



Kurzbericht zu Methanemissionen aus der Holzverbrennung sowie der Wald- und Forstwirtschaft

Dr. Peter Zotter, Dr. Thomas Nussbaumer, Verenum AG, 09.11.2022

1 Hintergrund

In Anbetracht von vermehrt auftauchenden Medienposts, dass Holzfeuerungen auch erhebliche Mengen Methan verursachen und dadurch die Klimaneutralität infrage gestellt wird, soll Verenum AG in einem Kurzbericht den aktuellen Wissenstand zu Methan-Emissionen aus der Holzverbrennung zusammentragen. Dabei sollen ausserdem wenn möglich nachfolgende Fragen beantwortet werden (Verweise auf die Kapitel, wo die Antworten zu finden sind, sind nach den Fragen hier integriert):

- Was kann (Stand heute) generell zur Methanfreisetzung bei der Holzverbrennung gesagt werden? **(siehe Kapitel 2)**
- Methan tritt bei Vermoderungsprozessen (Faulgas) auf. Kann diesbezüglich beim Holz eine ähnliche Aussage gemacht werden wie beim CO₂, nämlich, dass Methan nicht nur bei der Verbrennung von Holz, sondern auch bei dessen Verrottung im Wald entsteht? **(siehe Kapitel 3)**
- Welchen mutmasslichen Einfluss dürfte die Verbrennungsqualität auf die Bildung von Methan bei der Holzverbrennung haben? **(siehe Kapitel 4-7)**
 - Können Korrelationen gegenüber CO₂ oder CO/VOC (→ NMVOC) erwartet werden? **(siehe Kapitel 6)**
 - Können möglicherweise Rückschlüsse gezogen werden auf
 - den Brennstoff (stückiges Holz / Holzschnitzel, Pellets) und verschiedene Feuerungstypen
 - Feuern im Freien (Feuerschale, Finnenkerze und andere "Wintermärchen")
 - Pyrolyse im Freien, z.B. auch mobile Low-tech-Systeme wie Kontiki etc.
 - Die Landwirtschaft argumentiert, dass mit der Beigabe von Biokohle Methan aus Stallmist und Gülle gebunden werden kann, ggf. wird aber bei der Kohleherstellung Methan freigesetzt. **(siehe Kapitel 10)**
 - offene Cheminéeheizung (z. B. seit Jahren nicht benützt, diesen Winter ohne Energienutzen wieder betrieben)
 - geprüfte Einzelraumfeuerungen nach dem S.d.T.? Methan gilt als gut brennbares Gas. Sollte dies – sofern noch im Holzgas vorhanden – in der heissen Nachverbrennungszone mit zugeführter Tertiärluft nicht ziemlich vollständig oxidieren, bzw. ausgebrannt werden?
- Sind Methanmessungen im Abgas von Holzfeuerungen bekannt? Wie könnten solche allenfalls mit verhältnismässigem Aufwand durchgeführt werden? **(siehe Kapitel 8)**

2 Gesamt-Methan Emissionen der Schweiz und Anteil der Holzverbrennung

Der Anteil von CH₄ an den gesamten Treibhausgasemissionen der Schweiz 2020 beträgt rund 10.6 % (siehe Bild 1). Wie anhand von Bild 2 zu sehen ist, stammen die CH₄-Emissionen mit 83.1 % hauptsächlich aus landwirtschaftlichen Aktivitäten (Rindviehhaltung und Hofdüngerbewirtschaftung) und aus der Abfallbewirtschaftung (10.8 %, Abfalldeponien und Abwasserreinigung). Weitere Quellen sind der Energiesektor (5.7 %), industrielle Prozesse (IPPU, 0.1 %) sowie die Landnutzung zusammen mit der Wald- und Forstwirtschaft (LULUCF, 0.3 %).

