die relativen Änderungen von PM_{exh} für Kat. 18 aufgrund der sehr tiefen PM_{exh} -EF-2014 und 2020 zu unplausiblen Werten geführt hätte. Die Werte für Kategorie 19 wurden über die relativen Änderungen von Cd der Vorperioden berechnet, da Werte über die relativen PM_{exh} -Zunahmen dieser Jahre zu hoch erschienen.

Für Hg wird wie für 2020 der gleiche Wert für alle Kategorien angenommen, da Hg leichtflüchtig ist und in Elektroabscheidern oder Gewebefiltern praktisch nicht abgeschieden wird, weshalb der Hg-EF hauptsächlich vom Hg-Gehalt des Brennstoffs abhängig ist. Da es in der Schweiz nie relevante grosse Emittenten von Quecksilber gab, wird nicht davon ausgegangen, dass sich die Hg-Gehalte im Brennstoff über die Jahre in relevantem Ausmass verändert hat. Ausserdem weisen die Hg-EF aufgrund der geringen Datenlage generell eine sehr hohe Unsicherheit auf. Die detaillierten Werte der Cd- und Hg-EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 41 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2.7 PAK

Die EF der verschiedenen Jahre des Rückblicks wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet. Teilweise wurden dann mehrere Kategorien zusammengefasst und der Median gebildet. Folgende Kategorien wurden zusammengefasst bzw. ein Wert ähnlicher Kategorien festgelegt:

- 1 sowie 2,3,4a,5 und 6,7
- 4b sowie 11a und 11b
- 12a-13
- 14a-17
- 19: Annahme des gleichen Werts, wie für die Kategorien 14a-17

Wie für die EF-2020 wurden dieselben Werte für B(a)P und B(b)F sowie B(k)F und I(cd)P eingesetzt. Die detaillierten PAK-EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 42 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2.8 NH₃

Die EF der verschiedenen Jahre des Rückblicks wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet.

Für 2014 wurden ausschliesslich die individuellen Werte der Kategorien 1-18 herangezogen und gerundet. Dabei ergaben sich dieselben Werte wie für 2020. Für die NH₃-EF-2014 der Kategorie 19 wurde der Mittelwert zw. 2008 und 2020 gebildet, da eine gewisse Zunahme an SNCR-Anlagen und damit geringfügig höhere NH₃-EF im Vergleich zu 2008 angenommen wurden.

Für 2008 wurden alle handbeschickten Feuerungen (Kat. 1-4a, 5-7 und 10) ausser Kat. 8, 9 und alle automatischen Feuerungen (Kat. 4b, 11a-18) inkl. Kat. 8, 9 zusammengefasst und der Median gebildet. Für die Kat. 19 wurde derselbe EF angenommen wie für die anderen automatischen Feuerungen.

Für 1990 wurden alle handbeschickten Feuerungen inkl. Kat. 8, 9 zusammengefasst. Stückholzkessel waren 1990 oft noch ohne Pufferspeicher ausgerüstet, was zu einem erheblich schlechteren Betrieb führte. Da der Median über alle Werte der automatischen Feuerungen (Kat. 4b, 11a-18) denselben Wert ergab wie für die handbeschickten Feuerungen, aber für automatische Feuerungen aufgrund der tieferen CO-EF auch tiefere NH₃-EF zu erwarten sind, wurde der NH₃-EF-1990 für die Kat. 4b, 11a-18 über das Verhältnis zwischen automatischen und handbeschickten Feuerungen von 2008 berechnet.

Ammoniak entsteht als Vergasungsprodukt aus Brennstoffstickstoff. Erhöhte Emissionen im Abgas sind allenfalls infolge von Gasstrahlen denkbar, die unvermischt den Feuerraum passieren, was gleichzeitig mit hohen CO-Emissionen verbunden ist. Die höheren NH₃-EF in der Vergangenheit, vor allem 1990 und 2008, sind somit auf die schlechtere Verbrennungsqualität und den erhöhten CO-EF im Vergleich zu 2014 und 2020 zu erklären. Die detaillierten Werte der NH₃-EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 43 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2.9 SO_x

Für die SO_x-EF von 1990-2014 der Kategorien 1-17 wurden keine Änderungen im Vergleich zu 2020 angenommen. SO_x im Abgas von Holzfeuerungen stammt praktisch ausschliesslich aus Schwefel im Brennstoff. Es werden jedoch keine Änderungen diesbezüglich berücksichtigt aufgrund der geringen Datenlage dazu und den damit einhergehenden grossen Unsicherheiten.

Für die SO_x-EF der Kategorie 18 wurden für 2014 und 2008 ebenfalls derselbe Werte wie für 2020 angenommen. Für 1990 wird derselbe Wert wie für die Kategorien 12a-17 eingesetzt. Der tiefere Wert von 1 g/GJ für 2008-2020 ist dadurch bedingt, dass das Eindüsen von Kalk bzw. Kalkhydrat als Additiv angenommen wird, was in 1990 wohl noch nicht gemacht wurde.

Die Werte von Kat. 19 wurden über die relative Änderung der CO-EF derselben Jahre berechnet und gerundet. Die detaillierten Werte der SO_x-EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 43 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2.10 Benzol

Die EF der verschiedenen Jahre des Rückblicks wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet.

Für 2014 wurden ausschliesslich die individuellen Werte herangezogen und gerundet. Dabei ergaben sich mit 3 Ausnahmen (Kat. 2-4a,5 sowie 12b und 14b) dieselben Werte wie für 2020.

Für 1990 und 2008 wurden folgende Kategorien zusammengefasst und der Median gebildet:

- 1 und 2, 3, 4a, 5
- 6, 7 und 10
- 8,9 und 11a
- Pelletfeuerungen <50 kW und automatische Feuerungen bis 500 kW (Kat. 4b und 11b, sowie Kat. 12a-15)
- Automatische Feuerungen >500 kW (Kategorien 16a-19)

Die detaillierten Werte der Benzol-EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 43 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2.11 PDDD/F

Die EF der verschiedenen Jahre des Rückblicks wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet.

Für 2014 wurden ausschliesslich die individuellen Werte herangezogen und gerundet. Dabei ergaben sich, bis auf die Kat. 8, 9 sowie 12a, 14a und 12b, 14b, wo die Werte geringfügig höher sind, dieselben Werte wie für 2020.

Für 2008 und 1990 wurden die handbeschickten Feuerungen (Kat. 1-4a, 5-10), automatischen Feuerungen (Kat. 4b, 11a-12b, 14a, 16a, 16b) und automatische Feuerungen i. HvB (um teilweise belastetes Holz zu berücksichtigen) zusammengefasst. Um einen Trend hin zu höheren Werten in der Vergangenheit zu erreichen, wurden die Maximal-Werte der gruppierten Kategorien als EF für 2008 und 1990 als EF festgelegt. Die detaillierten Werte der PDDD/F-EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 44 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2.12 PCB

Die EF der verschiedenen Jahre des Rückblicks wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet.

Für 2014 wurden ausschliesslich die individuellen Werte herangezogen und gerundet. Dabei ergaben sich für alle Kategorien durch die Rundung auf 2 Kommastellen dieselben Werte wie für 2020.

Für die PCB-EF 2008 und 1990 wurden jeweils alle handbeschickten Feuerungen (Kat. 1-4a und 5-10) und die automatischen Feuerungen (Kat. 4b und 11a-19) gruppiert und der Median der individuellen Werte gebildet. Für den EF-1990 der Kat. 19 wurde der aufgerundete EF für die handbeschickten Feuerungen festgelegt, um für "belasteten" Brennstoff zu gewichten. Die detaillierten Werte der PCB-EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 44 im Anhang A.16 zu finden.

4.2.2.13 HCB

Die EF der verschiedenen Jahre des Rückblicks wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet. Für die verschiedenen Jahre des Rückblicks wurden dann dieselben Kategorien zusammengefasst (Kat. 1-15 und 16-19) und der Median gebildet, wie bereits für die EF-2020. Die detaillierten Werte der HCB-EF des Rückblicks sind in Tabelle A. 44 im Anhang A.16 zu finden.

4.3 Unsicherheiten und Bandbreiten

4.3.1 Unsicherheiten EF-2020

Die Unsicherheiten der Schadstoffe NO_x, CO und PM_{exh} wurden anhand der vorhandenen Daten (Literatur und Messungen) ermittelt. Für die Kategorien 1-11 entsprechen die festgelegten prozentualen Unsicherheiten (siehe Tabelle 16) grob der mittleren Standardabweichungen aus den Literaturwerten der jeweiligen Kategorien. Die NO_x Unsicherheiten der Kategorien 12-19 entsprechen grosszügig gerundet den Standardabweichungen der EF für Voll- und Teillast aus der Auswertung der LRV-Messberichte. Für die NO_x Unsicherheiten der Kategorien i.HvB und jene der Kategorien 18-19 wurden höhere Werte als für die anderen Kategorien der automatischen Feuerungen >50 kW festgelegt. Für CO und PM_{exh} der Kategorien 12-19 ergab die Auswertung der EF für Voll- und Teilleistung der LRV-Messungen Standardabweichungen von >80 % und teilweise >100 %. Da jedoch etablierte Standardmessverfahren mit geringen Unsicherheiten eingesetzt wurden und zudem sehr viele Daten zur Verfügung stehen, wird für die CO und PM_{exh} Unsicherheiten 2020 ein Wert von 80 % angenommen.

Tabelle 16 Unsicherheiten für die EF-2020 in % für die Schadstoffe NO_x, CO, VOC, CH₄ und NMVOC.

HES-Kat.	Bezeichnung	NO _x	CO	VOC*	CH ₄ , NMVOC [#]	
					low	high
1 2,3,4a,5 4b 6, 7 8,9 10 11a 11b	Offene Cheminées Raumheizer für feste Brennstoffe Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde) Stückholzkessel Doppel-/Wechselbrandkessel Automatische Holzfeuerungen <50 kW Pelletkessel <50 kW	25%	50%	70%	80%	90%
12a 12b	Automatische Holzfeuerungen 50–300 kW a. HVB Pelletkessel 50–300 kW	35%	80%	90%		110%
13	Automatische Holzfeuerungen 50–300 kW i. HVB	50%				
14a 14b	Automatische Holzfeuerungen 300–500 kW a. HVB Pelletkessel 300–500 kW	35%				
15	Automatische Holzfeuerungen 300–500 kW i. HVB	50%				
16a 16b	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB Pelletkessel >500 kW	35%				
17 18 19	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	50%				

*VOC = f * CO mit σ_f = 50%,

[#]CH₄ = α * VOC und NMVOC = (1-α) * VOC, mit σ_α = 50%

Für die Schadstoffe, die mittels Faktoren aus CO und PM_{exh} abgeleitet wurden, wurde eine Fehlerfortpflanzung angewendet. Die Annahmen der Unsicherheiten der verschiedenen Faktoren sind in Kapitel 3.10.1 und Fussnoten der jeweiligen Tabellen (Tabelle 16 bis Tabelle 20) angeführt. Für die meisten Faktoren wurde eine Unsicherheit von 50 % angenommen. Die Unsicherheit für das BC/ $PM_{2.5}$ Verhältnis wurde mit 100 % angenommen, da die Unsicherheiten für die BC-EF grösser sind als jene für die CH_4 - und NMVOC-EF. Für PM_{cond} werden dieselben Unsicherheiten wie für TSP angenommen, da beide aus PM_{exh} berechnet werden und nicht unabhängig sind. Für Unsicherheiten $\geq 100\%$ wurde ein Wert von 80 % für die Unsicherheit des unteren Bereichs angegeben (siehe Kapitel 3.10.1).

Tabelle 17 Unsicherheiten für die EF-2020 in % für die Schadstoffe PM_{exh} , $PM_{10,exh}$, $PM_{2.5,exh}$ und BC.

HES-Kat.	Bezeichnung	PM_{exh}	$PM_{2.5,exh}$, $PM_{10,exh}$ *	BC#	
				low	high
1 2, 3, 4a, 5 4b 6, 7 8, 9 10 11a 11b	Offene Cheminées Raumheizer für feste Brennstoffe Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde) Stückholzkessel Doppel-/Wechselbrandkessel Automatische Holzfeuerungen <50 kW Pelletkessel <50 kW	50%	70%	80%	120%
12a, 14a 12b, 14b 13, 15 16a 16b 17 18 19	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW a. HVB Pelletkessel 50–500 kW Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW i. HVB Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB Pelletkessel >500 kW Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	80%	90%	80%	140%

* $PM_{10,exh} = f * PM_{exh}$ und $PM_{2.5,exh} = f * PM_{exh}$ mit $f = PM_{10}/PM_{exh}$ u. $PM_{2.5}/PM_{exh}$ sowie $\sigma_f = 50\%$ und

#BC = $PM_{2.5} * BC/PM_{2.5}$ mit $\sigma_{BC/PM_{2.5}} = 100\%$

Tabelle 18 Unsicherheiten für die EF-2020 in % für die Schadstoffe TSP und PM_{cond} und deren Fraktionen.

HES-Kat.	Bezeichnung	TSP#		$PM_{2.5,TSP}$, $PM_{10,TSP}$ *		PM_{cond} +		$PM_{2.5,cond}$, $PM_{10,cond}$ +	
		low	high	low	high	low	high	low	high
1 2,3,4a,5 4b 6, 7 8, 9 10 11a 11b	Offene Cheminées Raumheizer für feste Brennstoffe Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde) Stückholzkessel Doppel-/Wechselbrandkessel Automatische Holzfeuerungen <50 kW Pelletkessel <50 kW	80%	110%	80%	120%	80%	110%	80%	120%
12a,14a 12b,14b 13, 15 16a 16b 17 18 19	Automatische Holzfeuerungen 50-500 kW a. HVB Pelletkessel 50–500 kW Automatische Holzfeuerungen 50-500 kW i. HVB Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB Pelletkessel >500 kW Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	80%	90%	80%	110%	80%	90%	80%	110%

#TSP = $PM_{exh} * TSP/PM_{exh}$ mit $\sigma_{TSP/PM_{exh}} = 100\%$ für Kat. 1-11 und $\sigma_{TSP/PM_{exh}} = 50\%$ für Kat. 12-19

* $PM_{10,TSP} = f * TSP$ und $PM_{2.5,TSP} = f * TSP$ mit $f = PM_{10}/TSP$ u. $PM_{2.5}/TSP$ und $\sigma_f = 50\%$

+ $PM_{cond} = TSP - PM_{exh}$

Für die Schadstoffe der Gruppe 2 (Schwermetalle, PAK, NH₃, SO_x, Benzol, PCDD/F, PCB und HCB) sind zu wenige Datensätze vorhanden, um die Unsicherheit aus den vorhandenen Daten abzuleiten. Daher wurden die Unsicherheiten anhand der Unsicherheitsklassen des EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] abgeschätzt (siehe Tabelle 6). Die Festlegung der Werte für die verschiedenen Schadstoffe ist nachfolgend beschrieben. Nachdem für alle Schadstoffe der Gruppe 2 Unsicherheiten von ≥100 % resultierten, wurde, analog zu den Unsicherheiten der Schadstoffe der Gruppe 1, ein Wert von 80 % für die Unsicherheit im unteren Bereich angeben.

Tabelle 19 Unsicherheiten für die EF-2020 in % für PAK und Schwermetalle

HES-Kat.	Bezeichnung	Pb, Zn		Cd		Hg		PAK	
		low	low	low	high	low	high	low	high
1	Offene Cheminées								300%
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe								200%
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets								
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)						300%		300%
8,9	Stückholzkessel								
10	Doppel-/Wechselbrandkessel								
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW		80%		200%			80%	
11b	Pelletkessel <50 kW	80%		80%		80%			
12a, 14a	Automatische Holzfeuerungen 50-500 kW a.HVB								
12b, 14b	Pelletkessel 50–500 kW								
13, 15	Automatische Holzfeuerungen 50-500 kW i.HVB								
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB						200%		
16b	Pelletkessel >500 kW								
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB								
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen		200%						
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)				300%				

Pb und Zn

Für die Unsicherheiten der Kategorien 1-17 wurde ein Wert von 300 % festgelegt, da einige Kategorien für die Ermittlung der EF zusammengefasst wurden und nur wenig Daten verfügbar sind. Der Wert entspricht dem Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse D. Für die Kategorien 18 und 19 wird ein Wert von 200 % angenommen, da eine grössere Anzahl an Daten vorliegt.

Cd

Für die Unsicherheiten der Kategorien 1-17 wurde ein Wert von 200 % festgelegt, welcher dem Mittelwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse D entspricht. Es wurden zur Ermittlung der EF-2020 zwar viele Kategorien zusammengefasst und es sind nur wenig Daten (Literatur und Messungen im Auftrag des BAFU) verfügbar, die Bandbreite der Daten ist jedoch gering. Für die Kategorie 18 wurde ebenfalls eine Unsicherheit von 200 % gewählt, die im Unterschied zu Pb und Zn nicht tiefer ist als jene der anderen Kategorien für Feuerungen >50 kW. Der Grund dafür ist, dass zwar Daten von einer überwiegenden Anzahl an existierenden Anlagen vorliegt, deren Bandbreite jedoch relativ gross ist. Für Kategorie 19 wird der Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse D (300 %) gewählt, da nur wenige Daten vorliegen und der Wert abgeschätzt wurde.

Hg

Für die Unsicherheiten der Kategorien 1-11 wird der Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse D (300 %) eingesetzt, da viele Kategorien zur Ermittlung der EF-2020 zusammengefasst wurden und

nur wenig Daten verfügbar sind und deren Bandbreite gross ist. Für die Kategorien 12-17 & 19 wird ein tieferer Wert von 200 % (Mittelwert EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse D). Es wurden zwar einige Kategorien für die Festlegung der EF-2020 zusammengefasst und es gibt nur eine beschränkte Anzahl an Daten, die Bandbreite dieser Daten ist jedoch gering. Für Kategorie 18 wird ebenfalls eine Unsicherheit von 200 % gewählt, die dem Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse C entspricht. Es liegen zwar Daten von einer überwiegenden Anzahl an existierenden Anlagen vor, deren Bandbreite ist jedoch gross.

PAK

Die Unsicherheit der Kategorie 2, 3, 4a, 5 entspricht dem Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse C und ist tiefer als für die anderen Kategorien, da für diese Kategorie zumindest eine gewisse Anzahl an Daten aus der Literatur berücksichtigt werden konnte. Für alle anderen Kategorien wird der Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse D festgelegt, da die PAK-EF grösstenteils abgeschätzt werden mussten.

Tabelle 20 Unsicherheiten für die EF-2020 in % für die Schadstoffe Benzol, SO_x,NH₃, PCDD/F, PCB und HCB

HES-Kat.	SO _x		NH ₃		Benzol		PCDD/F		PCB, HCB		
	low	high	low	high	low	high	low	high	low	high	
1	80%	100%	80%	200%	80%	300%	80%	300%	80%	500%	
2,3,4a,5											
4b											
6, 7											
8,9											
10											
11a											
11b											
12a,14a		200%									
12b,14b											
13, 15											
16a											
16b											
17											
18	100%				200%						
19			100%		300%						

NH₃

Für die Kategorien 1-17 und 19 wird als Unsicherheit der Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse C (200 %) festgelegt. Es wurden zur Ermittlung der EF-2020 einige Kategorien zusammengefasst und es sind nur wenige Daten (Literatur und Messungen im Auftrag des BAFU) verfügbar, jedoch ist die Bandbreite der Daten gering. Für die Kategorien 18 und 19 werden tiefere Unsicherheiten von 100 % (Mittelwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse C) angenommen, da entweder Daten von einer überwiegenden Anzahl an existierenden Anlagen (Kat. 18) oder Messungen mit geringer Bandbreite (Kat. 19) vorliegen.

SO_x

Für alle Kategorien 1-11 wird die gleiche Unsicherheit verwendet, da zur Festlegung der EF-2020 diese Kategorien zusammengefasst wurden. Der Wert entspricht dem Mittelwert der EMEP/EEA-Unsicher-

heitsklasse C. Es gibt nur wenige Daten (Literatur), jedoch ist deren Bandbreite gering. Der Unsicherheitswert für die Kategorien 1-11 ist tiefer als für PAK und Schwermetalle, da SO_x relativ einfach und präzise messbar ist. Für die Kategorien 12-17 wird eine Unsicherheit von 200 % angenommen (Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse C), da nur sehr wenige Daten verfügbar waren (Literatur und Messungen BAFU) und zur Festlegung der EF-2020 einige Kategorien zusammengefasst wurden. Für die Kategorien 18 und 19 wird wieder der tiefere Wert von 100 % angenommen (Mittelwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse C), da einige Daten vorliegen, deren Bandbreite nicht allzu gross ist.

Benzol

Da Benzol über die Verhältnisse Benzol/VOC bzw. Benzol/CH₄ berechnet wurde, welche anhand von Literaturdaten bestimmt wurden, wird für Benzol eine Unsicherheit angenommen, die höher ist als jene für VOC und CH₄. Der festgelegte Wert ist für alle Kategorien gleich und entspricht dem Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse D.

PCDD/F

Für die Unsicherheiten von PCDD/F wurden zwei verschiedene Werte festgelegt, ein Wert von 300 % (Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse D) für die Kategorien 1-17 und 19 sowie 200 % (Maximalwert der EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse C) für die Kategorie 18. Zur Festlegung der EF-2020 der Kategorien 1-17 und 19 wurden zwar einige Kategorien zusammengefasst und mit anderen gleichgesetzt, aber es waren einige wenige Daten (Literatur und drei Messungen im Auftrag des BAFU) verfügbar. Der tiefere Wert für Kategorie 18 wird damit begründet, dass einige Daten von existierenden Anlagen in der Schweiz vorliegen.

PCB und HCB

Für die Unsicherheiten von PCB und HCB wird für alle Kategorien derselbe Wert von 500 % festgelegt. Dieser Wert entspricht dem Vorschlag des BAFU für die EMEP/EEA-Unsicherheitsklasse E. Für die Schadstoffe PCB und HCB sind praktisch keine Daten verfügbar, es wurden viele Kategorien zur Bestimmung der EF-2020 zusammengefasst bzw. die Werte des EMEP/EEA Guidebook – 2019 verwendet, die eine grosse Bandbreite aufweisen.

4.3.2 Unsicherheiten EF 1990

Für die EF-1990 wird nur eine Unsicherheit für NO_x, CO, VOC, CH₄, NMVOC, PM_{exh}, PM_{2.5,exh}, PM_{10,exh}, SO_x und NH₃ angegeben (siehe Tabelle 21). Diese werden für die Unsicherheitsberechnungen im Rahmen der jährlichen Submission des Luftschadstoff- und Klimagasemissionsinventars benötigt. Da die EF für 1990 ausgehend von den EF-2020 abgeschätzt wurden, werden auch entsprechend höhere Unsicherheiten als für 2020 gewählt.

Für NO_x, CO und PM_{exh} wurde ein Wert von 200% gewählt, was dem Mittelwert der Unsicherheitsklasse D aus dem EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] (siehe Tabelle 6) entspricht.

Die Unsicherheiten für NMVOC, CH₄, PM_{2.5,exh}, PM_{10,exh} wurden mit Fehlerfortpflanzung und der Annahme der gleichen Unsicherheiten für die Faktoren wie in 2020 (siehe Kapitel 3.10.1) berechnet.

Die Unsicherheiten von NH₃ und SO_x wurden für 2020 bereits anhand der Unsicherheitsklassen des EMEP/EEA Guidebook – 2019 bestimmt. Für die Unsicherheiten 1990 wurden die Werte für NH₃ und

SO_x im Vergleich zu 2020 jeweils um 100% erhöht, was der Verschiebung um eine Klasse nach oben in der EMEP/EEA-Bewertung entspricht.

Für Unsicherheiten ≥100 % wurde analog zu den Unsicherheiten für die EF-2020 ein Wert von 80 % für die Unsicherheit des unteren Bereichs angegeben.

Tabelle 21 Unsicherheiten (Unc) in Prozent für die obere Bandbreite der EF (EF + Unc) für das Jahr 1990 für jene Schadstoffe, für die diese im Luftschadstoff- und Klimagasemissionsinventar ausgewiesen werden müssen. Für die untere Bandbreite der EF (EF – Unc) wird generell ein Wert von 80% angenommen, da die Werte für die obere Bandbreite für alle Schadstoffe grösser als 100 % sind.