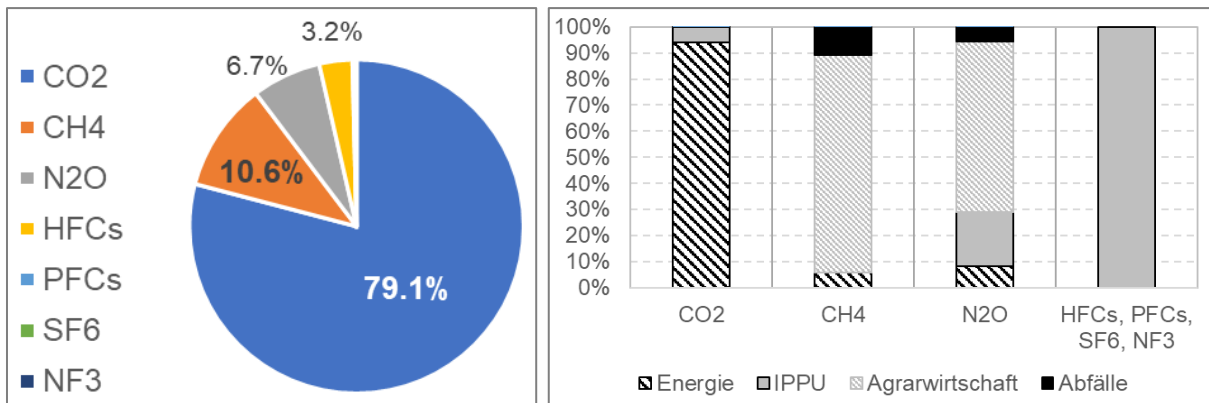


Bild 1: Anteil der verschiedenen Treibhausgase (links) und der verschiedenen Sektoren (rechts) an den gesamten Treibhausgasemissionen der Schweiz (ohne LULUCF, alles umgerechnet auf CO₂eq) 2020. Quelle: Nationales Treibhausgasinventar der Schweiz [1]. Abkürzungen: IPPU = Industrial processes and product use. LULUCF = Land Use, Land-Use Change and Forestry