HES-Kat.	NO _x	CO	VOC	CH ₄ , NMVOC	PM _{exh}	PM _{2.5,exh} , PM _{10,exh}	NH ₃	SO _x		
1	200%	200%	210%	220%	200%	210%	300%	200%		
2,3,4a,5										
4b										
6, 7										
8,9										
10										
11a										
11b										
12a,14a									300%	
12b,14b										
13, 15										
16a										
16b										
17										
18							200%	200%		
19										

4.3.3 Bandbreiten EF-Modell Kat. 2, 3, 4a und 5

Die EF für NO_x, CO, VOC und PM_{exh}, für 2020 der Feuerungskategorien 2, 3, 4a und 5 wurden gemäss Formel (3) in Kapitel 3.4.1 berechnet. Diese Berechnung wurde mit dem Programm Microsoft Excel so umgesetzt, dass die Inputparameter zur Gewichtung der Technologie und des Betriebseinflusses bei Bedarf einfach verändert werden können. Somit können zukünftige EF aufgrund von Änderungen des Nutzerverhaltens oder der Technologie schnell und einfach angepasst und die Einflüsse auf die gewichteten EF untersucht werden.

In dieser Studie wurden mit diesem Berechnungsmodell dementsprechend auch Bandbreiten der EF-2020 berechnet. Dazu wurden zusätzlich zu den für 2020 festgelegten EF noch EF für den «Best case» und den «Worst case» berechnet. Dazu wurde der Inputparameter $A_{Betr,i}$ in Formel (3) (Anteil der jeweiligen Betriebsweise i am gesamten Feuerungsbetrieb) zur Gewichtung des Betriebseinflusses verändert. Die EF des gesamten Abbrands der verschiedenen Technologien ohne Gewichtung des Betriebseinflusses ($EF_{X,standard,mod}$ und $EF_{X,standard,konv}$ in Formel (3)) blieben unverändert. Der Anteil an Feuerungen mit konventioneller und moderner Technologie am Gesamtanlagenbestand blieb für alle drei Szenarien (EF-2020, EF_{Best}-2020 und EF_{Worst}-2020) unverändert. Für die EF_{Best}-2020 wurde der bestmögliche Betrieb angenommen, also keine Gewichtung hin zu höheren EF aufgrund von negativem Nutzerverhalten. Für die EF_{Worst}-2020 wurden die zwei Betriebseinflüsse mit den höchsten EF für CO, PM_{exh} und VOC mit einem Anteil von je 50% herangezogen (siehe Tabelle A. 9 im Anhang A.3).

Die berechneten Werte für NO_x ergeben nur eine relativ geringe Bandbreite (-3% für EF_{Best}-2020 und +30% für EF_{Worst}-2020). Die EF_{Best}-2020 für CO, VOC und PM_{exh} sind jedoch 34 %, 56 % und 49 % tiefer als die EF-2020 (Tabelle A. 10 im Anhang A.3). Für die EF_{Worst}-2020 ergeben sich für CO, VOC und PM_{exh} 53 %, 91 % und 118 % höhere Werte.

4.3.4 Sensitivitätsanalyse und Bandbreiten Kat. 12-17 und 19

Die Berechnung der EF-2020 der Feuerungskategorien für automatische Feuerungen >50 kW mit dem EF Modell (Formel (4) in Kapitel 3.4.4) wurde ebenfalls so umgesetzt, dass Inputparameter zur Gewichtung verschiedener Betriebseinflüsse bei Bedarf einfach verändert werden können. Analog zu den Kategorien 2, 3, 4a und 5 wurden auch für die automatischen Feuerungen >50 kW ein «Best» und ein «Worst case» für NO_x, CO und PM_{exh} berechnet.

- Für die EF_{Best}-2020 wurde dabei die Anzahl der An- und Abfahrvorgänge, sowie die Anteile an Standby und Stillstand auf null reduziert und der Anteil am Betrieb mit Volleistung auf 80 % erhöht (siehe Tabelle A. 14 im Anhang A.5).
- Für die EF_{Worst}-2020 wurde eine deutlich höhere Anzahl An- und Abfahrvorgänge angenommen (+5 für die Kat. 12a-15 sowie 16a-17, +6 für die Kat. 12b, 14b und +2 für die Kat. 19) sowie der Anteil des Betriebs mit Volleistung auf 20 % reduziert. Die Anteile an Standby und Stillstand wurden dann so gewählt, dass sich noch positive Werte für den Anteil des Betriebs mit Volleistung ergaben. Die Angaben zur Dauer der An- und Abfahrvorgänge, der Betrachtungszeitraum sowie die EF der verschiedenen Betriebsphase wurden nicht verändert (siehe Tabelle A. 14 im Anhang A.5).

Die Änderungen der Inputparameter haben nur einen begrenzten Einfluss auf die NO_x-EF. Im Vergleich zu den EF-2020 ergeben sich Änderungen von maximal ±20 % für EF_{Best}-2020 und EF_{Worst}-2020 für alle Kategorien. Die EF_{Best}-2020 für CO sind 60 % bis 85 % und jene für PM_{exh} um 10 % bis 40 % tiefer als die EF-2020. Für CO und PM_{exh} ergeben sich jedoch deutliche Änderungen durch Annahme der schlechteren Betriebsbedingungen. Die EF_{Worst}-2020 für CO sind für die verschiedenen Kategorien um ca. einen Faktor 6-12 (mit Ausnahme von Kat. 16b mit Faktor 25) höher und jene für PM_{exh} sind um einen Faktor 1.8-4 höher.

Um den Einfluss der verschiedenen Eingabeparameter im EF-Modell auf NO_x, CO und PM_{exh} zu zeigen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein Parameter in Formel (4) in Kapitel 3.4.4 im Vergleich zum Standardfall (siehe Tabelle A. 14) verändert und alle anderen blieben unverändert. Folgende Parameter bzw. Annahmen wurden untersucht:

- Änderung der Anzahl An- und Abfahrvorgänge um je einen Vorgang von 1 bis 4
- Änderung des Verhältnisses An- und Abfahren, sowie Standby und nur Abfahren zu Volleistung zur Berechnung von PM_{exh} für die An- und Abfahrphase.
 - Änderung von ± 50 % des Faktors An- und Abfahren zu Volleistung (Standardfall = 5, Fall 1 = 2.5, Fall 2 = 7.5), Faktor Standby zu Volleistung bleibt unverändert bei 1.
 - Änderung von ± 50 % des Faktors Standby zu Volleistung (Standardfall = 1, Fall 1 = 0.5, Fall 2 = 1.5), Faktor An- und Abfahrphase zu Volleistung bleibt unverändert bei 5.

- Änderung von $\pm 50\%$ des Faktors Abfahren zu Volleistung (Standardfall = 5, Fall 1 = 2.5, Fall 2 = 7.5), Die Faktoren Anfahren (= 5) zu Volleistung sowie Standby zu Volleistung (= 1) und bleiben unverändert.
- Änderung des Anteils an Standby um je 10 % im Bereich von 0 % bis zu 40 %.
- Änderung am Verhältnis zwischen dem Betrieb mit Voll- und Teilleistung um je 25 % im Bereich von 0 % bis 100 %
- Einfluss auf PM_{exh} wenn nur Anlagen mit Feinstaubabscheider berücksichtigt werden. Dafür wurden die PM_{exh} -EF für Voll- und Teilleistung ausschliesslich von Anlagen mit Feinstaubabscheider aus den LRV-Messdaten bestimmt.

Die Resultate der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 4 und Abbildung 5 sowie in Tabelle 22 und Tabelle 23 zu sehen. Die Resultate sind die Mittelwerte über die verschiedenen Variationen eines Parameters, da die Änderungen im EF-Modell (Formel (4) in Kapitel 3.4.4) nicht inkrementell sind. Zum Beispiel ist die relative Änderung der EF (ΔEF) durch einen zusätzlichen An- und Abfahrvorgang grösser für die Erhöhung von drei auf vier An- und Abfahrvorgängen als für die Änderung von eins auf zwei.

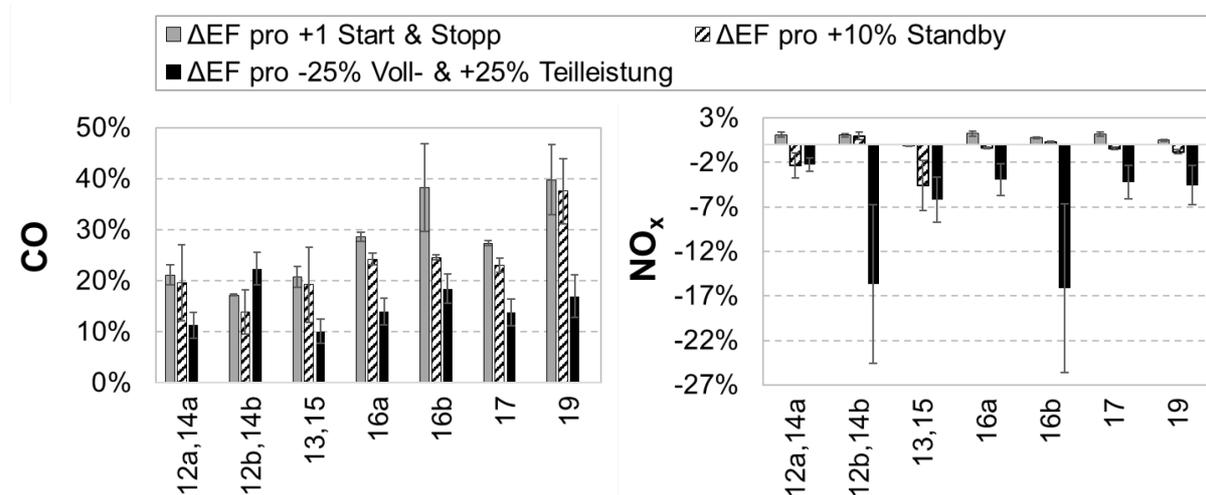


Abbildung 4 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Schadstoffe CO und NO_x für die Kat. 12a-17 und 19.

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, mit Ausnahme von Kategorie 16b, ähnliche ΔEF -CO für einen zusätzlichen An- und Abfahrvorgang (17 % bis 40 %, siehe Abbildung 4 sowie Tabelle 22 und Tabelle 23) sowie für die Änderung des Anteils an Standby um je 10 % (14 % bis 38 %). Die höheren ΔEF -CO für die Kategorien 16b und 19 sind darauf zurückzuführen, dass die EF des stationären Betriebs (Voll- und Teilleistung) mit 6–26 mg/MJ im Vergleich zu den EFs für An- und Abfahren sowie Standby (207–1209 mg/MJ) sehr tief sind (siehe Tabelle A. 17). Der Effekt auf ΔEF -CO durch die Veränderung der Anteile von Voll- und Teilleistung um je 25 % ist geringer und zeigt kleinere Unterschiede zwischen den Feuerungskategorien (11 % bis 22 %, siehe Abbildung 4 sowie Tabelle 22 und Tabelle 23). Wenn nun mittels Fehlerrechnung der Gesamtfehler des EF-Modells für CO aus allen verschiedenen ΔEF -CO ermittelt wird, ergeben sich Werte von 30 % bis 60 %. Dies ist ein wenig tiefer als die angenommene Gesamtunsicherheit der CO-EF-2020 von 80 % für die Kategorien 12a-19 (siehe Kapitel 4.3.1). Die Gesamtunsicherheit beinhaltet jedoch neben der Unsicherheit der Annahmen im EF-Modell auch andere Unsicherheiten (z.B. ob die ausgewerteten Daten den Anlagenbestand der Schweiz repräsentieren und ob alle Brennstoffsortimente und Betriebsweisen abgedeckt sind).

Relative Änderungen der $\text{NO}_x\text{-EF}$ ($\Delta\text{EF-NO}_x$) aufgrund der Variation verschiedener Parameter zeigen für die meisten Kategorien keine relevanten Effekte. Nur für Pelletfeuerungen (Kat. 12b, 14b und 16b) ergeben sich Änderungen von 16 % durch die Verschiebung des Anteils an Voll- und Teilleistung. Der Gesamtfehler des EF-Modells für NO_x ermittelt aus allen verschiedenen $\Delta\text{EF-NO}_x$ ergibt Werte von max. 16 %. Die angenommene Gesamtunsicherheit der $\text{NO}_x\text{-EF-2020}$ für die Kategorien 12a-19 beträgt 35 % bis 50 % (siehe Kapitel 4.3.1).

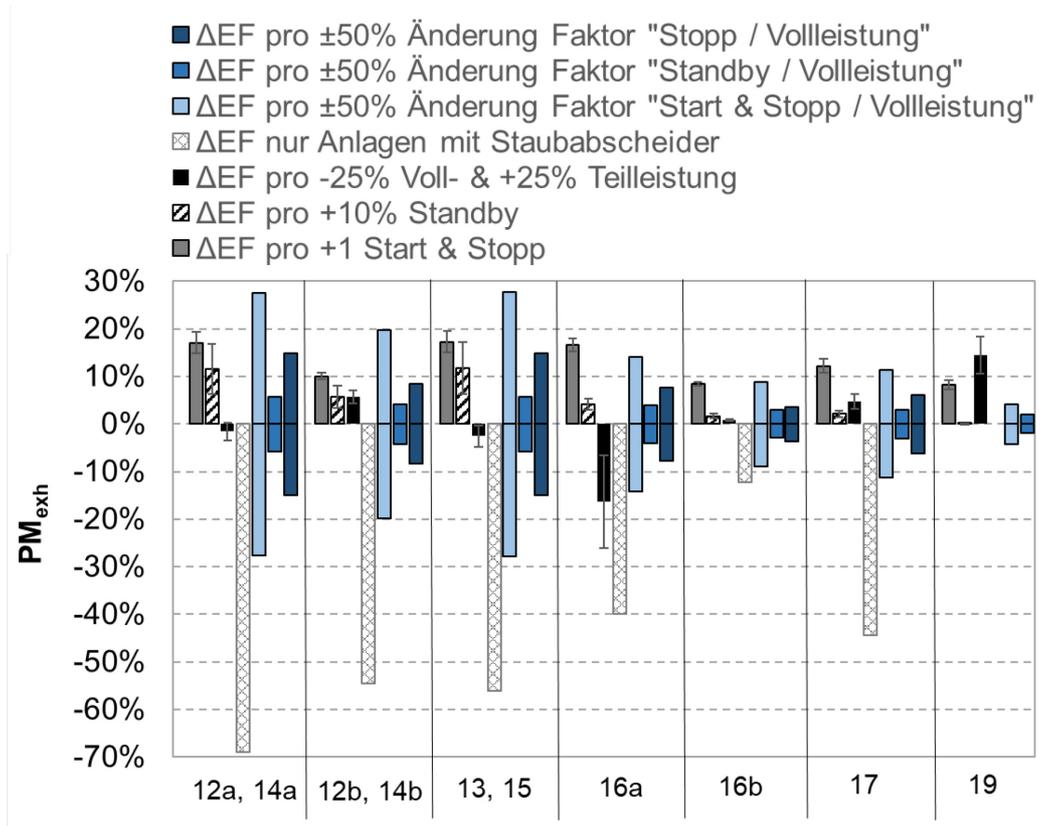


Abbildung 5 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für PM_{exh} für die Kat. 12a-17 und 19. In den Berechnungen zu den Änderungen der Faktoren Stopp, Start & Stopp und Standby zu Volleistung sowie der Vergleich mit Anlagen, die einen Feinstaubfilter installiert haben, wurden jeweils mit den Annahmen des Standardfalls durchgeführt (z.B. 4 An- und Abfahrvorgänge für Kat. 12a-15, siehe Tabelle A. 14).

Die relativen Änderungen der $\text{PM}_{\text{exh}}\text{-EF}$ ($\Delta\text{EF-PM}_{\text{exh}}$) aufgrund der verschiedenen Variationen der Parameter zeigen für die Kategorien 16b, 17 und 19 nur geringfügige Effekte von max. 12 %. Mit Ausnahme von Kategorie 16a (-16 %) und 19 (+14 %) hat die Änderung des Faktors «Standby/Volleistung» um je 50% (2 % bis 6 %) sowie die Verschiebung des Anteils an Voll- und Teilleistung um je 25 % die geringsten Effekte auf $\Delta\text{EF-PM}_{\text{exh}}$ (-2 % bis 6 %) gefolgt von der Änderung des Anteils an Standby von je 10 % (0 % bis 12 %). Die Änderungen der Anzahl An- und Abfahrvorgänge zeigt für alle Kategorien Effekte auf $\Delta\text{EF-PM}_{\text{exh}}$ mit nur einer geringen Bandbreite (10 % bis 17 %). Für die meisten Kategorien hat die Änderung des Faktors «Start & Stopp/Volleistung» um je 50 % den grössten Effekt, vor allem für Feuerungen 50-500 kW (20 % bis 28 %). Die Unterscheidung zwischen der Änderung des Faktors für Start & Stopp sowie nur Stopp zu Volleistung wurde durchgeführt, da in der Ausbrandphase eigentlich tiefere $\text{PM}_{\text{exh}}\text{-EF}$ als während der Anfahrphase zu erwarten sind. Die Sensitivitätsanalyse zeigt nun aber, dass eine Änderung des Faktors «Stopp zu Volleistung» um 50 %, also z.B. von 5 auf 2.5, zu max. 15 % tieferen $\text{PM}_{\text{exh}}\text{-EF}$ führen würden. Der grösste Effekt auf die $\text{PM}_{\text{exh}}\text{-EF}$ zeigt sich jedoch,

wenn ausschliesslich Anlagen mit Feinstaubabscheider betrieben werden. Ausser für die Kategorien 16b und 19 würden sich mindestens 40 % tiefere PM_{exh}-EF ergeben (siehe Abbildung 4 sowie Tabelle 22 und Tabelle 23). Der Gesamtfehler des EF-Modells für PM_{exh} ermittelt aus allen verschiedenen ΔEF-PM_{exh} ergibt Werte von 13 % bis 38 %. Die angenommene Gesamtunsicherheit der PM_{exh}-EF-2020 für die Kategorien 12a-19 beträgt 80 % (siehe Kapitel 4.3.1).

Tabelle 22 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Schadstoffe CO, NO_x und PM_{exh} für die Kat. 12a-15.

Änderung Parameter	12a, 14a			12b, 14b			13, 15		
	CO	NO _x	PM _{exh}	CO	NO _x	PM _{exh}	CO	NO _x	PM _{exh}
ΔEF pro +1 Start & Stopp	21±2%	1±0%	17±2%	17±0%	1±0%	10±1%	21±2%	0±0%	17±2%
ΔEF pro +10% Standby	20±7%	-2±1%	12±5%	14±4%	1±0%	6±2%	19±7%	-5±3%	12±5%
ΔEF pro -25% Voll- & +25% Teilleistung	11±3%	-2±1%	-2±2%	22±3%	-16±9%	6±1%	10±2%	-6±3%	-2±2%
ΔEF nur Anlagen mit Staubabscheider			-69%			-54%			-56%
ΔEF pro ±50% Änderung Faktor "Start & Stopp / Volleleistung"			28%			20%			28%
ΔEF pro ±50% Änderung Faktor "Standby / Volleleistung"			6%			4%			6%
ΔEF pro ±50% Änderung Faktor "Stopp / Volleleistung"			15%			8%			15%

Tabelle 23 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für die Schadstoffe CO, NO_x und PM_{exh} für die Kat. 16a-17, 19.

Änderung Parameter	16a			16b			17			19		
	CO	NO _x	PM _{exh}									
ΔEF pro +1 Start & Stopp	29±1%	1±0%	17±1%	38±9%	1±0%	8±0%	27±1%	1±0%	12±1%	40±7%	1±0%	8±1%
ΔEF pro +10% Standby	24±1%	0±0%	4±1%	25±1%	0±0%	2±0%	23±1%	0±0%	2±1%	38±6%	-1±0%	0±0%
ΔEF pro -25% Voll- & +25% Teilleistung	14±3%	-4±2%	-16±10%	18±3%	-16±9%	1±0%	14±3%	-4±2%	5±2%	17±4%	-5±2%	14±4%
ΔEF nur Anlagen mit Staubabscheider			-40%			-12%			-44%			0%
ΔEF pro ±50% Änderung Start & Stopp/Volleistung			14%			9%			11%			4%
ΔEF pro ±50% Änderung Standby / Volleleistung			4%			3%			3%			2%
ΔEF pro ±50% Änderung Stopp / Volleleistung			8%			4%			6%			2%

5 Literatur

1. Nussbaumer, T. and L. Hälg, *Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen – Aktualisierung und Ergänzung 2014*, Bundesamt für Umwelt, ISBN 3-908705-26-6. 2014.
2. *Schweizerische Holzenergiestatistik. Erhebung für das Jahr 2020*. Basler & Hofmann im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE), Bern. 2021.
3. EMEP/EEA, *Air pollutant emission inventory guidebook - 1.A.4 Small combustion*. 2019.
4. Reichert, G., et al., *Effect of draught conditions and ignition technique on combustion performance of firewood roomheaters*. *Renewable Energy*, 2017. **105**: p. 547-560.
5. Reichert, G., et al., *beReal Development of a New Test Method for Firewood Roomheaters Reflecting Real Life Operation*, in *24th European Biomass Conference and Exhibition*. 2016: Amsterdam.
6. Reichert, G., et al. *beReal: A Practical Test Method for Firewood Roomheaters - Real-Life Relevance and Reproducibility*. in *25th European Biomass Conference and Exhibition*. 2017. Stockholm.
7. Reichert, G. and C. Schmidl, *Advanced Test Methods for Firewood Stoves - Report on consequences of real-life operation on stove performance*, IEA Bioenergy Task 32. 2018.
8. Reichert, G., et al., *Development of a New Type Test Method for Residential Wood Combustion (RWC) Appliances Focusing on Real Life Operation*, in *22nd European Biomass Conference and Exhibition*. 2014: Hamburg.
9. Reichert, G., et al., *Investigation of user behavior and operating conditions of residential wood combustion (RWC) appliances and their impact on emissions and efficiency*, in *Proceedings of 4th Central European Biomass Conference*. 2014: Graz, Austria. p. 373-380.
10. Reichert, G., et al., *Investigation of user behavior and assessment of typical operation mode for different types of firewood room heating appliances in Austria*. *Renewable Energy*, 2017. **93**: p. 245-254.
11. Reichert, G., et al., *Novel Method Evaluating Real-Life Performance of Firewood Roomheaters in Europe*. *Energy & Fuels*, 2018. **32**(2): p. 1874-1883.
12. Rönnbäck, M., et al., *beReal - Documentation and evaluation of field data demonstration, deliverable D7.1, final report*, verfügbar unter: <http://www.bereal-project.eu/projects-deliverables.html> (letzter Zugriff am 06.05.2021). 2016.
13. Ozgen, S., et al., *Emission factors from small scale appliances burning wood and pellets*. *Atmospheric Environment*, 2014. **94**: p. 144-153.
14. Avagyan, R., et al., *Particulate hydroxy-PAH emissions from a residential wood log stove using different fuels and burning conditions*. *Atmospheric Environment*, 2016. **140**: p. 1-9.
15. Bhattu, D., et al., *Effect of Stove Technology and Combustion Conditions on Gas and Particulate Emissions from Residential Biomass Combustion*. *Environmental Science & Technology*, 2019. **53**(4): p. 2209-2219.
16. Brandelet, B., et al., *Investigation of the organic carbon ratio analysis on particles from biomass combustion and its evolution in three generations of firewood stoves*. *Biomass and Bioenergy*, 2017. **99**: p. 106-115.
17. Czech, H., et al., *Chemical composition and speciation of particulate organic matter from modern residential small-scale wood combustion appliances*. *Science of The Total Environment*, 2018. **612**: p. 636-648.
18. Czech, H., et al., *On-line analysis of organic emissions from residential wood combustion with single-photon ionisation time-of-flight mass spectrometry (SPI-TOFMS)*. *Fuel*, 2016. **177**: p. 334-342.
19. Fachinger, F., et al., *How the user can influence particulate emissions from residential wood and pellet stoves: Emission factors for different fuels and burning conditions*. *Atmospheric Environment*, 2017. **158**: p. 216-226.
20. Kasurinen, S., et al., *Particulate emissions from the combustion of birch, beech, and spruce logs cause different cytotoxic responses in A549 cells*. *Environmental Toxicology*, 2017. **32**(5): p. 1487-1499.
21. Keller, A. and H. Burtscher, *Characterizing particulate emissions from wood burning appliances including secondary organic aerosol formation potential*. *Journal of Aerosol Science*, 2017. **114**: p. 21-30.
22. Kindbom, K., et al., *Emission factors for SLCP emissions from residential wood combustion in the Nordic countries : Improved emission inventories of Short Lived Climate Pollutants (SLCP)*. TemaNord. 2018, Copenhagen: Nordisk Ministerråd. 76.