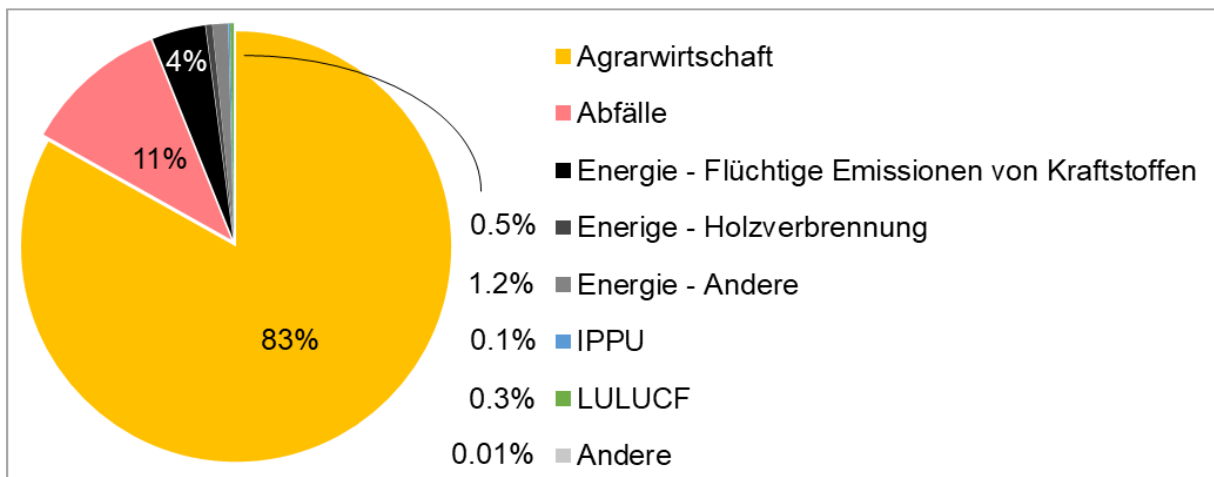


Bild 2: Anteil verschiedener Sektoren an den gesamten Methanemissionen (in CO₂eq) der Schweiz 2020. Die Unterteilung des Sektors «Verbrennung Holz» wurde anhand der Daten des Nationalen Treibhausgasinventar der Schweiz [1], Daten zum Bruttoverbrauch Holz (effektive Jahreswerte) in [PJ] aus der Holzenergiestatistik 2021 [2] und den CH₄-Emissionsfaktoren für Holzfeuerungen in [g/GJ] aus Zotter et al. 2022 [3] berechnet. Die hier verwendeten Daten aus [2] und [3] (siehe Tabelle 1) werden auch im Nationalen Treibhausgasinventar der Schweiz [1] verwendet, dort wird jedoch der Anteil der Holzverbrennung nicht separat ausgewiesen, sondern nur generell Daten zum Sektor «1 Energy – 1A Fuel Combustion».

Eine weitere Unterteilung der CH₄-Emissionen des Energiesektors (Bild 2) zeigt, dass die Holzverbrennung nur mit 0.5 % zu den gesamten CH₄-Emissionen der Schweiz 2020 beiträgt. Im Sektor Landnutzung zusammen mit der Wald- und Forstwirtschaft (LULUCF) sind zudem CH₄-Emissionen von Wald- und Wiesenbränden berücksichtigt.

Fazit:

Der Anteil der CH₄-Emissionen der Holzverbrennung an den gesamten CH₄-Emissionen der Schweiz ist mit 0.5 % sehr gering und somit als wenig relevant einzuschätzen. Wenn zu den der CH₄-Emissionen der Holzverbrennung noch diejenigen aus dem Sektor LULUCF addiert werden (unter der Annahme, dass die gesamten CH₄-Emissionen in diesem Sektor aus Waldbränden stammen würden), wäre der Anteil der gesamten CH₄-Emissionen der Holzverbrennung immer noch < 1 %.

3 Entsteht beim Abbau des Holzes in der Natur Methan?

Der Abbau von Holz ist ein langsamer Prozess und es dauert je nach Holzart und Mikroklima (Temperatur, Feuchtigkeit) Jahrzehnte bis Jahrhunderte, bis von einem Baumstamm nur mehr Erde übrig bleibt. Nach [4] lässt sich der Holzabbau sich in drei hauptsächliche Phasen einteilen:

1. Besiedlung von Frischholz (Besiedlungsphase)
2. Der Zerfall des Holzes
3. Vom Mulm zum Boden (Humifizierungsphase)

In der ersten Phase dringen Pionierinsekten in den frisch abgestorbenen Holzkörper ein. Die Insekten lösen erste Teile der Rinde vom Holz und erschliessen durch ihre Bohr- und Fresstätigkeit das Holz für weitere Insekten und für Pilze. Bereits in dieser ersten Phase beginnt auch der mikrobielle Abbau des Holzes. Die Besiedlungsphase dauert typischerweise ungefähr zwei Jahre. In der zweiten Phase fallen Äste und Zweige ab, die Rinde löst sich vom Stamm und das Holz beginnt sich zu zersetzen. In der dritten Phase zerfällt das Holz und geht langsam in Boden über.

Holz besteht zu weit über 90% aus Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Der Anteil an Cellulose wird von Pilzen und Bakterien abgebaut, Lignin dagegen im Wesentlichen nur von Pilzen¹. Ein pilzlicher Holzabbau wird meist als Holzfäule bezeichnet.

Im Gegensatz zu anderen Vorgängen in der Natur wird das Faulen von Holz (Holzfäule) hauptsächlich durch Pilze verursacht. Da fast alle Pilzarten aerobe Bedingungen (Umgebung mit Luftsauerstoff) benötigen und Methan fast ausschliesslich unter anaeroben Bedingungen gebildet wird² kann davon ausgegangen werden, dass bei der Holzersetzung keine relevanten Methan-Emissionen anfallen, zudem die Holzersetzung in der Schweiz fast ausschliesslich oberirdisch stattfindet und keine grossen Feucht- und Mooregebiete, wie in tropischen und subtropischen Waldgebieten, vorhanden sind. Es werden auch im IPCC [5] und im Schweizer Treibhausgasinventar [1] keine CH₄-Emissionen der Wald- und Forstwirtschaft rapportiert bzw. berücksichtigt.

¹ Quelle: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/holzabbau/32299>

² Anaerobe Atmung durch Methanogenese von methanogenen und obligaten Anaerobiern (Methanbildnern) Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Anaerobie>
Methanogene werden Mikroorganismen bezeichnet, bei deren Energiestoffwechsel Methan gebildet wird (Methanogenese) Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Methanbildner>

Gänzlich ausgeschlossen können Methan-Emissionen von Totholz und Baumstümpfen unter gewissen und sehr lokalen Bedingungen jedoch nicht. Zum einen kann es tief innerhalb des Holzes lokal zu anaeroben Bedingungen und CH₄-Bildung durch Bakterien kommen. Andererseits wurde in der Literatur gezeigt, dass CH₄, welches im Boden entstanden ist, über Baumstümpfe in die Atmosphäre abgegeben wird³.

Fazit:

Die Holzersetzung findet hauptsächlich durch Pilze statt, was als Holzfäule bezeichnet wird. Da Methan fast ausschliesslich unter anaeroben Bedingungen gebildet wird, Pilze jedoch aerobe Bedingungen benötigen, kann davon ausgegangen werden, dass bei der Holzersetzung keine relevante Methan-Emissionen anfallen. Auch im IPCC [5] und im Schweizer Treibhausgasinventar [1] werden keine CH₄-Emissionen der Wald- und Forstwirtschaft rapportiert bzw. berücksichtigt.

4 Entstehung von Methan bei der Holzverbrennung

Bei der Holzverbrennung laufen folgende Teilprozesse teilweise gleichzeitig und teilweise nacheinander ab [6]:

- Trocknung des Brennstoffs
- Zersetzung des Holzes zu Gasen und Kohlenstoff durch Temperatureinwirkung (ab 250 °C) (Pyrolyse)
- Vergasung des Holzes mit Primärluft zu Gasen und festem Kohlenstoff (ab 250 °C)
- Vergasung des Kohlenstoffs (ab 500°C)
- Oxidation der brennbaren Gase zu Kohlendioxid und Wasser bei Temperaturen ab 700 °C bis rund 1500 °C

Die Holzverbrennung ist ein zweistufiger Vorgang mit Vergasung des Holzes als erstem und Oxidation von Gasen als zweitem Teilprozess (Abbildung 4). Die Schadstoffe können entsprechend diesen Teilschritten unterteilt werden in eine erste Gruppe der Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung: Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe (C_xH_y, z.B. VOCs und CH₄), Teer und Russ und eine zweite Gruppe der Schadstoffe aus vollständiger Verbrennung: Kohlendioxid, Stickoxide und der anorganische Anteil an Staub, der aus Spurenelementen im Holz entsteht und vorwiegend salzartig ist. Produkte einer unvollständigen Verbrennung können durch hohe Verbrennungstemperatur, gute Vermischung zwischen brennbaren Gasen und Verbrennungsluft sowie einer ausreichenden Verweilzeit in der heissen Zone vermieden werden. Schadstoffe, die bei einer vollständigen Verbrennung gebildet werden, müssen akzeptiert werden (insbesondere CO₂ aus Holz) oder durch Sekundärmassnahmen verringert werden (in erster Linie Abscheidung von anorganischem Feinstaub durch Feinstaubabscheider und in zweiter Linie Reduktion von Brennstoffstickoxiden bei Grossanlagen mit Entstickungsverfahren).

Fazit:

Methan entsteht bei der Holzverbrennung während der Pyrolyse und Vergasung. Je nach Qualität des Brennstoffs und Verbrennungsführung kann CH₄ fast vollständig oxidiert werden oder verbleibt zu einem

³ Quelle: <https://www.sciencedaily.com/releases/2017/03/170330190304.htm>

gewissen Grad als Schadstoff der unvollständigen Verbrennung im Abgas. Daher ist bei handbeschickten Feuerungen und offenen Feuern (Feuerschalen, Lagerfeuer, Waldbrand, etc.) mit höheren CH₄-Emissionen zu rechnen als bei automatischen Feuerungen (siehe auch Kapitel 5).