23. Kistler, M., et al., *Time-resolved characterization of PM10 emissions from modern small scale biomass combustion units, including PAHs*, in *23rd European Biomass Conference and Exhibition*. 2015: Vienna.
24. Klauser, F., et al., *Emission characterization of modern wood stoves under real-life oriented operating conditions*. *Atmospheric Environment*, 2018a. **192**: p. 257-266.
25. Kortelainen, M., et al., *Time-resolved chemical composition of small-scale batch combustion emissions from various wood species*. *Fuel*, 2018. **233**: p. 224-236.
26. Mack, R., et al., *Optimierungspotenziale bei Kaminöfen*. 2018, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ): Straubing.
27. Mack, R., et al., *Nutzereinflüsse auf das Emissionsverhalten von Kaminöfen*. 2019, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ): Straubing.
28. Martinsson, J., et al., *Impacts of Combustion Conditions and Photochemical Processing on the Light Absorption of Biomass Combustion Aerosol*. *Environmental Science & Technology*, 2015. **49**(24): p. 14663-14671.
29. Mitchell, E.J.S., et al., *The impact of fuel properties on the emissions from the combustion of biomass and other solid fuels in a fixed bed domestic stove*. *Fuel Processing Technology*, 2016. **142**: p. 115-123.
30. Nielsen, I.E., et al., *Time-resolved analysis of particle emissions from residential biomass combustion – Emissions of refractory black carbon, PAHs and organic tracers*. *Atmospheric Environment*, 2017. **165**: p. 179-190.
31. Nuutinen, K., et al., *Effect of air staging on fine particle, dust and gaseous emissions from masonry heaters*. *Biomass and Bioenergy*, 2014. **67**: p. 167-178.
32. Nyström, R., et al., *Influence of Wood Species and Burning Conditions on Particle Emission Characteristics in a Residential Wood Stove*. *Energy & Fuels*, 2017. **31**(5): p. 5514-5524.
33. Reda, A.A., et al., *Analysis of Gas-Phase Carbonyl Compounds in Emissions from Modern Wood Combustion Appliances: Influence of Wood Type and Combustion Appliance*. *Energy & Fuels*, 2015. **29**(6): p. 3897-3907.
34. Schieder, W., et al., *Luftschadstoffausstoß von Festbrennstoff-Einzelöfen - Untersuchung des Einflusses von Festbrennstoff-Einzelöfen auf den Ausstoß von Luftschadstoffen*. 2013, Wien: Österreichisches Umweltbundesamt.
35. Schön, C. and H. Hartmann, *Nutzer- und Brennstoffeinflüsse auf Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen*. 2014, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ): Straubing.
36. Sturmlechner, R., et al., *Real-Life Emission Factor Assessment for Biomass Heating Appliances at a Field Measurement Campaign in Styria, Austria*. *Air Pollution Conference Proceedings*, 2019: p. 221-231.
37. Tschamber, V., et al., *Domestic Wood Heating Appliances with Environmental High Performance: Chemical Composition of Emission and Correlations between Emission Factors and Operating Conditions*. *Energy & Fuels*, 2016. **30**(9): p. 7241-7255.
38. Zhang, Y., et al., *Particulate emissions from different types of biomass burning*. *Atmospheric Environment*, 2013. **72**: p. 27-35.
39. Eriksson, A.C., et al., *Particulate PAH Emissions from Residential Biomass Combustion: Time-Resolved Analysis with Aerosol Mass Spectrometry*. *Environmental Science & Technology*, 2014. **48**(12): p. 7143-7150.
40. Kaivosoja, T., et al., *Effects of a catalytic converter on PCDD/F, chlorophenol and PAH emissions in residential wood combustion*. *Chemosphere*, 2012. **88**(3): p. 278-85.
41. Klauser, F., et al., *Development of a compact technique to measure benzo(a)pyrene emissions from residential wood combustion, and subsequent testing in six modern wood boilers*. *Biomass and Bioenergy*, 2018b. **111**: p. 288-300.
42. Moreno, A.I., R. Font, and J.A. Conesa, *Characterization of gaseous emissions and ashes from the combustion of furniture waste*. *Waste Management*, 2016. **58**: p. 299-308.
43. Ozgen, S., et al., *Analysis of the chemical composition of ultrafine particles from two domestic solid biomass fired room heaters under simulated real-world use*. *Atmospheric Environment*, 2017. **150**: p. 87-97.
44. Vicente, E.D., et al., *Particulate phase emission of parent polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (alkyl-PAHs, oxygenated-PAHs, azaarenes and nitrated PAHs) from manually and automatically fired combustion appliances*. *Air Qual Atmos Health*, 2016. **9**(6): p. 653-668.

45. Bachmaier, et al., *BEREAL - Method for Pellet Stoves: Field Test and Round Robin*, in *25th European Biomass Conference and Exhibition*. 2017: Stockholm.
46. Hrdlička, J., et al., *Emission factors of gaseous pollutants from small scale combustion of biofuels*. *Fuel*, 2016. **165**: p. 68-74.
47. Oehler, H., et al., *Development of a Test Procedure to Reflect the Real Life Operation of Pellet Stoves*, in *24th European Biomass Conference and Exhibition*. 2016: Amsterdam.
48. Ozgen, S. and S. Caserini, *Methane emissions from small residential wood combustion appliances: Experimental emission factors and warming potential*. *Atmospheric Environment*, 2018. **189**: p. 164-173.
49. Tebert, C., S. Volz, and K. Töfge, *Ermittlung und Aktualisierung von Emissionsfaktoren für das nationale Emissionsinventar bezüglich kleiner und mittlerer Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher*. 2016, Ökopol GmbH im Auftrag des Deutschen Umweltbundesamt.
50. Venturini, E., et al., *Effect of fuel quality classes on the emissions of a residential wood pellet stove*. *Fuel*, 2018. **211**: p. 269-277.
51. Venturini, E., et al., *Evaluation of non-steady state condition contribution to the total emissions of residential wood pellet stove*. *Energy*, 2015. **88**: p. 650-657.
52. Vicente, E.D., et al., *Particulate and gaseous emissions from the combustion of different biofuels in a pellet stove*. *Atmospheric Environment*, 2015. **120**: p. 15-27.
53. Win, K.M. and T. Persson, *Emissions from Residential Wood Pellet Boilers and Stove Characterized into Start-up, Steady Operation, and Stop Emissions*. *Energy & Fuels*, 2014. **28**(4): p. 2496-2505.
54. Win, K.M., T. Persson, and C. Bales, *Particles and gaseous emissions from realistic operation of residential wood pellet heating systems*. *Atmospheric Environment*, 2012. **59**: p. 320-327.
55. Wöhler, M., et al., *Influence of pellet length on performance of pellet room heaters under real life operation conditions*. *Renewable Energy*, 2017. **105**: p. 66-75.
56. Edo, M., et al., *Emissions of toxic pollutants from co-combustion of demolition and construction wood and household waste fuel blends*. *Chemosphere*, 2018. **203**: p. 506-513.
57. Toscano, G., et al., *Emission from realistic utilization of wood pellet stove*. *Energy*, 2014. **68**: p. 644-650.
58. Krpec, K., et al., *Impact of Boiler Type, Heat Output, and Combusted Fuel on Emission Factors for Gaseous and Particulate Pollutants*. *Energy & Fuels*, 2016. **30**(10): p. 8448-8456.
59. Horak, J., et al., *PAH emissions from old and new types of domestic hot water boilers*. *Environmental Pollution*, 2017. **225**: p. 31-39.
60. Passamani, G., et al., *Pcdd/f emissions from virgin and treated wood combustion*. *International Journal of Energy Production and Management*, 2017. **2**: p. 17-27.
61. Leskinen, J., et al., *Fine particle emissions in three different combustion conditions of a wood chip-fired appliance – Particulate physico-chemical properties and induced cell death*. *Atmospheric Environment*, 2014. **86**: p. 129-139.
62. Monteleone, B., et al., *Life cycle analysis of small scale pellet boilers characterized by high efficiency and low emissions*. *Applied Energy*, 2015. **155**: p. 160-170.
63. Gehrig, M., et al., *Implementation of a firebed cooling device and its influence on emissions and combustion parameters at a residential wood pellet boiler*. *Applied Energy*, 2015. **159**: p. 310-316.
64. Kasurinen, S., et al., *Toxicological effects of particulate emissions – A comparison of oil and wood fuels in small- and medium-scale heating systems*. *Atmospheric Environment*, 2015. **103**: p. 321-330.
65. Krugly, E., et al., *Characterization of Gaseous- and Particle-Phase Emissions from the Combustion of Biomass-Residue-Derived Fuels in a Small Residential Boiler*. *Energy & Fuels*, 2014. **28**(8): p. 5057-5066.
66. Olave, R.J., et al., *Particulate and gaseous emissions from different wood fuels during combustion in a small-scale biomass heating system*. *Atmospheric Environment*, 2017. **157**: p. 49-58.
67. Rector, L., et al., *Comparative emissions characterization of a small-scale wood chip-fired boiler and an oil-fired boiler in a school setting*. *Biomass and Bioenergy*, 2017. **107**: p. 254-260.
68. Sippula, O., et al., *Emissions and ash behavior in a 500kW pellet boiler operated with various blends of woody biomass and peat*. *Fuel*, 2017. **202**: p. 144-153.
69. *Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985, Artikel 814.318.142.1, Stand 1. April 2020, verfügbar unter: https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/de#app2*.

70. BAFU, *Emissionsmessung bei Feuerungen für Öl, Gas und Holz. Messempfehlungen Feuerungen. Bundesamt für Umwelt, Bern. 2. Aktualisierte Ausgabe, Dezember 2018; Erstausgabe 2013. Umwelt-Vollzug Nr. 1319: 35 S., verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/publikationen-studien/publikationen/emissionsmessung-bei-feuerungen-fuer-oel-gas-und-holz.html>*. 2018.
71. Lauber, A., J. Good, and T. Nussbaumer. *Langzeitmessungen zur Beurteilung von automatischen Holzfeuerungen*. in 14. Holzenergie-Symposium, 16. September 2016, ETH Zürich, ISBN 3-908705-31-2, 47-64. 2016.
72. A., L., P. Zotter, and T. Nussbaumer. *Praxisbeispiele zu QS-Support Holzfeuerungen*. 2020. in: Nussbaumer T. (Hrsg.): 16. Holzenergie-Symposium. ETH Zürich, 11.09.2020, Verenum AG Zürich 2020, ISBN 3-908705-38-X, 37–49.
73. BAFU, *Emissionsmessung bei stationären Anlagen. Emissions-Messempfehlungen. 1. Aktualisierte Fassung vom Dezember 2018. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1320: 155 S.* 2018.
74. J., G., et al., *Planungshandbuch, Band 4 der Schriftenreihe QM Holzheizwerke*. 2004: C.A.R.M.E.N. e.V., Straubing 2004, ISBN 3-937441-92-1.
75. BAFU, *Faktenblatt Emissionsfaktoren Feuerungen*, verfügbar unter: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/fachinfo-daten/faktenblatt_emissionsfaktorenfeuerungen.pdf.download.pdf/faktenblatt_emissionsfaktor_enfeuerungen.pdf. 2015.
76. Holzheizwerke, Q., <https://www.qmholzheizwerke.ch>, letzter Zugriff 18.06.2021. 2021.
77. Nussbaumer, T. and N. Boogen, *Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen – Aktualisierung des Arbeitsblatts Emissionsfaktoren Feuerungen und Vorabklärungen zur Bestimmung des Kondensatanteils, Bundesamt für Umwelt, Bern* 2010. 2010.
78. Nussbaumer, T., *Schadstoffbildung bei der Verbrennung von Holz*. 1989, Zürich, Diss ETH Nr. 8838.
79. EMEP/EEA, *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook – 2013, Technical report No 12/2013, Copenhagen*. 2013.
80. Nussbaumer, T., *Aerosols from biomass combustion, Technical report on behalf of the IEA Bioenergy Task, IEA Bioenergy, ISBN 3-908705-33-9, verfügbar unter: <https://www.etipbioenergy.eu/databases/reports/326-aerosols-from-biomass-combustion-technical-report-on-behalf-of-the-iea-bioenergy-task-32>* (letzter Zugriff: 11.05.2021). 2017.
81. Kindbom, K., et al., *Potentials for reducing the health and climate impacts of residential biomass combustion in the Nordic countries*. TemaNord. 2018, Copenhagen: Nordisk Ministerråd. 48.
82. Lauber, A. and T. Nussbaumer, *Praxiseinsatz und Überwachung von automatischen Holzfeuerungen mit Elektroabscheider* 2014: BFE Schlussbericht, ISBN 3-908705-29-0.
83. Zotter, P., et al., *A Simple Method to Determine Cytotoxicity of Water-Soluble Organic Compounds and Solid Particles from Biomass Combustion in Lung Cells in Vitro*. Environmental Science & Technology, 2019.
84. Brandelet, B., et al., *Impact of ignition technique on total emissions of a firewood stove*. Biomass and Bioenergy, 2018. **108**: p. 15-24.
85. Johansson, L.S., et al., *Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets*. Atmospheric Environment, 2004. **38**(25): p. 4183-4195.
86. Petterson, E., et al., *Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 2: Wood Stove*. Energy & Fuels, 2011. **25**(1): p. 315-323.
87. Boman, C., et al., *Stove Performance and Emission Characteristics in Residential Wood Log and Pellet Combustion, Part 1: Pellet Stoves*. Energy & Fuels, 2011. **25**(1): p. 307-314.
88. Lamberg, H., et al., *Physicochemical characterization of fine particles from small-scale wood combustion*. Atmospheric Environment, 2011. **45**(40): p. 7635-7643.
89. Nussbaumer, T., *Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen und Klimaeffekt von Aerosolen aus der Biomasse-Verbrennung*, 11. Holzenergie-Symposium, Zürich 2010, verfügbar unter: <https://www.holzenergie-symposium.ch/download2010.html> (letzter Zugriff: 19.04.2021). 2010.
90. Odermatt, P. and T. Nussbaumer, *Holzofen mit Verbrennungsretorte und zweistufiger Verbrennung*, 12. Holzenergie-Symposium, ETH Zürich 2012, ISBN 3-908705-24-X, 31–52. 2012.
91. Odermatt, P., J. Good, and T. Nussbaumer, *Messungen an Pelletofen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen, Hochschule Luzern, Messbericht, Hochschule Luzern, 5.6.2014*. 2014.

92. Mack, R., et al., *Schwierige Pelletbrennstoffe für Kleinf Feuerungsanlagen*. 2020, Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ): Straubing.
93. Denier van der Gon, H.A.C., et al., *Particulate emissions from residential wood combustion in Europe – revised estimates and an evaluation*. *Atmos. Chem. Phys.*, 2015. **15**(11): p. 6503-6519.
94. Stefanelli, G., et al., *Secondary organic aerosol formation from smoldering and flaming combustion of biomass: a box model parametrization based on volatility basis set*. *Atmos. Chem. Phys.*, 2019. **19**(17): p. 11461-11484.
95. EMEP. *How should condensables be included in PM emission inventories reported to EMEP/CLRTAP? - Report of the expert workshop on condensable organics*. 2020. organised by MSC-W, Gothenburg, 17-19th March 2020.
96. Ortega, M., *Improved combustion in wood stoves, Master Thesis, NTNU, Trondheim 2008, and presentation at SINTEF workshop in Trondheim*. 2008.
97. Nussbaumer, T., N. Kippel, and L. Johansson, *Survey on measurements and emission factors on particulate matter from biomass combustion in IEA countries*, in *16th European Biomass Conference & Exhibition June 2-6, 2008, Valencia, Spain*. 2008.
98. EPA. *United States Environmental Protection Agency (EPA): Method 5H "Determination of Particulate Matter Emissions from Wood Heaters from a Stack Location"*, available from <http://www.epa.gov/ttn/emc/methods/method5h.html>, last access 03.05.2017.
99. Hasler, P. and T. Nussbaumer, *Landwirtschaftliche Verwertung von Aschen aus der Verbrennung von Gras, Chinaschilf, Hanf, Stroh und Holz, Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern*. 1996.
100. Tissari, J., et al., *A novel field measurement method for determining fine particle and gas emissions from residential wood combustion*. *Atmospheric Environment*, 2007. **41**(37): p. 8330-8344.
101. Struschka, M., et al., *Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung. Abschlussbericht, FKZ 205 42 322. Universität Stuttgart; IVD. UBA-Text 44/08. Hg.: Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/effiziente-bereitstellung-aktueller-emissionsdaten>*. 2008.
102. Hedberg, E., et al., *Chemical and physical characterization of emissions from birch wood combustion in a wood stove*. *Atmospheric Environment*, 2002. **36**(30): p. 4823-4837.
103. Brassard, P., et al., *Comparison of the gaseous and particulate matter emissions from the combustion of agricultural and forest biomasses*. *Bioresource Technology*, 2014. **155**: p. 300-306.
104. Fournel, S., et al., *Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops*. *Applied Energy*, 2015. **141**: p. 247-259.
105. Zeng, T., et al., *Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices*. *Fuel*, 2016. **184**: p. 689-700.
106. Hasler, P. and T. Nussbaumer, *Optimierung des Abscheideverhaltens von HCl, SO₂ und PCDD/F in einem Gewebefilter nach einer Altholzfeuerung*, *Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern* 1995.
107. Brassard, P., et al., *Gaseous Emissions Comparison from Agricultural and Forest Biomass Combustion, NABEC-CSBE/SCGAB 2012 Joint Meeting and Technical Conference*. 2012.
108. Hasler, P. and T. Nussbaumer, *Brennstoffeigenschaften und Anforderungen an Feuerungstechnik und Abgasreinigung für die Nutzung von Industrierest- und Altholz. Biomasse als Festbrennstoff, Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“ Nr. 6, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster (D), ISBN 3-7843-2821-0, 1996, 176 – 197*. 1996.
109. Hasler, P., T. Nussbaumer, and R. Bühler, *Vergleich von FTIR- und FAG-Messtechnik mit konventionellen Methoden im Abgas einer Altholzfeuerung*, *Bundesamt für Energiewirtschaft, Bern* 1994.
110. Czech, H., et al., *Time-resolved analysis of primary volatile emissions and secondary aerosol formation potential from a small-scale pellet boiler*. *Atmospheric Environment*, 2017. **158**: p. 236-245.

Anhang – Zusatz- und Hilfstabellen

A.1 Datengrundlage – Messdaten

Tabelle A. 1 Übersicht zu Messungen der verschiedenen Schadstoffe (LRV-Emissionsmessungen und Messungen im Auftrag des BAFU) für die verschiedenen HES-Feuerungskategorien, die in der Auswertung berücksichtigt wurden.

Datenherkunft	HES Kat.	NO _x	CO	VOC	PM _{exh}	BC	Pb	Zn	Cd	Hg	PAK	NH ₃	SO _x	Benzol	PCDD/F	PCB	HCB
LRV-Emissionsmessungen	12a,14a	18 944	-	922	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	12b,14b	11 365	-	362	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	13, 15	15 437	-	350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16a	74 436	4	461	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16b	2 26	-	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	17	6 39	1	37	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18	54 66	33	54	12	12	10	10	-	38	27	-	10	-	-	-	
	19	77 81	65	79	-	34	34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Messungen im Auftrag des BAFU	12a,14a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-
	12b,14b	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	-	1	-	-	-	-
	13,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	16a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	-	-
	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	-	1	1	-	-	-	-
	19	3	3	2	3	1	3	3	3	3	1	3	3	1	2	-	-

Tabelle A. 2 Übersicht zur Anzahl an Anlagen und Messungen der verschiedenen Schadstoffe der Langzeitmessungen für die verschiedenen HES-Feuerungskategorien und Betriebsphasen, die in der Auswertung berücksichtigt wurden.

HES-Kat.	Betriebsphasen	Anzahl Anlagen	Anzahl Messungen		
			NO _x	CO	VOC
12a, 14a, 13, 15	Anfahren	14	12	14	1
	Abfahren	14	12	14	1
	Regelbetrieb	15	13	15	1
	Feuerungsbetrieb	15	13	15	1
	Teilleistung	14	12	14	1
	Volleistung	10	8	10	-
	Gb-Unterhalt	6	3	4	-
	Standby	15	13	15	1
12b, 14b, 16b	Anfahren	4	3	4	-
	Abfahren	4	3	4	-
	Regelbetrieb	4	3	4	-
	Feuerungsbetrieb	4	3	4	-
	Teilleistung	4	3	4	-
	Volleistung	2	2	2	-
	Gb-Unterhalt	1	-	-	-
	Standby	4	3	4	-
16a, 17, 19	Anfahren	13	4	11	5
	Abfahren	13	4	11	5
	Regelbetrieb	17	8	17	5
	Feuerungsbetrieb	17	7	16	4
	Teilleistung	17	8	17	5
	Volleistung	6	5	6	1
	Gb-Unterhalt	11	2	5	3
	Standby	15	6	13	5

A.2 Datenauswertung

Tabelle A. 3 Faktoren zur Umrechnung von Emissionskonzentrationen in mg/m_n^3 auf Emissionsfaktoren in mg/MJ für unterschiedliche Wassergehalte (w) bzw. Holzfeuchten (u) für die Bezugssauerstoffgehalte 11 Vol.-% und 13 Vol.-%.

f = GJ/m_n^3	w	0%	9%	17%	20%	23%	26%	29%	33%	38%
	u	0%	10%	20%	25%	30%	35%	40%	50%	60%
bei 11 Vol.-% O_2		1.92	1.89	1.86	1.85	1.84	1.82	1.81	1.78	1.76
bei 13 Vol.-% O_2		1.53	1.51	1.49	1.48	1.47	1.46	1.45	1.43	1.41

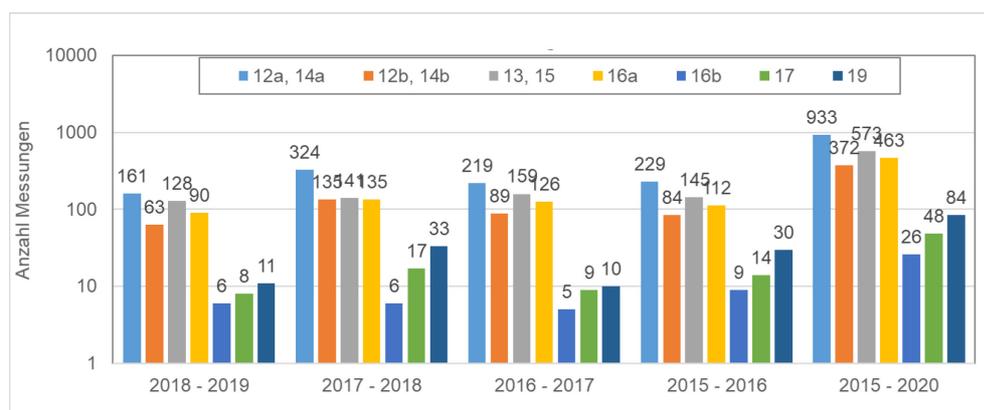


Abbildung A. 1: Anzahl verfügbarer Daten aus LRV-Messberichten der verschiedenen HES-Kategorien für unterschiedliche Auswerteperioden

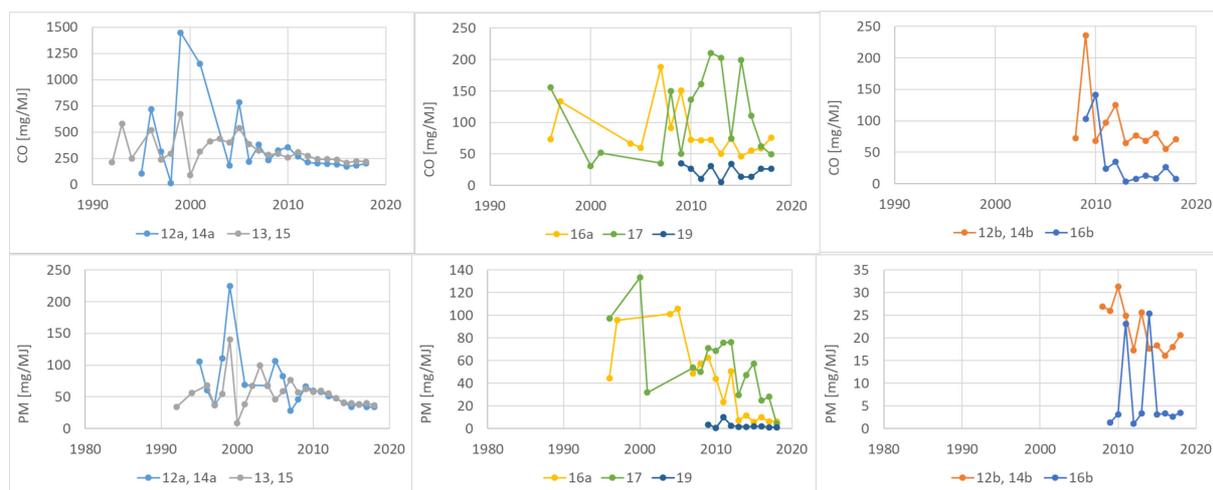


Abbildung A. 2: EF-Entwicklung verschiedener HES-Kategorien basierend auf CO - und PM_{exh} -Emissionsdaten der LRV-Messberichte. Die EF in dieser Grafik repräsentieren den Median über alle Daten, ohne Unterscheidung zwischen Voll- und Teilleistung.

A.3 EF-Modell HES-Kategorie 2, 3, 4a, 5 – Zusatztabelle

Tabelle A. 4 EF der HES-Kat. 2, 3, 4a, 5 für 2020, die Prognose (2035), sowie den Rückblick (1990, 2008 und 2014). Die gewichteten Werte wurden mit den EF des optimalen Betriebs und den Anteilen und Verhältnissen der Tabelle A. 5, Tabelle A. 7 und Tabelle A. 8 berechnet (siehe Kapitel 3.4.1).

Jahr	Betriebseinfluss	Technologie	NO _x	CO VOC PM _{exh}		
				[mg/MJ]		
2020	optimaler Betrieb	konventionell	83	1973	189	55
		modern	85	1698	120	35
	Standardfall	gewichtet (44% modern)	86	2827	357	90
2035	Standardfall	gewichtet (Annahme 75% modern)	86	2192	210	56
2014	Standardfall	gewichtet (Annahme 25% modern)	86	2950	399	101
2008		gewichtet (Annahme 10% modern)	87	3414	511	130
1990		gewichtet (Annahme 0% modern)	87	3651	583	143

Tabelle A. 5 Angaben zum Anlagenbestand aus der Holzenergiestatistik 2019. Der gewichtete Mittelwert ergibt, dass im Jahr 2019 56% der Anlagen die Technologie „konventionell“ bzw. 44% die Technologie „modern“ haben.

Baujahr	Anteil Anlagen im Jahr 2019 [%]	Annahme zum Anteil Technologie
2008 - 2019	30 %	75% modern und 25% konventionell.
1998 - 2008	42 %	50% modern und 50% konventionell
1990 - 1998	28 %	100% konventionell

Tabelle A. 6 Literaturangaben zu Technologieklassifikation und Anteil der verschiedenen Technologien am aktuellen Anlagenbestand der Feuerungen der HES-Kategorien 2,3,4a,5 in verschiedenen Ländern.

Land	Baujahr	Technologie	Anteil [%]	Quelle
Dänemark	< 1990	alt	20.2	[22, 81]
	1990 – 2005	neu	45.0	
	> 2008	modern	16.4	
		eco-labelled	18.4	
Norwegen	< 1998	alt	49.7	
	> 1998	neu	50.3	
Schweden	-	alt	46	
	-	neu	50	
	-	Kachelofen	4	
Nordic Council	-	alt	34.1	
	-	new/ modern/ eco-labelled	65.9	
Deutschland	< 1950	-	2	[27]
	1950 – 1974	-	4	
	1975 – 1984	-	6	
	1985 - 1994	-	20	
	1995 – 2010	-	46	
	> 2010	-	22	
Österreich	-	Konventionell	44.6	[34]
	-	Advanced	7.1	
	-	Geschlossene Chemineés	1.8	
	-	Kachelöfen	46.5	
Deutschland	<1989	-	2	[49]
	1990 - 2004	-	48	
	2005 - 2010	-	50	

Tabelle A. 7 Anteile der verschiedenen Technologien und Betriebsweisen für die Berechnung der gewichteten EF (Standardfall) der HES-Kat. 2, 3, 4a, 5 für 2020, die Prognose (2035) und den Rückblick (2014, 2008 und 1990).

Betriebsweise & Technologie	EF-2020		EF Prognose und Rückblick				
	Quelle	Anteil	Quelle	2035	1990	2008	2014
				Anteil	Anteil	Anteil	Anteil
konventionelle Öfen	Tabelle A. 5	56%*	Annahme	25%	100%	90%	75%
moderne Öfen	Tabelle A. 5	44%*	Annahme	75%	0%	10%	25%
Anzünden von Unten	Annahme	25%	Annahme	10%	33%	30%	25%
Anzünden mit Zeitungspapier	Annahme	10%	Annahme	5%	20%	15%	10%
Betrieb mit feuchtem Holz	Annahme	10%	Annahme	5%	15%	15%	10%
Betrieb mit Überladen der Brennkammer	Annahme	10%	Annahme	5%	10%	10%	10%
Betrieb mit Reduzierung der Luftzufuhr	Annahme	10%	Annahme	5%	15%	15%	10%
optimaler Betrieb	Annahme	35%	Annahme	70%	7%	15%	35%

*Mit den Zahlen aus Tabelle A. 5 können die Anteile nur für das Jahr 2019 berechnet werden. Für 2020 werden die gleichen Zahlen angenommen.

Tabelle A. 8 Literaturangaben zu EF-Verhältnissen bei verschiedenen Betriebsweisen und Technologien der Schadstoffe NO_x, CO, VOC und PM_{exh} für Feuerungen der HES-Kat. 2,3,4a,5.

Literatur	Betriebseinfluss	Technologie	Anzahl Öfen untersucht	Baujahr	NO _x	CO	VOC	PM _{exh}
[15]	Anzünden von Unten / Anzünden von Oben	konventionell	1	2004	1.7	3.9	4.3	
	sehr feucht / optimal		1	2004	1.7	1.7	0.9	1.9
	sehr feucht / optimal	modern	1	2014	2.5	3.0	0.8	10.0
	überladen / optimal		1	2014	0.9	2.0	1.9	1.5
[27]	Anzünden von Unten/ Anzünden von Oben	modern	1	>2015	1.0	0.7	0.4	0.9
	Anzünden von Unten: mit Zeitung/ ohne Zeitung		1	>2015	1.0	2.4	4.6	2.0
	Reduzierung Luftzufuhr/ optimal		1	>2015	0.8	1.7	1.2	0.9
	überladen / optimal		1	>2015	0.6	2.3	2.6	1.3
	feucht / optimal		1	>2015	0.9	2.5	4.8	4.3
	zu trocken / optimal		1	>2015	1.0	1.0	1.4	1.6
[35]	überladen / optimal	modern	1		1.1	1.0	1.3	
	überladen / optimal	konventionell	1		2.7	6.1	1.9	
	feucht / optimal	modern			2.5	9.3	9.8	
[4]	Anzünden von Unten/ Anzünden von Oben	konventionell & modern	2-12	2013-2015	1.4	2.2	0.9	
[22]	feucht / optimal	modern	8		1.8			
Auswertung	Anzünden von Unten/ Anzünden von Oben	modern	Mittelwert		1.0	1.0	1.3	0.9
		konventionell			1.5	3.1	2.6	
	feucht / optimal	konventionell			1.7	2.3	4.0	6.5
	überladen / optimal	konventionell & modern			0.8	2.1	2.9	1.5
	Reduzierung Luftzufuhr/ optimal	modern			0.8	1.7	1.2	0.9
	Anzünden mit Zeitung/ Anzünden ohne Zeitung				1.0	2.4	4.6	2.0

Tabelle A. 9 Anteile* der verschiedenen Technologien und Betriebsweisen für die Berechnung der Bandbreiten „Best-Case“ (EF_{Best-2020}), Standardfall (EF-2020) und „Worst-Case“ (EF_{Worst-2020}) für das Jahr 2020.

Inputparameter	EF _{Best-2020}	EF-2020	EF _{Worst-2020}
Konventionelle Öfen	56%	56%	56%
Moderne Öfen	44%	44%	44%
Anzünden von Unten	0%	25%	-%
Anzünden mit Zeitungspapier	0%	10%	50%
Betrieb mit feuchtem Holz	0%	10%	50%
Betrieb mit Überladen der Brennkammer	0%	10%	-%
Betrieb mit Reduzierung der Luftzufuhr	0%	10%	-%
Optimaler Betrieb	100%	35%	-%

* Da der Standardfall (EF-2020) und der «Worst-Case» (EF_{Worst-2020}) ausgehend vom «Best-Case» (EF_{Best-2020}) berechnet wurde und jeweils ein EF für alle Anlagen der Schweiz berechnet wird, muss die Summe aller Anteile der verschiedenen Betriebsweisen 100% betragen. Die Anteile der jeweiligen Betriebsweisen am durchschnittlichen Betrieb des gesamten Anlagenbestandes der Kategorie 2, 3, 4a, 5 wurden angenommen, da dazu keine verwertbaren Literaturangaben gefunden wurden. Eine Kombination der verschiedenen Betriebsweisen, z.B. Anzünden mit Zeitungspapier und Reduzieren der Luftzufuhr würde zu einer Erhöhung der Inputparameter in Tabelle A. 9 und entsprechend zu einer Reduktion der jeweiligen einzelnen Anteile der Kombination führen. Die Kombination einzelner Betriebsweisen kommt zwar durchaus in der Realität vor, aber da bereits die Anteile der einzelnen Betriebsweisen nicht bekannt sind und angenommen werden müssen, würde eine Kombination zu noch mehr Annahmen führen und wurde daher nicht berücksichtigt.

Tabelle A. 10 Gegenüberstellung der EF-Resultate des „Best-Case“, Standardfalls und des „Worst-Case“ für 2020 und prozentuale Verbesserungen (Δ EF_{Best} - EF-2020) bzw. Verschlechterungen (Δ EF_{Worst} - EF-2020) im Vergleich zum Standardfall EF-2020.

Szenario	Einheit	NOx	CO	VOC	PM _{exh}
EF _{Best-2020}	[g/GJ]	84	1852	159	46
Δ EF _{Best} - EF-2020	[%]	-3%	-34%	-56%	-49%
EF-2020	[g/GJ]	86	2827	357	90
EF _{Worst-2020}	[g/GJ]	112	4325	684	197
Δ EF _{Worst} - EF-2020	[%]	30%	53%	91%	118%

A.4 EF-2020 – Zusatztabelle HES-Kategorie 4b

Tabelle A. 11 Vergleich der Resultate des EF-Modells für automatische Feuerungen >50 kW (HES-Kat. 12-17 und 19, siehe Kapitel 3.4.4) angewandt auf Pelletöfen (Kat. 4b) mit den EF aus verschiedenen Studien. Für die EF-Modellwerte wurde ein Betrachtungszeitraum von 4h, eine Verteilung zw. Voll- und Teilleistung von 50% und ein Anteil Stillstand von 20% angenommen. Die Anzahl der Starts und Stopps wurde variiert.

	NO _x	CO	VOC	PM _{exh}
	[g/GJ]			
EF - Standardfall, 2 Starts u. Stopps	75	508	5	39
EF - Standardfall, 1 Start u. Stopp	74	329	4	35
BeReal [12, 24, 45, 47]	86	399	24	30
Nordic Council - Nennlast [22]	-	189	5	-
Nordic Council - Teillast [22]	-	447	17	-
EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3]	80	300	-	32
UBA DE Volleleistung [49]	100	115	5	20
UBA DE Teilleistung [49]	-	420	20	-
UBA DE gewichtet (Voll-/Teilleistung = 58%/42%)	-	243	11	-

Tabelle A. 12 Literaturangaben zu verschiedenen Betriebsphasen der HES-Kategorie 4b (Pelletöfen).

Betriebsphasen	Anzahl Literaturangaben					Dauer* [h]	NO _x * [g/GJ]	CO* [g/GJ]	VOC* [g/GJ]	PM _{exh} * [g/GJ]
	Dauer	CO	PM _{exh}	NO _x	VOC					
Start	4	5	2	5	3	0.33	90	311	16	88
Nennlast		11	3	11	5		87	115	4.9	24
Teillast		6	2	7	3		96	259	3.5	54
Voll- und Teillast		9	2	7	5		95	323	2.0	42
Stopp	3	4	1	4	3	0.15	110	4695	4.6	31
Ganzer Zyklus		1	-	1	1		93	192	6.0	
BeReal		3	3	3	3		86	399	24	30

*Werte entsprechen dem Median, der aus den vorhandenen Literaturdaten gebildet wurde.

A.5 EF-Modell HES-Kategorien 12-17 und 19 – Zusatzinformationen

Inputparameter PM_{exh} für An- und Abfahren sowie Standby des EF-Modells:

Die PM_{exh}-Werte für die Betriebsphasen An- und Abfahren sowie Standby mussten für das EF-Modell der Kategorien 12-17 und 19 (siehe Kapitel 3.4.4) abgeschätzt werden. Um die relativ gute Datenbasis für PM_{exh} für Voll- und Teilleistung nutzen zu können, wurden die EF für An- und Abfahren sowie Standby über das Verhältnis von PM_{exh} dieser Phasen zur Betriebsphase Volleleistung berechnet. Zur Bestimmung dieses Verhältnisses wurden Literaturdaten herangezogen, jedoch wurde nur eine sehr geringe Anzahl an Studien gefunden (n = 3). Ein Grund dafür ist, dass die An- und Abfahrphasen nicht stationär und teilweise kurz sind, was eine gravimetrische Staubmessung schwierig macht. Ausserdem

werden in wissenschaftlichen Publikationen die Messungen fast ausschliesslich im Rohgas, also vor dem Elektroabscheider durchgeführt.

In Tabelle A. 13 sind die Verhältnisse von PM_{exh} -Emissionen der Betriebsphasen An- und Abfahren zu Volleistung der drei Literaturstudien ([15, 82, 83]) aufgeführt. In [15, 83] wurden insgesamt 4 Messungen bei Volleistung und 3 während dem Abfahren von 30 % Leistung auf Standby an einer 150 kW Vorschubrostfeuerung durchgeführt, die mit Waldhackschnitzeln betrieben wurde. In [82] wurden Daten aus den Kesselsteuerungen von 7 Anlagen über 2 Jahre (2012 und 2013) kontinuierlich erfasst und ausgewertet. Ausserdem wurden auf 2 Anlagen punktuell Staubmessungen während des An- und Abfahrens durchgeführt. Da auch in diesen Studien nicht alle Messungen nach dem Elektroabscheider durchgeführt worden waren, wurden alle Werte im Rohgas mit den Formeln (26) und (27) auf Werte nach dem Elektroabscheider umgerechnet.

$$EF \text{ Volleistung: } PM_{exh,nach ESP} = PM_{exh,vor ESP} \cdot (1 - 0.95) \quad (26)$$

$$EF \text{ Start \& Stop: } PM_{exh,nach ESP} = PM_{exh,vor ESP} \cdot (1 - 0.95) \cdot 0.65 + PM_{exh,vor ESP} \cdot (1 - 0.65) \quad (27)$$

Die 0.95 stehen für den Abscheidegrad des Elektroabscheiders von 95 % und wurden angenommen. In [15] wurde für verschiedene PM_1 -Staubkomponenten ein Abscheidegrad von 96 % bestimmt. Die 0.65 bezeichnen die durchschnittliche Verfügbarkeit des Elektroabscheiders von 65 % während des An- und Abfahrens, welche aus den Steuerungsdaten der 7 Anlagen in [82] bestimmt wurde.

Da nur 1 Messung für die Anfahrphase vorhanden ist und die Verhältnisse in Tabelle A. 13 eine grosse Streuung aufweisen, wurde nicht zwischen Start/Volleistung und Stopp/Volleistung unterschieden und der Median über alle Daten gebildet. Um die Unsicherheit bzw. den Einfluss dieses Verhältnisses auf die Resultate im EF-Modell (Formel (4) in Kapitel 3.4.4) abzuschätzen, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse sind in Kapitel 4.3.4 beschrieben.

Tabelle A. 13 Übersicht über Verhältnisse von PM_{exh} -Emissionen bei Start und Stopp zum Betrieb mit Volleistung von 3 Studien.

Betriebsphase	Verhältnis PM_{exh}^*	Quelle
Stopp / Volleistung	11	[15, 83]
Start / Volleistung	14.9	[82]
Stopp / Volleistung	5	[82]
Stopp / Volleistung	3.7	[82]
Stopp / Volleistung	1.7	[82]
Median	5.0	
Mittelwert	7.3	

*Das Verhältnis zwischen Start- bzw. Stoppphasen und dem Betrieb bei Volleistung wurde mit Emissionsdaten durchgeführt, die auf den massgebenden Bezugssauerstoffgehalt normiert waren.

Tabelle A. 14 Annahmen und Inputparameter zur Berechnung der Anteile der verschiedenen Betriebsphasen t_i für das EF-Modell der HES-Kategorien 12-17 und 19 für CO, NO_x und PM_{exh.} (siehe Kapitel 3.4.4). Rote Zahlen sind Inputparameter, die für das Modell eingegeben werden müssen und blaue Zahlen sind berechnete Werte.

Kategorie	12a, 14a	13, 15	12b, 14b	16a	16b	17	19
Anfahren - Dauer [h]*	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Abfahren - Dauer [h]*	1.6	1.6	1.0	1.7	1.0	1.7	1.7
Betrachtungszeitraum [h]	24	24	24	24	24	24	24
Standardfall							
Anzahl Starts & Abfahren	4	4	4	2	2	2	1
Anteil Standby [%]	20%	20%	20%	20%	20%	20%	10%
Anteil Betrieb mit Volleistung [%]	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Anteil Stillstand [%]	20%	20%	20%	5%	5%	5%	0%
Anteil Start [%]	6.7%	6.7%	6.7%	3.5%	3.3%	3.5%	1.8%
Anteil Abfahren [%]	26.7%	26.7%	16.7%	14.2%	8.3%	14.2%	7.1%
Anteil Volleistung [%]	13.3%	13.3%	18.3%	28.7%	31.7%	28.7%	40.6%
Anteil Teilleistung [%]	13.3%	13.3%	18.3%	28.7%	31.7%	28.7%	40.6%
Best Case							
Anzahl Starts & Abfahren	0	0	0	0	0	0	0
Anteil Standby [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Anteil Betrieb mit Volleistung [%]	80%	80%	80%	80%	80%	80%	100%
Anteil Stillstand [%]	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Anteil Start [%]	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Anteil Abfahren [%]	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Anteil Volleistung [%]	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%	80.0%	100.0%
Anteil Teilleistung [%]	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	20.0%	0.0%
Worst Case							
Anzahl Starts & Abfahren	9	9	10	7	7	7	3
Anteil Standby [%]	10%	10%	10%	10%	10%	10%	20%
Anteil Betrieb mit Volleistung [%]	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Anteil Stillstand [%]	10%	10%	10%	10%	10%	10%	0%
Anteil Start [%]	15.0%	15.0%	16.7%	12.3%	11.7%	12.3%	5.3%
Anteil Abfahren [%]	60.0%	60.0%	41.7%	49.6%	29.2%	49.6%	21.3%
Anteil Volleistung [%]	1.0%	1.0%	4.3%	3.6%	7.8%	3.6%	10.7%
Anteil Teilleistung [%]	4.0%	4.0%	17.3%	14.5%	31.3%	14.5%	42.8%

* Daten aus der Datenauswertung der Langzeitmessungen (siehe Kapitel 3.2.3)

Tabelle A. 15 Mittelwerte der prozentualen Feuerungswärmeleistungen ($Q_{F,i}$) während den verschiedenen Betriebsphasen, bestimmt aus den Daten der Langzeitmessungen von Anlagen der HES-Kategorien 16a, 17 und 19 (siehe Kapitel 3.2.3)

Betriebsphase i	$Q_{F,i}$ [%]
Anfahren	30.3%
Abfahren	8.9%
Teilleistung	40.8%
Volleistung	82.0%
Gb*-Unterhalt	18.7%
Standby	6.8%
Mean Gb*-Unterhalt & Standby	12.7%
Stillstand	0.0%

*Gb ... Glutbett

Tabelle A. 16 Berechnung der EF-2020 der Kategorien 12a-15 (automatische Feuerungen a.HVB/i.HVB. und Pelletfeuerungen 50-500 kW) mit dem EF-Modell (siehe Kapitel 3.4.4) basierend auf den Annahmen aus

Tabelle A. 14 und Tabelle A. 15. Die blauen Werte wurden anhand der roten Werte und den EF für Volleleistung berechnet.

Betriebsphase	Kat. 12a, 14a			Kat. 12b, 14b			Kat. 13, 15		
	CO	PM [g/GJ]	NO _x	CO	PM [g/GJ]	NO _x	CO	PM [g/GJ]	NO _x
EF - Anfahren	740	175	225	626	90	104	740	182	225
EF - Abfahren	1913	175	110	787	90	85	1913	182	110
EF - Volleleistung	171	35	128	55	18	90	181	36	161
EF - Teilleistung	236	28	118	130	22	39	234	27	126
EF - Standby	557	35	73	207	18	76	557	36	73
FaktorAnfahren/Volleistung		5.0			5.0			5.0	
FaktorAbfahren/Volleistung		5.0			5.0			5.0	
FaktorStandby/Volleistung		1.0			1.0			1.0	
EF - Standardfall	454	60	126	167	28	76	458	62	144
EF - Best Case	179	34	127	64	18	84	187	35	158
EF - Worst Case	1087	136	147	361	50	74	1087	141	150

Tabelle A. 17 Berechnung der EF-2020 der Kategorien 16a-17 und 19 (automatische Feuerungen a.HVB/i.HVB. und Pelletfeuerungen >500 kW und Anlagen für erneuerbare Abfälle) mit dem EF-Modell (siehe Kapitel siehe Kapitel 3.4.4) basierend auf den Annahmen aus Tabelle A. 14 und Tabelle A. 15. Die blauen Werte wurden anhand der roten Werte und den EF für Volleleistung berechnet.

Betriebsphase	Kat. 16a			Kat. 16b			Kat. 17			Kat. 19		
	CO	PM [g/GJ]	NO _x	CO	PM [g/GJ]	NO _x	CO	PM [g/GJ]	NO _x	CO	PM [g/GJ]	NO _x
EF - Anfahren	685	50.0	182	626	16.2	104	685	63.1	182	685	5.3	182
EF - Abfahren	1209	50.0	139	787	16.2	85	1209	63.1	139	1209	5.3	139
EF - Volleleistung	45	10.0	125	6.3	3.2	90	50	12.6	127	15	1.1	143
EF - Teilleistung	64	2.8	104	12.0	3.2	39	72	14.6	105	26	1.8	117
EF - Standby	664	10.0	101	207	3.2	76	664	12.6	101	664	1.1	101
FaktorAnfahren/Volleistung		5.0			5.0			5.0			5.0	
FaktorAbfahren/Volleistung		5.0			5.0			5.0			5.0	
FaktorStandby/Volleistung		1.0			1.0			1.0			1.0	
EF - Standardfall	144	10	119	48	3.8	74	149	16	121	55	1.4	134
EF - Best Case	47	9	122	7	3.2	84	53	13	124	15	1.1	143
EF - Worst Case	504	25	132	177	6.2	66	508	36	132	175	1.9	127

Validierung der Annahmen für die Inputparameter im EF-Modell anhand von QM-Projekten

Um die Annahmen zur Anzahl der An- und Abfahrvorgänge, des Anteils an Standby sowie der Verteilung zwischen dem Betrieb mit Voll- und Teilleistung zu überprüfen, wurden Daten von 30 Holzfeuerungsanlagen ausgewertet, die durch QM Holzheizwerke [76] begleitet und beurteilt wurden. (siehe Tabelle A. 18.).

Diese Auswertung bestätigt im Mittel die Annahmen für den Standardfall zum Anteil an Standby und zur Verteilung zwischen dem Betrieb mit Voll- und Teilleistung. Im Vergleich zur Auswertung der Betriebsdaten der QM-Projekte wurde im EF-Modell jedoch eine grössere Anzahl an An- und Abfahrvorgängen aus folgenden Gründen gewählt:

- Nicht alle Anlagen durchlaufen eine Begleitung durch QM Holzheizwerke
- Nicht bei allen QM-Projekten wird eine Betriebsoptimierung durchgeführt
- Reinigungszyklen sind zwar kurz, weisen jedoch oftmals ähnliche EF auf wie Start/Stop. Vor allem kleine Seriengeräte können sehr viele Reinigungszyklen aufweisen.