5 Methan-Emissionen von verschiedenen Feuerungskategorien

In der Schweizer Holzenergiestatistik (HES) [2] werden 20 verschiedene Feuerungskategorien (HES-Kat.) unterschieden (siehe Tabelle 1). Diese Unterscheidung wird auch für die Berechnungen im Schweizer Treibhausgasinventar [1] herangezogen. Für die verschiedenen HES-Kat. wurde zudem in [3] eine Aktualisierung der Emissionsfaktoren vorgenommen (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Daten zum Holzverbrauch 2020 [2] und zu den CH₄-Emissionsfaktoren [3]. Die Daten zum Holzverbrauch sind jene aus Tabelle K aus [2] zum «Bruttoverbrauch Holz, effektive Jahreswerte». Die CH₄-Emissionen in [t/a] wurden mit einem CO₂eq von 25 gemäss [1] in [CO₂eq kt/a] umgerechnet.
Abkürzungen: HES = Schweizer Holzenergiestatistik [2]; Kat. = Feuerungskategorie gemäss HES; a.HvB = ausserhalb Holzverarbeitungsbetrieben, i.HvB = innerhalb Holzverarbeitungsbetrieben

Kat HES	Bezeichnung Kat. HES	Anzahl Anlagen [#]	Holzverbrauch [PJ]	CH ₄		
				[g/GJ]	[t/a]	[CO ₂ eq kt/a]
1	Offene Cheminées	13781	0.06	100	5.8	0.15
2,3,4a,5	Raumheizer für feste Brennstoffe	434541	6.38	90	574	14.3
4b	Raumheizer zur Verfeuerung von Holzpellets	11037	0.18	6.0	1.1	0.03
6	Einzelherde für feste Brennstoffe	19450	0.34	130	44.7	1.12
7	Zentralheizungsherde	4123	0.33	130	43.0	1.08
8,9	Stückholzkessel	23875	2.32	30	69.6	1.74
10	Doppel-/Wechselbrandkessel	1460	0.04	130	5.5	0.14
11a	Automatische Holzfeuerungen <50 kW	2814	0.56	20	11.2	0.28
11b	Pelletkessel <50 kW (Kat. 11b)	16529	2.49	6.0	14.9	0.37
12a, 14a	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW a. HvB	5331	4.92	10.0	49.2	1.23
12b, 14b	Pelletkessel 50–500 kW	2245	1.96	3.0	5.9	0.15
13, 15	Automatische Holzfeuerungen 50–500 kW i. HvB	2577	1.96	10.0	19.6	0.49
16a	Automatische Holzfeuerungen >500 kW a. HvB	912	7.02	3.0	21.1	0.53
16b	Pelletkessel >500 kW	64	0.35	1.0	0.4	0.01
17	Automatische Holzfeuerungen >500 kW i. HvB	297	2.45	3.0	7.3	0.18
18	Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen	23	6.15	0.2	1.2	0.03
19	Anlagen für erneuerbare Abfälle (ohne Ziff. 71)	77	7.24	0.6	4.3	0.11
20	Holz in Kehrrechtverwertungsanlagen	30	4.17	0.2	0.8	0.02
1-20	Total	539166	48.9		879	22.0
1-6	Einzelraumfeuerungen	478809	7.0		625	15.6
7-11b	Gebäudeheizungen	48801	5.7		144	3.6
12-20	Automatische Feuerungen > 50 kW	11556	36.2		110	2.7

Wie anhand von Tabelle 1 zu erkennen ist, gibt es einen klaren Trend hin von höheren zu tieferen CH₄-Emissionsfaktoren von handbeschickten Einzelraumfeuerungen, über automatische Kessel <50 kW zur Gebäudeheizung bis hin zu grossen automatischen Feuerungen >500 kW (Heizkraftwerke, Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen und Kehrrechtverbrennungsanlagen). Zum Beispiel ist der CH₄-Emissionsfaktor

für offene Cheminées ein Faktor 100 höher als für Pellet-Feuerungen >500 kW und ein Faktor 500 höher als für Holz-Wärme-Kraft-Kopplungsanlagen.