Tabelle A. 18 Übersicht zu wichtigen Betriebsdaten der ausgewählten QM-Projekte. Die Daten konnten teilweise aus der Datenbank von QM Holzheizwerke entnommen werden.

HES Kategorie	Anzahl	Anzahl Starts & Abfahren			Standby [h]*			Anteil Volllleistung im Regelbetrieb		
		min	mittel	max	min	mittel	max	min	mittel	max
12a, 14a & 13,15	9	1	2	3	3	4	15	12%	40%	65%
12b, 14b	9	1	3	4	5	10	15	35%	56%	77%
16a, 17	10	0	1	4	0	1	9	11%	45%	75%
18, 19	2	0	0	0	0	0	0	0%	50%	100%

*Für Kategorie 12b, 14b wurde der Stillstand der Feuerung mit Standby gleichgesetzt

A.6 Literaturdaten zum Faktor α für die Berechnung von CH₄ und NMVOC aus VOC

Tabelle A. 19 Literaturdaten zum Faktor α , der das Verhältnis von CH₄ zu VOC beschreibt. Daten mit grauer kursiver Schrift wurden bereits für die Studie 2014 [1] verwendet.

Literatur	Kat. HES	Betriebsphase / Technologie	α
[15]	4b	Nennleistung	0.21
[13]	4b	Nennleistung	0.50
[52]	4b	Voll- und Teilleistung	0.36
[48]	4b	Nennlast	0.50
[22]	4b	Nennlast	0.20
[15]	2,3,4a,5	Modern	0.36
[15]	2,3,4a,5	Konventionell	0.26
[31]	2,3,4a,5	Modern	0.24
[31]	2,3,4a,5	Konventionell	0.32
[26]	2,3,4a,5	Modern	0.29
[35]	2,3,4a,5	Modern	0.39
[35]	2,3,4a,5	Konventionell	0.59
[22]	2,3,4a,5	Modern	0.54
[22]	2,3,4a,5	Alte Öfen	0.27
[22]	2,3,4a,5	Kachelöfen	0.39
[22]	2,3,4a,5	Konventionell	0.34
[84]	2,3,4a,5	Modern	0.23
[22]	11b	Volleistung	0.12
[22]	11b	Teilleistung	0.10
[61]	11a	Effizient	0.08
[61]	11a	Mittlere Leistung	0.61
[61]	11a	Ausbrand	0.42
[22]	11a	Volleistung	0.09
[22]	11a	Teilleistung	0.09
[15]	8,9	Volllast	0.13
[15]	8,9	ganzer Abbrand	0.28
[22]	8,9	Traditionelle/alte Kessel, ganzer Abbrand ohne Ausbrand	0.14
[22]	8,9	Neue/moderne Kessel, ganzer Abbrand ohne Ausbrand	0.15
[15]	11b, 12a, 5	Median alle Werte von verschied. Phasen	0.30
[85]	-		0.50
[86]	2,3,4a,5		0.38
[87]	4b		0.32
[88]	2,3,4a,5		0.17
[88]	4b		0.26
[35]	2,3,4a,5, 8,9		0.47
[77]	8,9		0.30
[89]	8,9		0.41
[90]	2,3,4a,5		0.33
[91]	4b	<i>schlechte Verbrennung</i>	0.26
[91]	4b	<i>gute Verbrennung</i>	0.15
Literatur für EF-Modell 2020		Mittelwert	0.29
<i>Literatur für EF-Modell 2014[#]</i>		<i>Mittelwert</i>	<i>0.32</i>
alle Datensätze		Mittelwert	0.30
alle Datensätze		Median	0.29
alle Datensätze		Standardabweichung	0.14

[#]Im EF-Modell 2014 [1] wurde ein für alle Kategorien konstantes $\alpha = 0.40$ angewendet, obwohl der Mittelwert aus den aufgeführten Literaturwerten ebenfalls $\alpha \sim 0.3$ ergibt

A.7 EF-2020 – Zusatztabelle zu PM-Fraktionen

Tabelle A. 20 Literaturdaten und Herleitung der Anteile verschiedener PM-Fraktionen an PM_{exh} .

Literatur	Beschreibung	PM_1 / PM_{grav} [%]	$PM_{2.5} / PM_{grav}$ [%]	PM_{10} / PM_{grav} [%]	
[49] (UBA Berlin)	Haushalte	Pellet Öfen	93	95	99
		Heizkessel - Stückholz	71	79	92
		Heizkessel - Schnitzel	84	87	94
		Heizkessel - Pellets	80	84	97
	Grössere Anlagen	handbeschickt	71	79	92
		naturbelassenes Holz	automatisch	77	88
	Grössere Anlagen	handbeschickt	71	79	92
		Holzwerkstoffe	automatisch	64	70
		Mittelwert	76	83	94
		Standardabweichung	9	8	4
	Median	74	82	93	
[92]	Pellet Kessel	82	100	100	
[29]	Ofen, konventionell	-	82	86	
[3]	EMEP/EEA – 2019 Tabelle 3.49 für PM_{exh}	Mittelwert	-	87	91
		Median	-	92	94
[1]	Mittelwert über alle Daten [%]		77	87	93
	Zahlen in EF-Modell 2014 [%]		-	80	90
	Vorschlag für EF-Modell 2020 [%]		-	90	95
[3]	EMEP/EEA – 2019	PM_1/TSP [%]	$PM_{2.5}/TSP$ [%]	PM_{10}/TSP [%]	
		-	93	95	

Unsicherheiten bei der Berechnung von PM_{cond} aus NMVOC ($PM_{cond} = NMVOC \cdot \epsilon$), wie sie in der letzten Erhebung 2014 [1] durchgeführt wurde

- Es wird von einer Korrelation der NMVOC, die zu PM_{cond} beitragen, und den, die vom FID (Flammenionisationsdetektor) erfasst werden, ausgegangen. Diese Korrelation entspricht jedoch nicht unbedingt einem wahren Kausalzusammenhang.
- NMVOC, die zu PM_{cond} beitragen sind hauptsächlich SVOC (semi-volatile organic compounds, [93]). Diese werden jedoch mit der FID-Messung, die in den Standard-Emissionsmessungen zur NMVOC-Messung angewendet wird, nicht bzw. nur schlecht erfasst. Die Detektorempfindlichkeit des FID ist in etwa proportional zur Anzahl Kohlenstoffatome in einer Verbindung. Dies gilt exakt aber nur für reine Kohlenwasserstoffe (Hydrocarbons, C_xH_y -Verbindungen). Einige stark sauerstoffhaltige Verbindungen und Moleküle mit funktionellen Gruppen oder andere heteroatomhaltige Spezies (z.B. Alkohole, Ether, Ketone, Carbonsäuren, FCKW) werden nicht oder nur schlecht detektiert (siehe auch BAFU-Messempfehlung [73]).
- Zudem zeigt eine neue Studie des Labors für Atmosphärenchemie des Paul Scherrer Instituts, dass der Anteil an SVOC, die zu PM_{cond} beitragen, an den gesamten VOC nur rund 5% ausmachen [94] und somit die Bestimmung von PM_{cond} über NMVOC noch unsicherer ist.
- Ausserdem zeigte der EMEP Experten-Workshop zu kondensierbaren organischen Verbindungen vom März 2020 weitere Unklarheiten, Probleme und Wissenslücken [95]:
 - SVOC bzw. condensable organic compounds COC sind nicht klar bzw. einheitlich definiert.
 - Es gibt keine einheitliche Vorgehensweise, wie COC bzw. SVOC und PM_{cond} bestimmt werden bzw. Anweisungen und Standards, wie das gemacht werden sollte.
 - In manchen Studien werden organische Bestandteile im Detail analysiert und in anderen Vergleichsmessungen im verdünnten und unverdünnten heissen Abgas durchgeführt.

- Aus all den genannten Gründen wird für die EF-2020 PM_{cond} über TSP und TSP über das Verhältnis TSP/PM_{exh} berechnet, welches anhand von Literaturwerten festgelegt wird.

Tabelle A. 21 Gegenüberstellung von Daten und verschiedenen Varianten aus der Literatur zur Abschätzung des kondensierenden Staubanteils. Die Werte in der Spalte ganz rechts (TSP/PM_{exh}) wurden verwendet, um die EF für TSP aus PM_{exh} zu berechnen (siehe Kapitel 4.1.2)

HES-Kat.	Bezeichnung	Literatur							EMEP 2019	EF-2014	Varianten EF-Modell 2020		
		TSP / PM _{exh}	TSP / PM _{exh}	(PM _{exh} + COC) / PM _{exh}	TSP / PM _{exh}	TSP / PM _{exh}	TSP / PM _{exh}	(PM _{exh} + COC) / PM _{exh}	TSP / PM _{exh}	(PM _{exh} + PM _{cond}) / PM _{exh}	PM _{exh} + PM _{cond} / PM _{exh}	TSP / PM _{exh}	
	Verdünnung	Dilution tunnel	Dilution tunnel	Wasch-flaschen ^s	Dilution tunnel	Ejector Dilution 1:10	Ejector Dilution 1:10	Wasch-flaschen ^s	versch. Verdünnungssysteme	##	##	###	
	Literaturangabe	[96]	[97]	[93]	[41]	[36]	[83]	[3]	[1]	-	-	-	
1	Offene Cheminées				3.5						1.9	2.2	2.0
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe EMEP, conventional wood stoves EMEP, energy efficient wood stoves EMEP, Advanced/ecolabelled stoves and boilers	7.15	3.2	2.9	5.3		1.5	3.9	4 2.4 1.9		1.8	2.2	2.1
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets EMEP, pellet stoves and boilers					2.3 1.4		2.0	1.9		1.2	1.2	1.2
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)										1.6	1.8	1.7
8,9	Stückholzkessel single house boiler automatic single house boiler manual				2.0 5.6						1.8	1.6	1.5
10	Doppel-/Wechselbrandkessel										1.6	1.8	
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW						1.8				1.1	1.2	1.7
11b	Pelletkessel <50 kW							1.6			1.0	1.2	1.2
12a, 14a	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW a. HVB				1.1*			1.0	1.1#		1.1	1.2	1.2
12b, 14b	Pelletkessel 50–500 kW				1.1*				1.1#		1.0	1.1	
13, 15	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW i. HVB				1.1*				1.1#		1.1	1.2	1.0
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB				1.1*				1.1#		1.0	1.4	1.0
16b	Pelletkessel >500 kW				1.1*				1.1#		1.0	1.2	1.0
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB				1.1*				1.1#		1.0	1.2	
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen				1.1*				1.1#		1.1	1.5	1.1
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)				1.1*				1.1#		1.1	1.5	1.0

*Kategorie für «medium boiler automatic» und «manual» wird den HES Kat. 12-19 gleichgesetzt.

**Verhältnis TSP / PM_{exh} aus EMEP Guidebook – 2019 [3]: Tabellen 3.49 Seite 92 für PM_{exh} und aus Tabellen 3.39-3.48 Seite 79-91 für TSP

#Im EMEP Guidebook – 2019 [3] gibt es einen Wert für Kat. Medium sized boilers < 1MW jeweils automatic und manual, der hier den HES Kat. 12-19 gleichgesetzt wird.

##PM_{cond} = ε NMVOC, mit ε = 0.5 konstant für alle Kategorien.

###PM_{cond} = ε NMVOC, mit ε = 0.45 für Kat.1-11 und ε = 0.1 für Kat.12-19

^sUS EPA 5H Sampling Methode [98]. Beheizter Filter, 3 Waschflaschen (gekühlt auf 5°C) und Filter danach (unbeheizt). COC bezeichnet Masse in Waschflaschen und Filter nach Flaschen

A.8 EF-2020 – Schwermetalle

Tabelle A. 22 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für Pb in [mg/GJ] zur Herleitung der Pb-EF-2020 und deren Unsicherheiten.

HES-Kat.	Literatur für EF-Modell 2014			EF-2014**	EMEP 2019*			Literatur für EF Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Messberichte Kantone			Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert#	Bereich	Wert	σ_s [%]*
Kat. 1	2	1.9	-																
Kat. 2, 3, 4a, 5	9	10.9***	0 - 124					3	6.5	0.9 - 9.8	[17, 20, 43]								
Kat. 4b	-							4	9.2	1.8 - 15.5	[43, 51, 52]								
Kat. 6,7	-							-											
Kat. 8, 9	-							-											
Kat. 10	-							-											
Kat. 11a	-			40				1	15.2	5.7 - 32	[61]								
Kat. 11b	2	4.0	0.9 - 8					2	2.6	1.2 - 3.9	[17, 20]								
Kat. 12a	-							-											
Kat. 12b	-				4	27	0.5 - 118	-				1	11.2	10.1-12.2					
Kat. 13	-							-				1	14.0						
Kat. 14a	-							-				-							
Kat. 14b	-							-				-							
Kat. 15	-							-				-							
Kat. 16a	-							-				1	1.1	-					
Kat. 16b	-							-				-							
Kat. 17	-			22				-				-							
Kat. 18	-							-				10	11.6	0.3-84					
Kat. 19	-			700##				-				3	3.9	0.9-9.9	34	63	0.9-1359	100	
Altholz (Kat. 18-19)												13	1.7	0.3-84					

*Gleich für alle Kategorien im EMEP Guidebook – 2019 [3] (conventional stoves, high efficiency stoves, advanced/ecolabelled stoves & boilers, pellet stoves & boilers, < 1 MW automatic boilers, > 1 MW automatic boilers. Die Daten stammen von gravimetrischen Messungen auf Filtern, die nach Verdünnung (entweder Ejector Dilution oder Verdünnungstunnel) gemessen wurden aus Studien aus Schweden, Finnland und Deutschland zw. 2002 und 2011.

**Vorschlag der sich zwischen den Daten des EMEP/EEA-Guidebook – 2013 [79] und den eigenen Abschätzungen bewegen. Eigene Abschätzungen: Aus gemessenen und typischen Schwermetallgehalten im Brennstoff wurde der Gehalt im Abgas anhand von Transferfaktoren abgeschätzt [99].

***Inklusive der 4 Studien ([100], [101], [88], [102]), die auch im EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] angeführt sind

#Pb & Zn zusammen = 0.7 mg/MJ, min=0.01, max=15.1, Verhältnis Pb zu (Pb+Zn) = 9% (von 13 Anlagen der Kat. 19 und 18 aus Messberichten der Kantone und vom BAFU für diese Studie beauftragte Messungen)

##Annahme einer typischen Altholzzusammensetzung im Abgas vor Feinstaubabscheider und Annahme, dass zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte eine Feinstaubabscheidung eingesetzt wird mit der die Grenzwerteinhaltung sichergestellt wird, was eine mindestens 95%-ige Abscheidung voraussetzt

*Standardabweichung für Kat. 1-17 entspricht dem Maximalwert aus EMEP Rating D (siehe Tabelle 6), da einige Kategorien zusammengefasst sind und es nur wenig Daten (Literatur und/oder Messungen im Auftrag des BAFU) gibt. Für Kat. 18 und 19 wird eine tiefere Standardabweichung mit dem Maximalwert aus dem EMEP Rating C gewählt, da entweder eine überwiegende Anzahl an existierenden Anlagen (Kat.18) oder eine grössere Anzahl an Daten (Kat. 19) vorliegt. Die Bandbreite der Werte ist jedoch relative gross, wodurch keine kleinere Standardabweichung gewählt wurde.

Tabelle A. 23 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für Zn in [mg/GJ] zur Herleitung des Zn-EF-2020 und dessen Unsicherheit.

HES-Kat.	Literatur für EF-Modell 2014			EF-2014**	EMEP 2019*			Literatur für EF-Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Messberichte Kantone			Vorschlag EF-Modell 2020				
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert#	Bereich	Wert	σ_s [%]*			
Kat. 1	1	42	28 - 44	500			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	300					
Kat. 2, 3, 4a, 5***	10	109***	7 - 1300				6	127	0.4 - 280	[17, 19, 20, 43]	-	-	-	-	-	-			-	-	-	
Kat. 4b	1	56	56 - 92				3	2.5	1.6 - 82	[19, 43, 52]	-	-	-	-	-	-			-	-	-	
Kat. 6,7	-	-	-				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	-	
Kat. 8, 9	1	74	31 - 170				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	-	
Kat. 10	1	210	24 - 210				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	-	
Kat. 11a	1	210	210 - 240				-	-	-	-	1	583	550 - 600	[61]	-	-			-	-	-	
Kat. 11b	3	84	12 - 180				-	-	-	-	3	150	132 - 181	[17, 20, 64]	-	-			-	-	-	
Kat. 12a	-	-	-				-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			-	-	-	-
Kat. 12b	-	-	-				-	4	512	80-1300	-	-	-	-	1	217			193 - 241	-	-	225
Kat. 13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	260	-	-	-	-					
Kat. 14a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Kat. 14b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Kat. 15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Kat. 16a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	9.5	-	-	-	150					
Kat. 16b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Kat. 17	-	-	-	260##	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-					
Kat. 18	1	2.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	30	4 - 158	-	-	-					
Kat. 19	-	-	-	1000###	-	-	-	-	-	-	-	3	12	8 - 19	34	637	9 - 13741	1200				
Altholz (Kat. 18-19)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13	15	4 - 158	-	-	-	200 %				

*Gleich für alle Kategorien im EMEP Guidebook – 2019 [3] (conventional stoves, high efficiency stoves, advanced/ecolabelled stoves & boilers, pellet stoves & boilers, < 1 MW automatic boilers, > 1 MW automatic boilers. Die Daten stammen von gravimetrischen Messungen auf Filtern, die nach Verdünnung (entweder Ejector Dilution oder Verdünnungstunnel) gemessen wurden aus Studien aus Schweden, Finnland und Deutschland zw. 2002 und 2011.

**Ausser zu Kat. 19 steht im Bericht zum EF-Modell 2014 [1] nichts über die Annahmen zu Zn

***Inklusive der 4 Studien ([100], [101], [88], [102]), die auch im EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] angeführt sind

#Pb & Zn zusammen = 0.7 mg/MJ, min = 0.01 und max 15.1, Verhältnis Pb zu (Pb+Zn) = 9% (von 13 Anlagen der Kat. 19 und 18 aus Messberichten der Kantone und vom BAFU für diese Studie beauftragte Messungen)

##Annahme (für Schwermetalle generell) für Anlagen > 500kW: Abgeleitet aus Werten von EMEP mit der Annahme, dass Zn in ähnlichem Mass wie bei Altholz abgeschieden

###Annahme einer typischen Altholzzusammensetzung im Abgas vor Feinstaubabscheider und Annahme, dass zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte eine Feinstaubabscheidung eingesetzt wird mit der die Grenzwerteinhaltung sichergestellt wird, was eine mindestens 50%-ige Abscheidung voraussetzt

*Standardabweichung für Kat. 1-17 entspricht Maximalwert aus EMEP Rating D (siehe Tabelle 6), da einige Kategorien zusammengefasst sind und es nur wenig Daten (Literatur und/oder Messungen im Auftrag des BAFU) gibt. Für Kat. 18 und 19: wird eine tiefere Standardabweichung mit Maximalwert aus EMEP Rating C gewählt, da entweder eine überwiegende Anzahl an existierenden Anlagen (Kat. 18) oder eine grössere Anzahl an Daten (Kat. 19) vorliegt. Die Bandbreite der Werte ist jedoch relative gross, wodurch keine kleinere Standardabweichung gewählt wurde.

Tabelle A. 24 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für Cd in [mg/GJ] zur Herleitung des Cd-EF-2020 und dessen Unsicherheit.

HES-Kat.	Literatur für EF-Modell 2014			EF-2014**	EMEP 2019*			Literatur für EF-Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Wert	Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Wert	Bereich	Wert
Kat.1	1	0.8	0.6 - 1.1					-								
Kat. 2, 3, 4a, 5	4	2.2***	0 - 87					2	0.7	0 - 1.8	[17, 43]					
Kat. 4b	-							4	0.7	0 - 1.8	[43, 51, 52]					
Kat. 6,7	-							-								
Kat. 8, 9	-							-								
Kat. 10	-							-								
Kat. 11a	-			6				1	1.6	1.3 - 1.8						
Kat. 11b	1	0.2	-					-								
Kat. 12a	-							-				-				
Kat. 12b	-					3	13	0.5-87	-			1	0.3	-	1	200 %
Kat. 13	-								-			1	0.3	-		
Kat. 14a	-								-			-				
Kat. 14b	-								-			-				
Kat. 15	-								-			-				
Kat. 16a	-								-			1	0.3	-		
Kat. 16b	-								-			-				
Kat. 17	-			5#					-			-				
Kat. 18	1	0.3	-						-			10	0.3	0.13 - 13		
Kat. 19	-								-			3	0.3	0.2 - 0.3	2	300 %
Altholz (Kat. 18 & 19)				30###								13	0.3	0.15 - 0.3		

*Gleich für alle Kategorien im EMEP Guidebook – 2019 [3] (conventional stoves, high efficiency stoves, advanced/ecolabelled stoves & boilers, pellet stoves & boilers, < 1 MW automatic boilers, > 1 MW automatic boilers. Die Daten stammen von gravimetrischen Messungen auf Filtern, die nach Verdünnung (entweder Ejector Dilution oder Verdünnungstunnel) gemessen wurden aus Studien aus Schweden, Finnland und Deutschland zw. 2002 und 2011.

**Ausser zu Kat. 19 steht im Bericht zum EF-Modell 2014 [1] nichts über die Annahmen zu Cd.

***Inklusive der 4 Studien ([100], [101], [88], [102]), die auch im EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] angeführt sind.

#Annahme (für Schwermetalle generell) für Anlagen > 500kW: Abgeleitet aus Werten von EMEP mit der Annahme, dass die Schwermetalle in ähnlichem Mass wie bei Altholz abgeschieden werden allerdings erst etwa die Hälfte der Anlagen mit Feinstaubabscheidern ausgerüstet sind. Elektroabscheideeffizienz von Cd ist mit 50% angenommen.

###basierend auf der Annahme einer typischen Altholzzusammensetzung im Abgas vor Feinstaubabscheider und der Annahme, dass zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte eine Feinstaubabscheidung eingesetzt wird, und Annahme von 50%-iger Abscheidung im Elektroabscheider.

*Standardabweichung für Kat.1-17 entspricht dem Mittelwert aus dem EMEP Rating D (siehe Tabelle 6). Es wurden zwar viele Kategorien zusammengefasst und es sind nur wenig Daten (Literatur und Messungen im Auftrag des BAFU) verfügbar, die Bandbreite der Daten ist jedoch gering. Auch für Kat. 18 wird der Mittelwert des EMEP Rating D gewählt und kein tieferer Wert, da zwar Daten von einer überwiegenden Anzahl an existierenden Anlagen vorliegt, deren Bandbreite jedoch grösser ist. Für Kat. 19 wird als Standardabweichung der Maximalwert des EMEP Rating D gewählt, da nur wenige Daten vorliegen und der Wert abgeschätzt wurde.

Tabelle A. 25 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für Hg in [mg/GJ] zur Herleitung des Hg-EF-2020 und dessen Unsicherheit.

HES-Kat.	Literatur für EF-Modell 2014			EF-2014** Wert	EMEP 2019*			Literatur 2020				Messungen im Auftrag des BAFU			Vorschlag EF-Modell 2020					
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Wert	Bereich	Wert	σ_s [%] [†]				
Kat. 1	-			0.6	1	0.6	0.2 - 1	-			[38]				2.0	300 %				
Kat. 2, 3, 4a, 5	2	45***	14 - 235					1	1.70											
Kat. 4b	-																			
Kat. 6,7	-																			
Kat. 8, 9	-																			
Kat. 10	-																			
Kat. 11a	-																			
Kat. 11b	-																			
Kat. 12a	-																			
Kat. 12b	-												1	2.5			1 - 4.1			
Kat. 13	-												1	4.3			-			
Kat. 14a	-							-												
Kat. 14b	-							-												
Kat. 15	-							-												
Kat. 16a	-							1	0.7	-										
Kat. 16b	-			0.6#				-												
Kat. 17	-								-											
Kat. 18	1	0.4	-					10	3.8	0.1 - 20										
Kat. 19	-			10###				3	1.4	0.8 - 2.2										
Altholz (Kat. 18 & 19)									13	1.2	0.1 - 20									

*Gleich für alle Kategorien im EMEP Guidebook – 2019 [3] (conventional stoves, high efficiency stoves, advanced/ecolabelled stoves & boilers, pellet stoves & boilers, < 1 MW automatic boilers, > 1 MW automatic boilers. Die Daten stammen von gravimetrischen Messungen auf Filtern, die nach Verdünnung (entweder Ejector Dilution oder Verdünnungstunnel) gemessen wurden aus Studien aus Schweden, Finnland und Deutschland zw. 2002 und 2011.

**Ausser zu Kat. 19 steht im Bericht zum EF-Modell 2014 [1] nichts über die Annahmen zu Hg

***Inklusive der 4 Studien ([100], [101], [88], [102]), die auch im EMEP/EEA Guidebook – 2019 [3] angeführt sind

#Annahme (für Schwermetalle generell) für Anlagen > 500kW: Abgeleitet aus Werten von EMEP mit der Annahme, dass die Schwermetalle in ähnlichem Mass wie bei Altholz abgeschieden werden allerdings erst etwa die Hälfte der Anlagen mit Feinstaubabscheidern ausgerüstet sind. Elektroabscheideeffizienz von Hg wird aufgrund der hohen Flüchtigkeit mit 0% angenommen

###basierend auf der Annahme einer typischen Altholzzusammensetzung im Abgas vor Feinstaubabscheider und der Annahme, dass zur Einhaltung der Emissionsgrenzwerte eine Feinstaubabscheidung eingesetzt wird, und Annahme von 0%-iger Abscheidung im Elektroabscheider

*Für Kat.1-11 wird der Maximalwert des EMEP Rating D (siehe Tabelle 6) als Standardabweichung gewählt, da viele Kategorien zusammengefasst wurden, es nur wenig Daten (Literatur) gibt und die Bandbreite gross ist. Für Kat. 12-17 wird der Mittelwert des EMEP Rating D gewählt. Es wurden zwar einige Kat. zusammengefasst, aber es gibt eine beschränkte Anzahl an Daten (diese von Messungen im Auftrag des BAFU von Schweizer Anlagen) und die Bandbreite dieser Daten ist gering. Für Kat. 18 wird ein tieferer Wert als Standardabweichung gewählt (Maximalwert des EMEP Rating C), aber nicht noch tiefer, da zwar Daten von einer überwiegenden Anzahl an existierenden Anlagen vorliegt, deren Bandbreite jedoch grösser ist.

A.9 EF-2020 – PAK

Tabelle A. 26 Zusammenstellung von B(a)P-Werten in [mg/GJ] aus verschiedenen Quellen zur Herleitung der EF für 2020 und deren Unsicherheiten. Für B(b)F wurden dieselben EF für 2020 angewendet.

HES-Kat.	Literatur für EF-Modell 2014			EF-2014 Wert	EMEP 2019*			Literatur für EF-Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Wert	Bereich	Wert	σ_s [%]**
Kat.1	2	19	3.4 - 43	50 [#]	8	121	12 - 1210	-								300
Kat. 2, 3, 4a, 5*** <i>Conventional wood stoves</i> <i>Energy efficient wood stoves</i> <i>Advanced/ecolabelled stoves and boilers</i>	11	21	2 - 2400	50 [#]	8 ⁺⁺	121	12 - 1210	11	43	0.9 - 198	[13, 14, 17, 24, 36, 37, 39-41, 43, 44]					50
Kat. 4b <i>Pellet stoves and boilers</i>	4	1	0 - 17	5 [#]	2 ^{##}	10	5 - 20	7	6.3	0 - 130	[13, 24, 43, 44, 51, 56]					10
Kat. 6,7	-			100				-								50
Kat. 8, 9 <i>conventional boilers < 50 kW</i> <i>Advanced/ecolabelled stoves and boilers</i>	3	2	0.12 - 49	25 [§]	8 ⁺⁺	121	12 - 1210	2	51	4 - 98	[41, 59]					30
Kat. 10	-			100	2 ^{##}	10	5 - 20									100
Kat. 11a	1	0.15	0.15 - 1.9	5 ^{§§}				2	27	18 - 36	[36, 61]					10
Kat. 11b <i>Pellet stoves and boilers</i>	3	0.03	0.03 - 0.43	2 ^{§§}	2 ^{##}	10	5 - 20	4	0.2	0.002 - 0.4	[13, 41, 64, 65]					10
Kat. 12a	-			3 ^{§§}				3	0.1	0.002 - 3.6	[41, 64]					5
Kat. 12b	-			2 ^{§§}				1	0.3	0.07 - 1.3	[41]					300
Kat. 13	-			3 ^{§§}				-								
Kat. 14a	-			3 ^{§§}				-								
Kat. 14b	-			2 ^{§§}				-								
Kat. 15	-			3 ^{§§}				-								
<i>Wood combustion <1MW – Boilers</i>	-			3 ^{§§}	2 ^{##}	10	5 - 20	-								1
Kat. 16a	1	0.01	-	2 ^{§§}				-				1	0.020	-		
Kat. 16b	-			2 ^{§§}				-								
Kat. 17 <i>Wood combustion >1MW – Boilers</i>	-			2 ^{§§}	2 ^{##}	10	5 - 20	-								
Kat. 18	-			1 ^{§§}				-								0.1
Kat. 19	1	0.01	-	1 ^{§§}				-				1	0.004	-		1

*PAK: Studien mit Verschiedenen Sampling und Messmethoden (verdünnt, unverdünnt im heissen Abgas, auf Filtern und/oder Waschflaschen)

**Standardabweichung von Kat.2,3,4a,5 und 4b entspricht dem Maximalwert aus EMEP Rating C und ist tiefer als für die anderen Kat., da für diese Kat. zumindest eine gewisse Anzahl an Daten aus der Literatur verfügbar ist. Für alle anderen Kat. wird als Standardabweichung der Maximalwert aus EMEP Rating D verwendet, da die Werte für die meisten Kat. grösstenteils abgeschätzt werden mussten.

##Studien aus 2004 u. 2011; *Studien aus 2005 u. 2006; ++jüngste Studie aus 2012

#B(a)P Werte vorgeschlagen, die zw. Literaturwerten und den EMEP/EEA-Daten lagen, sowie zw. advanced/ecolabelled stoves» und «conventional stoves. Für die Schweiz wurde davon ausgegangen, dass die Emissionswerte eher denjenigen von „advanced/ecolabelled“ entsprechen, da in der Schweiz seit über 10 Jahren entsprechende Anstrengungen wie das Qualitätssiegel zur Anwendung kamen.

§B(a)P Wert zw. EMEP «advanced / ecolabelled stoves and boilers» und B(a)P EF-2014 für Kat. 2-6., da für die Schweiz davon ausgegangen wurde, dass die Emissionswerte eher denjenigen von „advanced/ecolabelled“ entsprachen, da in der Schweiz damals seit über 10 Jahren entsprechende Anstrengungen wie das Qualitätssiegel zur Anwendung kommen.

§§B(a)P EF zw. 5 und 1 mg/GJ (mit zunehmender Anlagengrösse als Folge zunehmender Verbrennungsqualität und strengerer CO-Grenzwerte) vorgeschlagen, die unter den EMEP/EEA-Werten, jedoch deutlich über den Messwerten der Literatur lagen. Dass gegenüber den dokumentierten Messwerten deutlich höhere Emissionsfaktoren heutiger Feuerungen angenommen wurden, wurde damit begründet, dass die Messbedingungen der Literaturwerte nicht detailliert bekannt waren und möglicherweise gegenüber typischem Praxisbetrieb besseren Bedingungen entsprachen.

Tabelle A. 27: Zusammenstellung von B(b)F-Werten in [mg/GJ] aus verschiedenen Quellen zur Herleitung der EF für 2020 und deren Unsicherheiten. Es wurden dieselben EF wie für B(a)P angewendet.

HES-Kat.	Literatur für EF-Modell 2014			EF-2014 Wert	EMEP 2019*			Literatur für EF-Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Wert	Bereich	Wert	σ_s [%]**
Kat. 1	-			50 [#]	8 ⁺⁺	111	11 - 1110	-								300
Kat. 2, 3, 4a, 5***	9	26	2 - 2500	50 [#]	8 ⁺⁺	111	11 - 1110	6	60	0.8 - 249	[13, 14, 37, 39, 40, 43]					50
Conventional wood stoves					8 ⁺⁺	111	11 - 1110									200
Energy efficient wood stoves					8 ⁺⁺	111	11 - 1110									
Advanced/ecolabelled stoves and boilers					2 ^{##}	16	8 - 32									
Kat. 4b	2	3	2.5 - 8	5 [#]	2 ^{##}	16	8 - 32	3	2.7	0.05 - 5.7	[13, 24, 51]					10
Pellet stoves and boilers					2 ^{##}	16	8 - 32									50
Kat. 6,7	-			100				-								30
Kat. 8, 9	2	14	0.2 - 37	25 [§]	8 ⁺⁺	111	11 - 1110									100
conventional boilers < 50 kW					2 ^{##}	16	8 - 32									5
Advanced/ecolabelled stoves and boilers																300
Kat. 10	-			100				-								
Kat. 11a	-			5 ^{§§}				1	24	-	[61]					
Kat. 11b	2	1.80	-	2 ^{§§}	2 ^{##}	16	8 - 32	2	0.04	0.002 - 0.07	[13, 64]					10
Pellet stoves and boilers																
Kat. 12a	-			3 ^{§§}				1	0.01	-	[64]					
Kat. 12b	-			2 ^{§§}												
Kat. 13	-			3 ^{§§}												
Kat. 14a	-			3 ^{§§}												
Kat. 14b	-			2 ^{§§}												
Kat. 15	-			3 ^{§§}												
Wood combustion <1MW – Boilers					2 ^{##}	16	8 - 32									1
Kat. 16a	1	0.15	-	2 ^{§§}												
Kat. 16b	-			2 ^{§§}												
Kat. 17	-			2 ^{§§}												
Wood combustion >1MW – Boilers					2 ^{##}	16	8 - 32									
Kat. 18	-			1 ^{§§}												0.1
Kat. 19	1	0.01	-	1 ^{§§}												1

*PAK: Studien mit Verschiedenen Sampling und Messmethoden (verdünnt, unverdünnt im heissen Abgas, auf Filtern und/oder Waschflaschen)

**Standardabweichung von Kat.2,3,4a,5 und 4b entspricht dem Maximalwert aus EMEP Rating C (siehe Tabelle 6) und ist tiefer als für die anderen Kat., da für diese Kat. zumindest eine gewisse Anzahl an Daten aus der Literatur verfügbar ist. Für alle anderen Kat. wird als Standardabweichung der Maximalwert aus EMEP Rating D verwendet, da die Werte für die meisten Kat. grösstenteils abgeschätzt werden mussten.

##Studien aus 2004 u. 2011; *Studien aus 2005 u. 2006; ++jüngste Studie aus 2012

#B(b)F Werte vorgeschlagen, die zw. Literaturwerten und den EMEP/EEA-Daten lagen, sowie zw. advanced/ecolabelled stoves» und «conventionel stoves. Für die Schweiz wurde davon ausgegangen, dass die Emissionswerte eher denjenigen von „advanced/ecolabelled“ entsprechen, da in der Schweiz seit über 10 Jahren entsprechende Anstrengungen wie das Qualitätssiegel zur Anwendung kamen.

§B(b)F Wert zw. EMEP «advanced / ecolabelled stoves and boilers» und B(b)F EF-2014 für Kat. 2-6., da für die Schweiz davon ausgegangen wurde, dass die Emissionswerte eher denjenigen von „advanced/ecolabelled“ entsprachen, da in der Schweiz damals seit über 10 Jahren entsprechende Anstrengungen wie das Qualitätssiegel zur Anwendung kommen.

§§B(b)F EF zw. 5 und 1 mg/GJ (mit zunehmender Anlagengrösse als Folge zunehmender Verbrennungsqualität und strengerer CO-Grenzwerte) vorgeschlagen, die unter den EMEP/EEA-Werten, jedoch deutlich über den Messwerten der Literatur lagen. Dass gegenüber den dokumentierten Messwerten deutlich höhere Emissionsfaktoren heutiger Feuerungen angenommen wurden, wurde damit begründet, dass die Messbedingungen der Literaturwerte nicht detailliert bekannt waren und möglicherweise gegenüber typischem Praxisbetrieb besseren Bedingungen entsprachen.

Tabelle A. 28 Zusammenstellung von B(k)F-Werten in [mg/GJ] aus verschiedenen Quellen zur Herleitung der EF für 2020 und deren Unsicherheiten. Für I(cd)P wurden dieselben EF für 2020 angewendet.

HES-Kat.	Literatur für EF-Modell 2014			EF-2014 Wert	EMEP 2019*			Literatur für EF-Modell 2020			Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Wert	Bereich	Wert
Kat.1	1	15	-	30 [#]	0	42	4 - 420	-	-	-	-	-	-	-	300
Kat. 2, 3, 4a, 5 <i>Conventional wood stoves</i> <i>Energy efficient wood stoves</i> <i>Advanced/ecolabelled stoves and boilers</i>	8	25	0.3 - 1000	30 [#]	11 ⁺⁺	42	4 - 420	5	35	0.5 - 123	[13, 14, 37, 39, 40]	-	-	-	30
Kat. 4b <i>Pellet stoves and boilers</i>	1	5	4.3 - 7.0	3 [#]	8 ⁺⁺	42	4 - 420	3	1.7	1.5 - 2.0	[13, 51]	-	-	-	4
Kat. 6,7	-	-	-	60	8 ⁺⁺	5	2 - 10	-	-	-	-	-	-	-	30
Kat. 8, 9 <i>conventional boilers < 50 kW</i> <i>Advanced/ecolabelled stoves and boilers</i>	2	13	0.1 - 43	15 [§]	2 ^{##}	5	2 - 10	-	-	-	-	-	-	-	15
Kat. 10	-	-	-	60	8 ⁺⁺	42	4 - 420	-	-	-	-	-	-	-	60
Kat. 11a	-	-	-	3 ^{§§}	8 ⁺⁺	5	2 - 10	1	10	-	[61]	-	-	-	4
Kat. 11b <i>Pellet stoves and boilers</i>	1	1	-	2 ^{§§}	2 ^{##}	5	2 - 10	2	0.03	0.002 - 0.05	[13, 64]	-	-	-	4
Kat. 12a	-	-	-	2 ^{§§}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Kat. 12b	-	-	-	2 ^{§§}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Kat. 13	-	-	-	2 ^{§§}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Kat. 14a	-	-	-	2 ^{§§}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Kat. 14b	-	-	-	2 ^{§§}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
Kat. 15 <i>Wood combustion <1MW – Boilers</i>	-	-	-	2 ^{§§}	2 ^{##}	5	2 - 10	-	-	-	-	-	-	-	1
Kat. 16a	1	0.01	-	2 ^{§§}	-	-	-	-	-	-	-	1	0.02	-	1
Kat. 16b	-	-	-	2 ^{§§}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
Kat. 17 <i>Wood combustion >1MW – Boilers</i>	-	-	-	2 ^{§§}	2 ^{##}	5	2 - 10	-	-	-	-	-	-	-	1
Kat. 18	-	-	-	1 ^{§§}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1
Kat. 19	-	-	-	1 ^{§§}	-	-	-	-	-	-	-	1	0.004	-	1

*PAK: Studien mit Verschiedenen Sampling und Messmethoden (verdünnt, unverdünnt im heissen Abgas, auf Filtern und/oder Waschflaschen)

**Standardabweichung von Kat.2,3,4a,5 und 4b entspricht dem Maximalwert aus EMEP Rating C (siehe Tabelle 6) und ist tiefer als für die anderen Kat., da für diese Kat. zumindest eine gewisse Anzahl an Daten aus der Literatur verfügbar ist. Für alle anderen Kat. wird als Standardabweichung der Maximalwert aus EMEP Rating D verwendet, da die Werte für die meisten Kat. grösstenteils abgeschätzt werden mussten.

##Studien aus 2004 u. 2011, *Studien aus 2005 u. 2006, **jüngste Studie aus 2012

#B(k)F Werte vorgeschlagen, die zw. Literaturwerten und den EMEP/EEA-Daten lagen, sowie zw. advanced/ecolabelled stoves» und «conventionel stoves. Für die Schweiz wurde davon ausgegangen, dass die Emissionswerte eher denjenigen von „advanced/ecolabelled“ entsprachen, da in der Schweiz seit über 10 Jahren entsprechende Anstrengungen wie das Qualitätssiegel zur Anwendung kamen.

§B(k)F Wert zw. EMEP «advanced / ecolabelled stoves and boilers» und B(k)F EF-2014 für Kat. 2-6., da für die Schweiz davon ausgegangen wurde, dass die Emissionswerte eher denjenigen von „advanced/ecolabelled“ entsprachen, da in der Schweiz seit über 10 Jahren entsprechende Anstrengungen wie das Qualitätssiegel zur Anwendung kamen.

§§B(k)F EF zw. 3 und 1 mg/GJ (mit zunehmender Anlagengrösse als Folge zunehmender Verbrennungsqualität und strengerer CO-Grenzwerte) vorgeschlagen, die unter den EMEP-/EEA-Werten, jedoch deutlich über den Messwerten der Literatur lagen. Dass gegenüber den dokumentierten Messwerten deutlich höhere Emissionsfaktoren heutiger Feuerungen angenommen wurden, wurde damit begründet, dass die Messbedingungen der Literaturwerte nicht detailliert bekannt waren und möglicherweise gegenüber typischem Praxisbetrieb besseren Bedingungen entsprachen.

Tabelle A. 29 Zusammenstellung von I(cd)P-Werten in [mg/GJ] aus verschiedenen Quellen zur Herleitung der EF für 2020 und deren Unsicherheiten. Es wurden dieselben EF wie für B(k)F angewendet

HES-Kat.	Literatur für EF-Modell 2014			EF-2014 Wert	EMEP 2019*			Literatur für EF-Modell 2020					Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Mean	Median	Bereich	Quelle	Anzahl	Wert	Bereich	Wert	σ_s [%]**
Kat. 1	2	11	1.8 - 21	30 [#]	8	71	7 - 710	-								300	
Kat. 2, 3, 4a, 5*** <i>Conventional wood stoves</i> <i>Energy efficient wood stoves</i> <i>Advanced/ecolabelled stoves and boilers</i>	11	19	0.7 - 1500	30 [#]	8 ⁺⁺	71	7 - 710	6	31	4.1	0.41 - 131	[13, 14, 17, 37, 40, 44]				30	
Kat. 4b <i>Pellet stoves and boilers</i>	2	1	0 - 17	3 [#]	8 ⁺⁺	71	7 - 710									200	
Kat. 6,7	-		-	60	2 ⁺⁺	4	2 - 8	5	1.8	1.2	0.2 - 5.5	[13, 44, 51, 56]				4	
Kat. 8, 9 <i>conventional boilers < 50 kW</i> <i>Advanced/ecolabelled stoves and boilers</i>	1	9	0.1 - 32	15 ^s	2 ^{###}	4	2 - 8	-								30	
Kat. 10	-		-	60	8 ⁺⁺	71	7 - 710	-								15	
Kat. 11a	1	0.1	0.1 - 2.3	3 ^{\$\$}	8 ⁺⁺	4	2 - 8	1	26	-	-	[61]				60	
Kat. 11b <i>Pellet stoves and boilers</i>	2	1		2 ^{\$\$}	2 ^{###}	4	2 - 8	1	0.03	-	-	[13]				4	
Kat. 12a	-		-	2 ^{\$\$}				-									
Kat. 12b	-		-	2 ^{\$\$}				-									
Kat. 13	-		-	2 ^{\$\$}				-									
Kat. 14a	-		-	2 ^{\$\$}				-									
Kat. 14b	-		-	2 ^{\$\$}				-									
Kat. 15 <i>Wood combustion <1MW – Boilers</i>	-		-	2 ^{\$\$}	2 ^{###}	4	2 - 8	-									
Kat. 16a	-		-	2 ^{\$\$}				-					1	0.02	-	1	
Kat. 16b	-		-	2 ^{\$\$}				-					-				
Kat. 17 <i>Wood combustion >1MW – Boilers</i>	-		-	2 ^{\$\$}	2 ^{###}	4	2 - 8	-					-				
Kat. 18	-		-	1 ^{\$\$}				-					-			0.1	
Kat. 19	-		-	1 ^{\$\$}				-					1	0.004	-	1	

*PAK: Studien mit Verschiedenen Sampling und Messmethoden (verdünnt, unverdünnt im heissen Abgas, auf Filtern und/oder Waschflaschen)

**Standardabweichung von Kat.2,3,4a,5 und 4b entspricht dem Maximalwert aus EMEP Rating C und ist tiefer als für die anderen Kat., da für diese Kat. zumindest eine gewisse Anzahl an Daten aus der Literatur verfügbar ist. Für alle anderen Kat. wird als Standardabweichung der Maximalwert aus EMEP Rating D verwendet, da die Werte für die meisten Kat. grösstenteils abgeschätzt werden mussten.

[#]Studien aus 2004 u. 2011, *Studien aus 2005 u. 2006, ⁺⁺jüngste Studie aus 2012

[#]I(cd)P Werte vorgeschlagen, die zw. Literaturwerten und den EMEP/EEA-Daten lagen, sowie zw. advanced/ecolabelled stoves» und «conventionel stoves. Für die Schweiz wurde davon ausgegangen, dass die Emissionswerte eher denjenigen von „advanced/ecolabelled“ entsprachen, da in der Schweiz seit über 10 Jahren entsprechende Anstrengungen wie das Qualitätssiegel zur Anwendung kamen.

^sI(cd)P Wert zw. EMEP «advanced / ecolabelled stoves and boilers» und I(cd)P EF-2014 für Kat. 2-6., da für die Schweiz davon ausgegangen wurde, dass die Emissionswerte eher denjenigen von „advanced/ecolabelled“ entsprachen, da in der Schweiz seit über 10 Jahren entsprechende Anstrengungen wie das Qualitätssiegel zur Anwendung kamen.

^sI(cd)P EF zw. 3 und 1 mg/GJ (mit zunehmender Anlagengrösse als Folge zunehmender Verbrennungsqualität und strengerer CO-Grenzwerte) vorgeschlagen, die unter den EMEP/-EEA-Werten, jedoch deutlich über den Messwerten der Literatur lagen. Dass gegenüber den dokumentierten Messwerten deutlich höhere Emissionsfaktoren heutiger Feuerungen angenommen wurden, wurde damit begründet, dass die Messbedingungen der Literaturwerte nicht detailliert bekannt waren und möglicherweise gegenüber typischem Praxisbetrieb besseren Bedingungen entsprachen.

A.10 EF-2020 – NH₃

Tabelle A. 30 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für NH₃ in [g/GJ] zur Herleitung des NH₃-EF-2020 und der Unsicherheiten.

HES Kat.	Literatur EF-Modell 2014 [#]			EF-2014* Wert	EMEP 2019**			Literatur EF-Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020				Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Mittelwert	Median	Bereich	Wert	σ _s [%] ^{###}
Kat. 1	1	44	-	5	1	74	37 - 148	-	-	-	-	-	-	-	-	-	200
Kat. 2, 3, 4a, 5	1	32	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Conventional wood stoves	-	-	-	-	1	70	35 - 140	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Energy efficient wood stoves	-	-	-	-	1	37	18 - 74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Advanced/ecolabelled stoves and boilers	-	-	-	-	1	37	18 - 74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 4b	2	4.5	1.5 - 7.4	2	-	-	-	1	1.5	0.2 - 3.1	[103]	-	-	-	-	-	
Pellet stoves and boilers	-	-	-	-	1	12	6 - 24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 6,7	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 8, 9	1	45.0	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
conventional boilers < 50 kW	-	-	-	-	1	74	37 - 148	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Advanced/ecolabelled stoves and boilers	-	-	-	-	1	37	18 - 74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 10	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 11a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 11b	-	-	-	-	-	-	-	1	1.2	-	[104]	-	-	-	-	-	
Pellet stoves and boilers	-	-	-	-	1	11	8 - 40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 12a, 14a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 12b, 14b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 13, 15	-	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Wood combustion <1MW – Boilers	-	-	-	-	1	37	18 - 74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 16a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1.30	-	-	-	
Kat. 16b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Wood combustion >1MW – Boilers	-	-	-	-	1	37	18 - 74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 18	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	37	2.5	0.9	0.1 - 29	-	
Kat. 19	-	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	3	4.3	-	1.4 - 7.6	-	

[#]Bis auf 1 Studie in Kat. 4b sind die Werte aus der gleichen Studie, aus denen auch die Werte im EMEP Guidebook abgeleitet wurden

^{*}Abgeschätzt aus [107] und 4 eigenen Studie zw. 1994-1996 [99, 106, 108, 109]

^{**}Gleiche Studie für alle Kategorien aus 2004

^{###}Kat. 1-11: gleiche Unsicherheit, da diese Kat. zusammengefasst wurden. Wert entspricht max. Wert des EMEP Rating C (Tabelle 6). Es gibt nur wenige Daten (Literatur), jedoch ist die Bandbreite gering.