In Bild 3 sind die CH₄-Emissionen der verschiedenen Feuerungskategorien gegenübergestellt. Wie man erkennen kann, machen 2020 die Einzelraumfeuerungen (HES-Kat. 1-6) mit 89 % den grössten Anteil der installierten Anlagen aus, jedoch werden in diesen Anlagen nur 14 % des gesamten Holzes verbrannt. Trotz des geringen Holzverbrauchs (14 %) sind die Einzelraumfeuerungen (HES-Kat. 1-6) aufgrund der deutlich höheren CH₄-Emissionsfaktoren für 71 % der gesamten CH₄-Emissionen der Holzverbrennung verantwortlich.

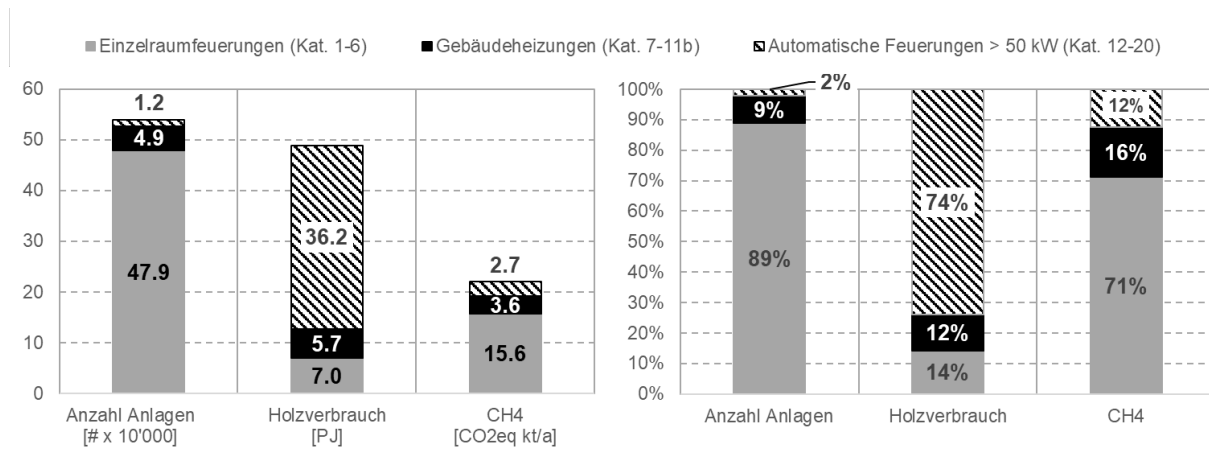


Bild 3: Gegenüberstellung von Anzahl Anlagen, Holzverbrauch und CH₄ Emissionen von verschiedenen Feuerungskategorien. Die detaillierten Daten sind in Tabelle 1 zu finden.

Fazit:

Die CH₄-Emissionen aus der Holzverbrennung variieren deutlich für verschiedene Feuerungskategorien. Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, ist die Verbrennungsqualität bei handbeschickten Einzelraumfeuerungen (ausgenommen moderne Pelletöfen) deutlich schlechter als bei automatischen Feuerungen und somit sind auch die CH₄-Emissionen von handbeschickten Feuerungen deutlich höher (Faktor 9 bis 500). Aufgrund der deutlich höheren CH₄-Emissionsfaktoren von handbeschickten Feuerungen sind diese für 71 % der gesamten CH₄-Emissionen der Holzverbrennung verantwortlich, obwohl nur 14 % des gesamten Schweizer Holzverbrauchs in diesen Feuerungskategorien anfällt.