Kat. 12-17: Wert entspricht max. Wert des EMEP Rating C, da es nur sehr wenige Daten gibt (Literatur und Messungen BAFU) und einige Kat. zusammengefasst wurden. Kat. 18-19: Tieferer Wert (Mittelwert EMEP Ranking C) als für Kat. 1-17, da entweder eine überwiegende Anzahl an existierenden Anlagen (Kat.18) oder einige Messungen (Kat. 19 mit geringer Bandbreite) vorliegen.

A.11 EF-2020 – SO_x

Tabelle A. 31 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für SO_x in [g/GJ] zur Herleitung des SO_x EF-2020 und der Unsicherheiten.

HES-Kat.	Literatur EF-Modell 2014			EF-2014*	EMEP 2019**			Literatur EF-Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020				Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Mittelwert	Median	Bereich	Wert	σ _s [%]#
Kat. 1	1	13	-														
Kat. 2, 3, 4a, 5	4	16	13 - 77					3	9.4	1.8 - 20	[19, 84]						
Conventional wood stoves																	
Energy efficient wood stoves																	
Advanced/ecolabelled stoves and boilers																	
Kat. 4b	4	16	6 - 24					3	7.4	0.7 - 25	[19, 46, 103]						
Pellet stoves and boilers																	
Kat. 6,7	-							-							10	200	
Kat. 8, 9	1	7.7	-					-									
conventional boilers < 50 kW																	
Advanced/ecolabelled stoves and boilers																	
Kat. 10	-			10	1	11	8 - 40	-									
Kat. 11a	-							-									
Kat. 11b	4	3.7	0 - 13					4	4.9	0.2 - 9.5	[63, 92, 104, 105]						
Pellet stoves and boilers																	
Kat. 12a, 14a	-							-									
Kat. 12b, 14b	-							1	2.4	-	[68]	1	0.3	-			
Kat. 13, 15	-							-				1	0.4	-			
Wood combustion <1MW – boilers automatic																	
Kat. 16a	-							1	10.3	-	[67]	1	0.03	-	3	300	
Kat. 16b	-							-				-					
Kat. 17	1	3.9	-					-				-					
Wood combustion >1MW – Boilers																	
Kat. 18	2	4.1	1 - 7					-				26	0.9	1.0	0.03 - 2.6	1	
Kat. 19	1	2.5	-	20				-				3	23.0		0.3 - 65	20	

*Abgeschätzt über den typischen Schwefelgehalt im Brennstoff und Umwandlungsraten von diesem von 90%. Den Literaturwerten wurde damals nicht vertraut, da diese höhere SO_x Gehalte im Abgas zeigten als anhand der Schwefelgehalte im Brennstoff theoretisch möglich ist (wahrscheinlich Querempfindlichkeiten der Messung) Da die SO_x-Emissionen in erster Linie vom Schwefelgehalt des Brennstoffs und nicht von der Verbrennungsart abhängt, wurde der gleiche Wert für alle Feuerungstypen, die naturbelassenes Holz oder Pellets verbrennen, eingesetzt. Für Altholz wurde der Wert aus der Studie [106] abgeschätzt (im Rohgas zw. 15 - 40 mg/MJ und 5 - 20 mg/MJ nach Gewebefilter mit Adsorptionsmittel)

**US EPA Studie aus 1996 und 2003, jedoch mit gleichen Zahlen für 1996 und 2003

#Kat. 1-11: Gleiche Unsicherheit, da diese Kat. zusammengefasst wurden. Wert entspricht max. Wert des EMEP Rating C (Tabelle 6). Es gibt nur wenige Daten (Literatur), jedoch ist die Bandbreite gering. Wert ist meist tiefer als für PAK und Schwermetalle, da SO_x relativ einfach und präzise zu messen ist. Kat. 12-17: Wert entspricht max. Wert des EMEP Rating D, da es nur sehr wenige Daten gibt (Literatur und Messungen des BAFU) und einige Kat. zusammengefasst wurden. Kat. 18-19: Tieferer Wert als für Kat. 12-17, da entweder eine überwiegende Anzahl an existierenden Anlagen (Kat.18) oder Messungen (Kat. 19) vorliegt. Die Bandbreite der Werte ist ebenfalls nicht zu gross. Wert entspricht max. Wert des EMEP Rating C.

A.12 EF-2020 – Benzol

Tabelle A. 32 Zusammenstellung von Literaturwerten für Benzol und die Verhältnisse von Benzol zu VOC und CH₄.
Einträge in grauer Schrift wurden bereits in der letzten Aktualisierung 2014 verwendet.

HES-Kat.	Quelle	Betriebsweise	Benzol [g/GJ]	VOC [g/GJ]	CH ₄	Benzol/VOC [%]	Benzol/CH ₄ [%]	CH ₄ /VOC [%]
2,3,4a,5	[17]	ganzer Zyklus	1.3	22.1		5.7%		
2,3,4a,5	[15]	Ofen 1, ganzer Zyklus	10.1	349.6	90.7	2.9%	11.2%	25.9%
		Ofen 2, ganzer Zyklus	7.5	363.0	144.2	2.1%	5.2%	39.7%
		Ofen 3, ganzer Zyklus	3.1	70.1	20.9	4.4%	14.7%	29.8%
		Ofen 1, ganzer Zyklus, feuchtes Holz	10.2	712.9	183.8	1.4%	5.6%	25.8%
		Ofen 3, ganzer Zyklus, feuchtes Holz	6.0	749.9	203.8	0.8%	3.0%	27.2%
		Ofen 3, ganzer Zyklus, Brennkammer überladen	4.4	138.8	38.4	3.2%	11.5%	27.6%
4b	[15]	Mittelwert alle Phasen	0.4	51.3	10.8	0.8%	4.0%	21.1%
		Start	0.9	61.8	12.4	1.4%	7.1%	20.1%
		Volleistung	0.1	4.9	1.0	2.1%	10.2%	20.6%
		Teilleistung	0.5	129.1	25.8	0.4%	1.9%	20.0%
		Stopp	0.3	9.4	4.0	2.7%	6.3%	42.6%
8,9	[15]	Start	31.1	453.1	114.4	6.9%	27.2%	25.2%
		Flammphase, trockenes Holz	0.3	11.0	1.5	2.5%	18.9%	13.3%
		Flammphase, feuchtes Holz	23.0	344.3	163.2	6.7%	14.1%	47.4%
		Ausbrand	0.2	10.5	7.0	1.9%	2.9%	66.7%
		Mittelwert alle Phasen	13.6	204.7	71.5	6.7%	19.1%	34.9%
11b	[15]	Mittelwert alle Phasen	1.0	23.8	5.4	4.0%	17.8%	22.6%
		Luftüberschuss	2.4	64.5	14.1	3.8%	17.4%	21.8%
		Luftmangel	0.4	6.2	2.1	6.6%	19.8%	33.2%
		Optimaler Betrieb	0.02	0.8	0.002	2.2%		0.3%
12a	[15]	Volleistung	0.0002	2	0.5	0.0%	0.0%	24.4%
		Volleistung	0.0002	1.1	0.001	0.0%	16.7%	0.1%
11b	[110]	k.A.	0.96	1.3		73.8%		
19	Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020	Volleistung	0.03	0.29	0.1	10.3%	30.0%	34.5%
2,3,4a,5	[88]	k.A.	13.0	88.1	71.8	14.7%	18.1%	81.5%
2,3,4a,5	[86]	k.A.	27.0	227	97	11.9%	27.8%	42.7%
2,3,4a,5	[101]	k.A.	7.9	230		3.4%		
2,3,4a,5	[100]	k.A.	23.0	316	41.4	7.3%	55.4%	13.1%
4b	[87]	k.A.	0.6	19.2	6.2	3.2%	9.9%	32.5%
8,9	[85]	k.A.	2.3	1106		0.2%		
11b	[88]	k.A.	0.9	0.96	0.3	93.8%		31.3%
Auswertung	alle Daten	Anzahl				32	26	28
		median				3.2%	12.8%	26.6%
		Anzahl				11	11	11
		median				3.43%	11.16%	27.18%
		Anzahl				6	6	6
		median				1.8%	6.7%	20.8%
		Anzahl				6	6	6
		median				4.6%	16.5%	30.1%
Kat. 11b	Anzahl				6	6	6	
	median				5.3%	8.7%	22.2%	
Kat. 12a	Anzahl				2	2	2	
	median				0.01%	8.4%	12.2%	

Tabelle A. 33 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für Benzol in [g/GJ] zur Herleitung des Benzol-EF-2020 und der Unsicherheiten.

HES-Kat.									Werte Literatur (siehe Tabelle A. 32)		Werte EF-Mo- dell 2020		Berechnung EF-Benzol verschiedene Varianten				EF-Vorschlag	
	Literatur EF-Modell 2014			EF- 2014*	Literatur EF-Modell 2020			Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020	Benzol/ VOC	Benzol/ CH ₄	VOC	CH ₄ =0.3 * VOC	Kat. spez. Benzol/ VOC##	Kat. spez. Benzol/ CH ₄ ##	Benzol/ VOC = 3.2%*	Benzol/ CH ₄ = 12.8%*	Benzol	
	Anzahl	Wert	Bereich	Wert	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Mittelwert	[%]	[%]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]	[g/GJ]
Kat. 1	1	16	-	20	-						330	100			10.56	12.81		300
Kat. 2,3,4a,5	4	18	0 - 450	20	2	2.80	1.8 - 71 [15], [17]		3.4%	11.2%	310	90	10.65	10.05	9.92	11.53		
Kat. 4b	1	0.6	0.06 - 3.8	2	2	0.3	0.2 - 0.4 [15]		1.8%	6.7%	20	6	0.35	0.40	0.64	0.77		
Kat. 6,7	-			40	-						440	130			14.07	16.65		
Kat. 8, 9	1	2.3	0.2 - 5.8	10	1	13.60	- [15]		4.6%	16.5%	100	30	4.59	4.95	3.20	3.84		
Kat. 10	-			40	-						440	130			14.07	16.65		
Kat. 11a	-			2	-						60	20			1.92	2.56		
Kat. 11b	1	0.9	0 - 2.3	1	4	1.2	0.07 - 2.7 [15]		5.3%	8.7%	20	6	1.06	0.52	0.64	0.77		
Kat. 12a,14a	-			1	1	0.0002	- [15]		0.01%	8.4%	30	10	0.00	0.84	0.96	1.28		
Kat. 12b,14b	-			1	1	2.4	- [110]				10	3			0.32	0.38		
Kat. 13, 15	-			1	-						30	10			0.96	1.28		
Kat. 16a	-			1	-						10	3			0.32	0.38		
Kat. 16b	-			1	-						5	2			0.16	0.26		
Kat. 17	-			1	-						10	3			0.32	0.38		
Kat. 18	-			1	-						0.5	0.2			0.02	0.03		
Kat. 19	-			1	-			0.03#			2	0.6			0.06	0.08		

nur 1 Messung

Berechnet mit den individuellen Werten der Verhältnisse für die jeweilige Kategorie (siehe Spalte Benzol/VOC und Benzol/CH₄ in [%])

*Berechnet mit dem Mittelwert des Verhältnisses aus den verfügbaren Literaturdaten aller Kategorien (siehe Tabelle A. 32)

**Da Benzol über das Verhältnis Benzol / VOC aus der Literatur berechnet wurde, wird hier eine Standardabweichung angenommen, die höher ist als jene von VOC. Wert entspricht max. Wert des EMEP Rating D

A.13 EF-2020 – PCDD/F

Tabelle A. 34 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für PCDD/F in [µg I TEQ / GJ] zur Herleitung des PCDD/F-EF-2020 und der Unsicherheiten.

HES Kat.	Literatur EF-Modell 2014			EF-2014** Wert	EMEP 2019*			Literatur EF-Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Mittelwert	Bereich	Wert	σ _s [%] [#]
Kat. 1	2	0.27	0.05-0.5	1.00	3	0.80	0.02-5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kat. 2, 3, 4a, 5	7	0.26	0.01-4.5	1.00	3	0.80	0.02-5	3	0.10	0.06-0.2	[13, 40, 42]	-	-	-	0.5	300
Conventional wood stoves	-	-	-	-	1	0.25	0.02-2.6	-	-	-	-	-	-	-	-	
Energy efficient wood stoves	-	-	-	-	1	0.10	0.03-0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	
Advanced/ecolabelled stoves and boilers	-	-	-	-	-	-	-	1	0.73	-	[56]	-	-	-	0.05	
Kat. 4b	2	0.01	-	0.05	1	0.10	0.03-0.5	-	-	-	-	-	-	-	0.05	
Pellet stoves and boilers	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	
Kat. 6,7	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.5	
Kat. 8, 9	9	0.15	0.001-2.6	0.10	2	0.55	0.02-2.6	1	0.20	-	[60]	-	-	-	0.25	
conventional boilers < 50 kW	-	-	-	-	1	0.10	0.03-0.5	-	-	-	-	-	-	-	0.5	
Advanced/ecolabelled stoves and boilers	-	-	-	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	
Kat. 10	-	-	-	1.00	1	0.10	0.03-0.5	-	-	-	-	-	-	-	0.05	
Kat. 11a	2	0.01	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	
Kat. 11b	3	0.13	0.01-0.6	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	
Pellet stoves and boilers	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Kat. 12a, 14a	3	0.08	0.04-0.1	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	
Kat. 12b, 14b	-	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	
Kat. 13, 15	2	0.03	-	0.10	1	0.10	0.03-0.5	-	-	-	-	-	-	-	0.05	
Wood combustion <1MW – Boilers	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	
Kat. 16a	2	0.001	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-	1	0.01	-	0.05	
Kat. 16b	-	-	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	
Kat. 17	-	-	-	0.10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.1	
Wood combustion >1MW – Boilers	-	-	-	-	1	0.10	0.03-0.5	-	-	-	-	-	-	-	0.05	
Kat. 18	3	0.006	-	0.05	-	-	-	-	-	-	-	10	0.002	0.0002-0.009	0.01	200
Kat. 19	1	3.3	0.1-76	0.05	-	-	-	-	-	-	-	2	0.001	-	0.05	300

*EF angenommen, die in der Grössenordnung mit EMEP übereinstimmen. EF stark durch unzulässige Brennstoffe (PVC-haltig) abhängig --> EF stark von Annahme Anteil unzulässig betriebener Feuerungen abhängig. EF-Vorschlag setzt voraus, dass Grossteil der Feuerungen korrekt betrieben wird. Für Kat. 1-5 wird ein geringer Anteil unzulässig betriebener Feuerungen angenommen. Bei automatischen Holzfeuerungen wird von einer erhöhten Kontrolle und in der Regel korrektem Betrieb ausgegangen. Für Pelletfeuerungen wird ein tieferer Wert angenommen, da durch DIN Pellets ein erhöhter Eintrag von Chlor und Kupfer in die Feuerung weitgehend ausgeschlossen werden kann. Für Grossanlagen mit WKK wird ein weitgehend stationärer Betrieb mit entsprechender Problematik der Abkühlung von Anlagenteilen mit Denovo-Synthese vorausgesetzt und damit ebenfalls ein tieferer Wert angenommen. Für Kat. 19 wird vorausgesetzt, dass bei der Anlagenauslegung und im Betrieb eine Einhaltung des Dioxingrenzwerts nach Ziffer 71 LRV sicher gewährleistet ist (Feinstaubabscheidung in der Regel mit Gewebefilter und Trockensorption, Denox)

**Werte für die verschiedenen Kategorien stammen aus den gleichen Studien

[#]Kat.1-11: Stabw = 300 und nicht 500 wie für PCB und HCB. Es wurden zwar einige Kategorien mit anderen gleichgesetzt, aber es gibt einige wenige Daten (Literatur). Wert entspricht max. Wert des EMEP Rating D (Tabelle 6). Kat.12-17 & 19: siehe Begründung Kat. 1-11. Zusatzbegründung warum Stabw nicht gleich 500% ist: 3 Messungen im Auftrag des BAFU. Kat. 18 Stabw = 200 und nicht 500, da Daten von existierenden Anlagen in der Schweiz vorliegen, und bereits ein EF-Wert festgelegt wurde, der am oberen Ende der Bandbreite ist. Wert entspricht max. Wert des EMEP Rating C.

A.14 EF-2020 – PCB

Tabelle A. 35 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für PCB in [µg/GJ] zur Herleitung des PCB-EF-2020 und der Unsicherheiten.

HES Kat.	Literatur EF-Modell 2014 [#]			EF-2014* Wert	EMEP 2019**			Literatur EF-Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich		Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Mittelwert	Bereich	Wert	σ _s [%] [†]
Kat. 1	-			0.06	1	0.06	0.006 - 0.6	-								
Kat. 2, 3, 4a, 5	1	0.03	-	0.06				1	0.10	-	[42]					
Conventional wood stoves					1	0.06	0.006 - 0.6									
Energy efficient wood stoves					1	0.03	0.003 - 0.3									
Advanced/ecolabelled stoves and boilers					1	0.07	0.007 - 0.7									
Kat. 4b	-			0.01				1	0.01	-	[56]					
Pellet stoves and boilers					1	0.01	0.001 - 0.1									
Kat. 6,7	-			0.06				-								
Kat. 8, 9	1	0.03	-	0.02				-								
conventional boilers < 50 kW					1	0.06	0.006 - 0.6									
Advanced/ecolabelled stoves and boilers					1	0.07	0.007 - 0.7									
Kat. 10	-			0.06				-								
Kat. 11a	-			0.02				-								
Kat. 11b	1	0.02	-					-								
Pellet stoves and boilers					1	0.01	0.001 - 0.1									
Kat. 12a, 14a	-							-								
Kat. 12b, 14b	-							-								
Kat. 13, 15	-							-								
Wood combustion <1MW – Boilers					1	0.007	0.0007 - 0.07									
Kat. 16a	-							-								
Kat. 16b	-							-								
Kat. 17	-							-								
Wood combustion >1MW – Boilers					1	0.007	0.0007 - 0.07									
Kat. 18	-							-								
Kat. 19	-							-								

[#]2 Studien aus 2006 (gleiche Studie, aus denen EMEP die EF ableitet) und 2011

^{*}Aufgrund der geringen Datenlage (nur 3 Studien, dabei wurde 1 aufgrund von nicht Holzbrennstoffen nicht berücksichtigt) und der grossen Bandbreite der gefundenen Werte werden praktisch überall die Werte von EMEP übernommen

^{**}Gleiche Studie für alle Kategorien aus 2006

[†]Gleicher Wert für alle Kat. Sehr hoher Wert (Vorschlag BAFU für EMEP Rating E), da praktisch keine Daten verfügbar, viele Kat. zusammengefasst sind, sowie gleicher EF wie EMEP Wert verwendet wird, der eine grosse Bandbreite aufweist

A.15 EF-2020 – HCB

Tabelle A. 36 Zusammenstellung aller verfügbaren Daten inklusive Bandbreite für HCB in [$\mu\text{g}/\text{GJ}$] zur Herleitung des HCB-EF-2020 und der Unsicherheiten.

HES Kat.	Literatur EF-Modell 2014 [#]			EF-2014 [*]	EMEP 2019 ^{**}			Literatur EF-Modell 2020				Messungen im Auftrag des BAFU 2019/2020			Vorschlag EF-Modell 2020	
	Anzahl	Wert	Bereich	Wert	Anzahl	Wert	Bereich	Anzahl	Wert	Bereich	Quelle	Anzahl	Mittelwert	Bereich	Wert	σ_s [%] [†]
Kat. 1	-				1	5	0.1 - 30	-								
Kat. 2, 3, 4a, 5	-															
Conventional wood stoves					1	5	0.1 - 30									
Energy efficient wood stoves					1	5	0.1 - 30									
Advanced/ecolabelled stoves and boilers					1	5	0.1 - 30									
Kat. 4b	-															
Pellet stoves and boilers					1	5	0.1 - 30									
Kat. 6,7	-															
Kat. 8, 9	1	0.04	-													
conventional boilers < 50 kW				5	1	5	0.1 - 30								5	
Advanced/ecolabelled stoves and boilers					1	5	0.1 - 30									
Kat. 10	-															
Kat. 11a	-															
Kat. 11b	1	0.04	-													
Pellet stoves and boilers					1	5	0.1 - 30									
Kat. 12a, 14a	-															
Kat. 12b, 14b	-															
Kat. 13, 15	-															
Wood combustion <1MW – Boilers					1	5	0.1 - 30									
Kat. 16a	-															
Kat. 16b	-															
Kat. 17	-															
Wood combustion >1MW – Boilers				1	1	5	0.1 - 30								1	
Kat. 18	-															
Kat. 19	-															

[#]Gleichen Studie für alle Kategorien

[†]Datenbasis für HCB sehr unsicher --> gleiche Werte wie EMEP/EEA-Guidebook – 2013 für handbeschickte Feuerungen und kleinere automatische Feuerungen

^{**}gleiche Studie für alle Kategorien aus 2011. Für grössere Anlagen wurden tiefere Werte angenommen, da ein Teil von HCB durch Adsorption an Feinstaub abgeschieden wird, und grössere Anlagen in der Schweiz zu einem hohen Anteil Feinstaubabscheider haben

^{††}gleicher Wert für alle Kat. Sehr hoher Wert (Vorschlag BAFU für EMEP Rating E), da praktisch keine Daten verfügbar, viele Kat. zusammengefasst sind, sowie Wert aus EMEP Wert verwendet wird, der eine grosse Bandbreite aufweist

A.16 Zeitreihe – Rückblick bis 1990 und Prognose bis 2035

Tabelle A. 37 VOC-EF und Faktoren f und α zur Berechnung von VOC aus CO, sowie CH₄- und NMVOC-EF der Jahre 1990-2035.

Kat. HES	VOC = f * CO										CH ₄ = α * VOC, $\alpha=0.3$					NMVOC = VOC - CH ₄				
	1990		2008		2014		2020		2035		1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035
	f	[g/GJ]	f	[g/GJ]	f	[g/GJ]	f	[g/GJ]	f	[g/GJ]	[g/GJ]					[g/GJ]				
1	13%*	520	13%*	460	13%*	390	13%	390	10%	250	160	140	120	120	75	360	320	270	270	175
2,3,4a,5	13%*	520	13%*	440	13%*	339	13%	360	9.6%	210	160	130	120	110	65	360	310	270	250	145
4b	5%	50	5%	40	5%	20	5%	20	2%	10**	20	12	6	6	3	30	28	14	14	7
6, 7	13%*	780	13%*	650	13%*	520	13%	500	10%	320	230	200	160	150	95	550	450	360	350	225
8,9	6%	240	6%	130	6%	110	6%	100	6%	60#	70	40	30	30	20	170	90	80	70	40
10	13%*	780	13%*	650	13%*	520	13%	500	10%	400	230	200	160	150	120	550	450	360	350	280
11a	7%	210	7%	120	7%	70	7%	60	7%	40**	60	30	20	20	10	150	80	50	40	30
11b	6%	60	6%	40	6%	20	6%	20	2%	5**	20	10	10	6	2	40	30	10	14	3
12a		110		60		40		30		20	30	20	10	10	6	80	40	30	20	14
12b		40		20		10		10		8	10	6	3	3	2	30	14	7	7	6
13		110		60		40		30		20	30	20	10	10	6	80	40	30	20	14
13		110		60		40		30		20	30	20	10	10	6	80	40	30	20	14
14b		40		20		10	7%	10	7%	8	10	6	3	3	2	30	14	7	7	6
15	7%	110	7%	60	7%	40		30		20	30	20	10	10	6	80	40	30	20	14
16a		40		20		10		10		7	10	6	3	3	2	30	14	7	7	5
16b		10		10		4		3		3	3	3	1	1	1	7	7	3	2	2
17		40		30		10		10		8	12	9	3	3	2	28	21	7	7	6
18		4		2		0.7	5%	0.5	5%	0.3	1	0.6	0.2	0.2	0.1	3	1.4	0.5	0.3	0.2
19		14		10		4	3%	2		1.9	4	3	1	0.6	0.6	10	7	3	1.4	1.3

*Gleicher Wert wie für Kat. 2, 3, 4a, 5

#Median der Werte von der Technologie "Modern"

**25% Perzentil der verfügbaren Daten von 2020 als Wert für 2035 angenommen

Tabelle A. 38 PM_{exh}-, PM_{10,exh}- und PM_{2.5,exh}-EF sowie BC-EF und Faktoren BC/PM_{2.5} zur Berechnung von BC aus PM_{2.5,exh} der Jahre 1990-2035.

Kat HES	PM _{exh}					BC = PM _{2.5,exh} * BC/PM _{2.5} (= f)										PM _{10,exh} = 0.95 * PM _{exh}					PM _{2.5,exh} = 0.90 * PM _{exh}				
	1990	2008	2014	2020	2035	1990 ⁺		2008 ^{**}		2014 ^{***}		2020		2035		1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035
	[g/GJ]					f	[g/GJ]	f	[g/GJ]	f	[g/GJ]	f	[g/GJ]	f	[g/GJ]	[g/GJ]					[g/GJ]				
1	200	150	100	100	80	80%	140	75%	100	70%	60	70%	60	70%	50	190	143	95	95	76	180	135	90	90	72
2,3,4a,5	200	130	100	90	60	80%	140	75%	88	70%	60	70%	57	60% ^{**}	30	190	124	95	86	57	180	117	90	81	54
4b	100	80	50	40	30 [*]	50%	45	45%	32	40%	18	40%	14	30% ^{**}	8	95	76	48	38	29	90	72	45	36	27
6, 7	300	200	200	200	150	80%	200	75%	140	70%	130	70%	130	70%	90	285	190	190	190	143	270	180	180	180	135
8,9	200	100	70	60	40 [#]	40%	70	35%	32	30%	19	30%	16	25% ^{**}	9	190	95	67	57	38	180	90	63	54	36
10	300	200	200	200	200	80%	200	75%	140	70%	130	70%	130	70%	130	285	190	190	190	190	270	180	180	180	180
11a	200	150	100	90	80 [*]	30%	50	25%	34	20%	18	20%	16	20%	14	190	143	95	86	76	180	135	90	81	72
11b	100	60	40	30	25 [*]	35%	30	30%	16	25%	9	25%	7	20% ^{**}	4	95	57	38	29	24	90	54	36	27	23
12a	150	100	70	60	20	20	9	3	3	0.9	143	95	67	57	19	135	90	63	54	18	90	54	36	27	18
12b	100	60	40	30	20	15	5	2	1	0.9	95	57	38	29	19	90	54	36	27	18	90	54	36	27	18
13	150	100	70	60	25	20	9	3	3	1.1	143	95	67	57	24	135	90	63	54	23	135	90	63	54	23
14a	150	100	70	60	20	20	10%	9	5%	3	5%	3	5%	0.9	143	95	67	57	19	135	90	63	54	18	
14b	100	60	40	30	20	15	5	2	1	0.9	95	57	38	29	19	90	54	36	27	18	90	54	36	27	18
15	150	100	70	60	25	15%	20	9	3	1.1	143	95	67	57	24	135	90	63	54	23	135	90	63	54	23
16a	125	70	15	10	5	20	5	0.4	0.2	0.1	119	67	14	10	5	113	63	14	9	5	113	63	14	9	5
16b	100	60	6	5	3	15	7.5%	4	2.5%	0.1	2.5%	0.1	2.5%	0.1	95	57	6	5	3	90	54	5	5	3	
17	125	80	40	20	10	20	5	0.9	0.5	0.2	119	76	38	19	10	113	72	36	18	9	113	72	36	18	9
18	50	10	0.4	0.3	0.3	7	6%	1	1.0%	0.004	1.0%	0.003	1%	0.003	48	10	0.4	0.3	0.3	45	9	0.4	0.3	0.3	
19	100	60	2	1.4	1.4	10	7.5%	4	2.5%	0.05	2.5%	0.03	2.5% ^{##}	0.03	95	57	1.9	1.3	1.3	90	54	1.8	1.3	1.3	

#Median der Werte von der Technologie "Modern"

*25% Perzentil der verfügbaren Daten von 2020 als Wert für 2035 angenommen

**Moderate Verbesserung angenommen, die aus Erwartungen abgeschätzt wurde

##Gleicher Wert wie für Kat. 16a-17

+Annahme einer Erhöhung um 5% im Vergleich zu 2008 und gleicher Wert für alle automatischen Feuerungen >50 kW (Kat. 11b-19)

**Annahme einer Erhöhung um 5% im Vergleich zu 2014

***Annahme der gleichen Werte wie für 2020

Tabelle A. 39 TSP/PM_{exh}-Verhältnisse zur Berechnung von TSP aus PM_{exh} sowie EF von TSP und TSP-Fractionen der Jahre 1990-2035.

HES-Kat.	TSP/PM _{exh}					TSP					PM _{10,TSP} = TSP * 0.95					PM _{2.5,TSP} = TSP * 0.90				
	1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035
	[-]					[g/GJ]					[g/GJ]					[g/GJ]				
1					2	600	300	200	200	160	570	285	190	190	152	540	270	180	180	144
2-4a,5					1.5	600	260	200	180	90	570	247	190	171	86	540	234	180	162	81
4b					1.3	300	160	100	80	39	285	152	95	76	37	270	144	90	72	35
6, 7	3	2	2	2	2	900	400	400	400	300	855	380	380	380	285	810	360	360	360	270
8,9					1.5	600	200	140	120	60	570	190	133	114	57	540	180	126	108	54
10					2	900	400	400	400	400	855	380	380	380	380	810	360	360	360	360
11a					1.5	600	300	200	180	120	570	285	190	171	114	540	270	180	162	108
11b						150	66	44	33	28	143	63	42	31	27	135	59	40	30	25
12a						225	110	77	66	22	214	105	73	63	21	203	99	69	59	20
12b						150	66	44	33	22	143	63	42	31	21	135	59	40	30	20
13						225	110	77	66	28	214	105	73	63	27	203	99	69	59	25
14a						225	110	77	66	22	214	105	73	63	21	203	99	69	59	20
14b	1.5	1.1	1.1	1.1	1.1	150	66	44	33	22	143	63	42	31	21	135	59	40	30	20
15						225	110	77	66	28	214	105	73	63	27	203	99	69	59	25
16a						188	77	17	11	6	178	73	16	10.5	5.7	169	69	15.3	9.9	5.4
16b						150	66	7	6	3.3	143	63	6.7	5.2	3.1	135	59	6.3	5.0	3.0
17						188	88	44	22	11	178	84	42	21	10.5	169	79	40	20	10
18						75	11	0.44	0.33	0.33	71	10	0.4	0.31	0.31	68	10	0.40	0.30	0.30
19						150	66	2.2	1.5	1.5	143	63	2.1	1.46	1.46	135	59	1.98	1.39	1.39

Tabelle A. 40 EF von PM_{cond} und PM_{cond}-Fraktionen der Jahre 1990-2035.

HES-Kat.	PM _{cond} = TSP - PM _{exh}					PM _{10,cond} = PM _{10,TSP} - PM _{10,exh}					PM _{2.5,cond} = PM _{2.5,TSP} - PM _{2.5,exh}				
	1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035
	[g/GJ]					[g/GJ]					[g/GJ]				
1	400	150	100	100	80	380	143	95	95	76	360	135	90	90	72
2,3,4a,5	400	130	100	90	30	380	124	95	86	29	360	117	90	81	27
4b	200	80	50	40	9	190	76	48	38	9	180	72	45	36	8
6, 7	600	200	200	200	150	570	190	190	190	143	540	180	180	180	135
8,9	400	100	70	60	20	380	95	67	57	19	360	90	63	54	18
10	600	200	200	200	200	570	190	190	190	190	540	180	180	180	180
11a	400	150	100	90	40	380	143	95	86	38	360	135	90	81	36
11b	50	6	4	3	2.5	48	6	4	3	2	45	5	4	3	2
12a	75	10	7	6	2.0	72	10	7	6	2	68	9	6	5	2
12b	50	6	4	3	2.0	48	6	4	3	2	45	5	4	3	2
13	75	10	7	6	2.5	72	10	7	6	2	68	9	6	5	2
14a	75	10	7	6	2.0	72	10	7	6	2	68	9	6	5	2
14b	50	6	4	3	2.0	48	6	4	3	2	45	5	4	3	2
15	75	10	7	6	2.5	72	10	7	6	2	68	9	6	5	2
16a	63	7	1.5	1	0.5	60	7	1.4	1	0.5	57	6	1.4	0.9	0.5
16b	50	6	0.6	0.5	0.3	48	6	0.6	0.5	0.3	45	5	0.5	0.5	0.3
17	63	8	4	2	1.0	60	8	4	1.9	1.0	57	7	4	1.8	0.9
18	25	1	0.04	0.03	0.03	23	1	0.04	0.03	0.03	23	0.9	0.04	0.03	0.03
19	50	6	0.2	0.14	0.14	48	6	0.2	0.13	0.13	45	5	0.2	0.13	0.13

Tabelle A. 41 Schwermetall-EF der Jahre 1990-2035. Die EF der verschiedenen Jahre wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von PM_{exh} derselben Jahre berechnet. Teilweise wurden dann mehrere Kategorien zusammengefasst und der Mittelwert oder Median gebildet, was in der Tabelle durch die verbundenen Zellen und Fussnoten gekennzeichnet ist.

HES-Kat.	Pb					Zn					Cd					Hg				
	1990	2008	2014	2020	2035*	1990	2008	2014	2020	2035*	1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035
	[mg/GJ]					[mg/GJ]					[mg/GJ]					[mg/GJ]				
1	44	30	22	20	15	670	450	330	300	230	2.5	1.7	1.2	1	1	2	2	2	2	2
2,3,4a,5					20					300										
4b					15					230										
6, 7					20					300										
8,9			15	230																
10			15	230																
11a	18	15	7	260	225	110	1.2	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
11b																				
12a																				
12b																				
13	48	30	13	10	6	720	450	200	150	90	3.3 [#]	2.0 [#]	2.9	2	2	2	2	2	2	2
14a																				
14b																				
15																				
16a																				
16b																				
17																				
18	1000 ^{**}	200 ^{**}	140	100	100	10000 ^{**}	2400 ^{**}	1700	1200	1200	20 ^{**}	4.2 ^{**}	2.9	2	2	2	2	2	2	

*Gleiche Kategorien zusammengefasst, wie für 2020 ausser Kat. 10, für die keine Verbesserung angenommen wurde.

** Berechnet über die relative Veränderung desselben Schadstoffs der Vorperioden. Für 1990 wurde die relative Änderung zw. 2008 und 2014 (6 Jahre) auf die längere Zeitperiode von 18 Jahren extrapoliert.

[#]Median über alle Kat. ohne Kat. 18 und Kat. 16b aufgrund sehr hoher Werte.

Tabelle A. 42 PAK-EF der Jahre 1990-2035. Die EF der verschiedenen Jahre wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet. Teilweise wurden dann mehrere Kategorien zusammengefasst und der Mittelwert oder Median gebildet, was in der Tabelle durch die verbundenen Zellen und Fussnoten gekennzeichnet ist.

HES-Kat.	Bezeichnung	B(a)P, B(b)F					B(k)F, I(cd)P				
		1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035
		[mg/GJ]					[mg/GJ]				
1	Offene Cheminées	70*	60*	50*	50	40*	45*	36*	30*	30	20*
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe										
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	30**	18**	11**	10	7**	15**	7**	4**	4	3**
6, 7	Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	70*	60*	50*	50	40*	45*	36*	30*	30	20*
8,9	Stückholzkessel	70	37	32	30	20	35	19	16	15	10
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	150	125	100	100	100	90	75	60	60	60
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	30**	18**	11**	10	7**	15**	7**	4**	4	3**
11b	Pelletkessel <50 kW										
12a	Automatische Holzfeuerungen 50–300 kW a. HVB	20	9	6	5	3	10	4	3	3	2
12b	Pelletkessel 50–300 kW										
13	Automatische Holzfeuerungen 50–300 kW i. HVB										
14a	Automatische Holzfeuerungen 300–500 kW a. HVB	5	2	1	1	1	5	2	1	1	1
14b	Pelletkessel 300–500 kW										
15	Automatische Holzfeuerungen 300–500 kW i. HVB										
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB										
16b	Pelletkessel >500 kW										
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB										
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	1	0.3	0.1	0.1	0.1	1	0.3	0.1	0.1	0.1
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	5#	2#	1#	1	1#	5#	2#	1#	1#	1#

*Median über Kat. 1-4a und 5-7

**Median über Kat. 4b, 11a und 11b

#Annahme des gleichen Werts, wie für die Kat. 14a-17

Tabelle A. 43 EF für SO_x, NH₃ und Benzol der Jahre 1990-2035. Die EF der verschiedenen Jahre wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet (SO_x: nur für Kat. 19). Teilweise wurden dann mehrere Kategorien zusammengefasst und der Mittelwert oder Median gebildet, was in der Tabelle durch die verbundenen Zellen und Fussnoten gekennzeichnet ist.

HES-Kat.	NH ₃					SO _x *					Benzol									
	1990	2008	2014****	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014****	2020	2035					
	[g/GJ]					[g/GJ]					[g/GJ]									
1	7##	6+	5	5	4+	10	10	10	10	10	15	12	10	10	8					
2,3,4a,5													11							
4b	5###	4**	2	2	1.5***						3†	2†	1	1	1					
6, 7	7##	6+	5	5	4+								25**	20**	15	15	12			
8,9		4**	2	2	1.5***						10***	6***	5	5	3					
10		6+	5	5	4+						25**	20**	15	15	15					
11a		5###	4**	2	2						1.5***	3	3	3	3	3	10***	6***	2	2
11b	1																1	0.6		
12a	0.5																0.4	0.3		
12b	3†																2†	1	1	0.7
13						0.5	0.4	0.3												
14a	1					0.5	1	1	0.7											
14b							0.5	0.4	0.3											
15							1	1	0.7											
16a	1					0.5	0.4	0.4	0.3											
16b							0.2	0.2	0.2											
17		0.4	0.4	0.3																
18	3**	1	1	1	1	0.05	0.05	0.03												
19									70#	50#	20	20	15***	0.1	0.1	0.07				

*Keine Änderung der Werte im Vergleich zu 2020 angenommen. Ausnahmen sind teilweise die Kat. 18 und 19 (markiert mit separaten Fussnoten)

**Annahme von gleichem Wert wie andere automatischen Feuerungen >50 kW, da in 1990 angenommen wird, dass Abgasreinigung durch Eindüsen von Kalk bzw. Kalkhydrat als Additiv nicht Standard war.

***Verbesserung für Kat.19 wegen eventueller Zunahme von Abgasreinigung mit Eindüsen von Kalkhydrat

****Werte individuell für jede Kategorie anhand der relativen Änderung von CO berechnet. Da die CO Werte praktisch unverändert blieben gab es auch nur für Benzol sehr kleine Änderungen für 3 Kategorien (Kat. 2, 3, 4a, 5, 12b und 14b)

#Berechnet anhand der relativen Änderungen von CO derselben Jahre.

##Gleiche EFs für automatische Feuerungen (Kat. 4b und 11-19). Wert wurde berechnet anhand des relativen Unterschieds in 2008 zw. automatischen und handbeschickten Feuerungen.

###Median aller Werte von handbeschickten Feuerungen (Kat. 1-4a, 5-9) und Kat. 10.

*Median über alle handbeschickten Feuerungen (Kat. 1-4a, 5-7 sowie 10) ausser Stückholzkessel (Kat. 8, 9)

**Median über alle automatischen Feuerungen (Kat. 4b und 11a-19) inkl. Stückholzkessel (Kat. 8, 9)

*** Median über alle automatischen Feuerungen (Kat. 4b und 11a-15) inkl. Stückholzkessel (Kat. 8, 9)

° Annahme, dass es 2008 noch keine signifikante Anzahl Anlagen mit SNCR gab, die Ammoniumschlupf aufweisen können. Für 2020 beträgt der Wert 5, v.a. aufgrund der SNCR-Anlagen. Deshalb wird der Wert für 2014 für Kat.19 nicht an die CO-Entwicklung gehängt, sondern, in 1. Näherung für Berücksichtigung der zunehmenden SNCR-Anlagen, den Mittelwert zw. 2008 und 2020 von 4.5 gewählt.

° ° Keine Verbesserung im Vergleich 2020, da vor allem bei Anlagen >1 MW in Zukunft vermehrt Abgasreinigung mit Entstickung aufgrund strengerer NOx-Grenzwerte in lufthygienischen Massnahmegebieten erwartet wird.

†Median über alle automatischen Feuerungen bis 500 kW (Kat. 4b und 11b-15)

**Median über die Kategorien 6,7 und 10

***Median über die Kategorien 8,9 und 11a

Tabelle A. 44 EF für PCDD/F, PCB und HCB der Jahre 1990-2035. Die EF der verschiedenen Jahre wurden zuerst individuell für jede Kategorie über die relativen Änderungen von CO derselben Jahre berechnet. Teilweise wurden dann mehrere Kategorien zusammengefasst und der Mittelwert oder Median gebildet, was in der Tabelle durch die verbundenen Zellen und Fussnoten gekennzeichnet ist.

HES-Kat.	PCDD/F					PCB					HCB				
	1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035	1990	2008	2014	2020	2035
	[µg TEQ/GJ]					[µg/GJ]					[µg/GJ]				
1	0.8 [#]	0.6 [#]	0.50	0.50	0.40	0.09 ^{##}	0.07 ^{##}	0.06	0.06	0.05					
2,3,4a,5															
4b	0.3 [‡]	0.2 ⁺	0.05	0.05	0.04	0.04 ⁺⁺	0.02 [*]	0.01	0.01	0.01					4 ^{###}
6, 7			0.50	0.50	0.40			0.06	0.06	0.05					
8, 9	0.8 [#]	0.6 [#]	0.26	0.25	0.20	0.09 ^{##}	0.07 ^{##}	0.02	0.02	0.01					
10			0.50	0.50	0.50 ^{**}			0.06	0.06	0.06 ^{**}					5 ^{**}
11a			0.10	0.10	0.07			0.02	0.02		14 ^x	8 ^x	5.4 ^x	5	4 ^{###}
11b	0.3 [‡]	0.2 ⁺	0.05	0.05	0.03										
12a			0.06	0.05	0.04 ^{‡‡}										
12b															
13	0.4 [§]	0.3 [§]	0.10	0.10	0.08 [§]										3
14a	0.3 [‡]	0.2 ⁺	0.06	0.05	0.04 ^{‡‡}	0.04 ⁺⁺	0.02 [*]	0.01	0.01	0.01					
14b															
15	0.4 [§]	0.3 [§]	0.10	0.10	0.08 [§]			0.01	0.01						
16a	0.3 [‡]	0.2 ⁺	0.05	0.05	0.04 ^{‡‡}										
16b															
17	0.4 [§]	0.3 [§]	0.10	0.10	0.08 [§]						4 ^{xx}	3 ^{xx}	1 ^{xx}	1	0.7
18	0.3 ^{§§}	0.05	0.01	0.01	0.01										
19	1.0 ⁺⁺⁺	0.2 ⁺	0.05	0.05	0.03	0.10 ⁺⁺⁺									

[#]Maximalwert gerundet über alle Werte der Kat. 1-4a, 5 und 6-10

^{##}Median gerundet über alle Werte der Kat. 1-4a, 5 und 6-10

^{###}Mittelwert gerundet über alle Werte der Kat. 1-9 und 11a-11b

[‡]Maximalwert gerundet über alle Werte der Kat. 4b sowie 11a-12b, 14a, 14b, 16a, 16b

^{‡‡}Mittelwert gerundet über alle Werte der Kat. 11a-12b, 14a, 14b, 16a, 16b (automatische Feuerungen >50 kW a.HvB)

[§]Mittelwert über alle Werte der automatischen Feuerungen >50 kW i.HvB (Kat. 13, 15 und 17)

^{§§}Gleicher Wert für Kat. 19 wie für die anderen automatischen Feuerungen >50 kW a.HvB.

⁺Maximalwert gerundet über alle Werte der Kat. 4b sowie 11a-12b, 14a, 14b, 16a, 16b und 19 (automatische Feuerungen a. HvB und ohne WKK)

⁺⁺Median gerundet über alle Werte der Kat. 4b sowie 11a-18

⁺⁺⁺Wert von handbeschickten Feuerungen aufgerundet, um für "belasteten" Brennstoff zu gewichten

^{*}Median gerundet über alle Werte der Kat. 4b sowie 11a-19

^{**}Keine Verbesserung für diese Kategorie im Vergleich zu 2020 zu erwarten

^xMittelwert über aller Werte der Kat. 1-15

^{xx}Mittelwert über alle Werte der Kat. 16a-19

A.17 Unsicherheiten für 1990

Tabelle A. 45 Unsicherheiten (Unc) in Prozent für die obere Bandbreite der EF (EF + Unc) für das Jahr 1990 für jene Schadstoffe, für die diese im Luftschadstoff- und Klimagasemissionsinventar ausgewiesen werden müssen. Für die untere Bandbreite der EF (EF – Unc) wird generell ein Wert von 80% angenommen, da die Werte der oberen Bandbreite für alle Schadstoffe grösser als 100 % sind.

HES-Kat.	Bezeichnung	NO _x	CO	VOC*	CH ₄ , NMVOC**	PM _{exh}	PM _{2.5,exh} , PM _{10,exh} #	NH ₃	SO _x
1	Offene Cheminées								
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe								
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets								
6, 7	Einzelherde f. feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)								200%
8,9	Stückholzkessel								
10	Doppel-/Wechselbrandkessel								
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW								
11b	Pelletkessel <50 kW							300%	
12a,14a	Automat. Holzfeuerungen 50–500 kW a. HVB	200%	200%	210%	220%	200%	210%		
12b,14b	Pelletkessel 50–500 kW								
13, 15	Automat. Holzfeuerungen 50–500 kW i. HVB								300%
16a	Automat. Holzfeuerungen >500 kW a. HVB								
16b	Pelletkessel >500 kW								
17	Automat. Holzfeuerungen >500 kW i. HVB								
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen							200%	200%
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)								

*VOC = f * CO mit $\sigma_f = 50\%$

**CH₄ = α * VOC und NMVOC = (1 – α) * VOC mit $\sigma_\alpha = 50\%$

#PM_{10,exh} = f * PM_{exh} und PM_{2.5,exh} = f * PM_{exh} mit $\sigma_f = 50\%$

Tabelle A. 46 Unsicherheiten (Unc) in Prozent für die obere Bandbreite der EF (EF + Unc) für das Jahr 1990 für die verschiedenen PM-Fractionen, deren Unsicherheiten im Luftschadstoffemissionsinventar ausgewiesen werden müssen. Für die untere Bandbreite der EF (EF – Unc) wird generell ein Wert von 80% angenommen, da die Werte der oberen Bandbreite für alle Schadstoffe grösser als 100 % sind.

HES-Kat.	Bezeichnung	BC*	PM _{exh}	TSP**	PM _{2.5,TSP} , PM _{10,TSP} #	PM _{cond} ##	PM _{2.5,cond} , PM _{10,cond} †
1	Offene Cheminées						
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe						
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets						
6, 7	inzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)			220%	230%	220%	230%
8,9	Stückholzkessel						
10	Doppel-/Wechselbrandkessel						
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW						
11b	Pelletkessel <50 kW	230%	200%				
12a,14a	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW a. HVB						
12b,14b	Pelletkessel 50–500 kW						
13,15	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW i. HVB						
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HVB			210%	210%	210%	210%
16b	Pelletkessel >500 kW						
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HVB						
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen						
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)						

BC = PM_{2.5} BC/PM_{2.5} mit $\sigma_{BC/PM_{2.5}} = 100\%$

**TSP = PM_{exh}* TSP/PM_{exh} mit $\sigma_{TSP/PM_{exh}} = 100\%$ für Kat. 1-11 und $\sigma_{TSP/PM_{exh}} = 50\%$ für Kat. 12-19

PM_{10,TSP} = f * TSP und PM_{2.5,TSP} = f * TSP mit f = PM₁₀/TSP u. PM_{2.5}/TSP und $\sigma_f = 50\%$

PM_{cond} = TSP - PM_{exh}

†PM_{10,cond} = PM_{10,TSP} - PM_{10,exh} und PM_{2.5,cond} = PM_{2.5,TSP} - PM_{2.5,exh}