6 Korrelation von Methan- mit Kohlenmonoxid und VOC-Emissionen der Holzverbrennung

Da Kohlenmonoxid (CO) und flüchtige gasförmigen organische Verbindungen (volatile organic compounds, VOC) grösstenteils in den gleichen Teilschritten der Holzverbrennung entstehen und als Produkte der unvollständigen Verbrennung bezeichnet werden (siehe Kapitel 4) kann in der Regel ein gleichläufiges Verhalten zwischen CO und VOC angenommen werden. Dies wurde bereits in zahlreichen Studien festgestellt (siehe ein Beispiel in Bild 5). VOC-Emissionen werden in CH₄-Emissionen und Nicht-Methan-VOC-Emissionen (NMVCO) unterteilt und somit können dieselben Annahmen zur Entstehung von CH₄, wie für VOC getroffen werden. Es besteht somit in der Regel eine gute Gleichläufigkeit

von CH₄ mit VOC sowie mit CO, was ebenfalls schon in einigen Studien gezeigt wurde (siehe ein Beispiel in Bild 5).

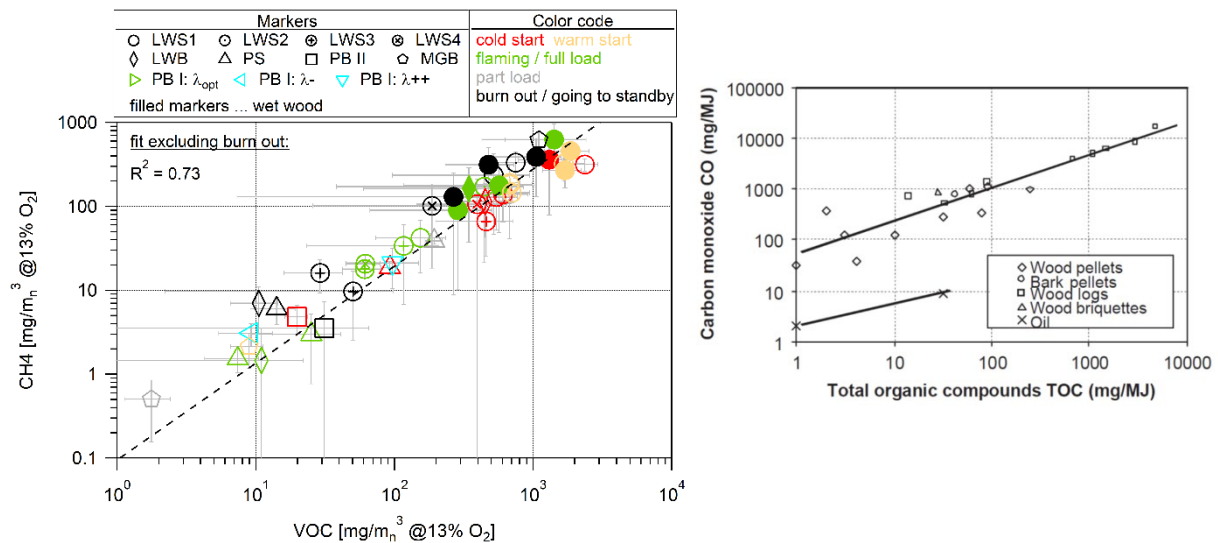


Bild 4: Links: Korrelation zwischen CH₄ und VOC für 4 verschiedene Stückholzöfen (4-8 kW), 1 Pelletofen (6 kW), 2 Pelletkessel (15 kW und 30 kW) und 1 Vorschubrostfeuerung betrieben mit Hackschnitzel (150 kW). VOC und CH₄ wurden mit einem FID (Flammen-Ionisations-Detektor) mit Nicht-Methan-Konverter gemessen. Für jede Feuerung sind zudem verschiedene Betriebszustände zu sehen. Grafik wurde mit Daten aus [7] erstellt.
Rechts: Korrelation zwischen CO und VOC aus [8] für 2 alte und 3 moderne Stückholzkessel, 3 Pelletöfen, 1 Pelletkessel und 2 Ölkessel. VOC wurde mit einem FID gemessen.

Aufgrund der Gleichläufigkeit von CO mit VOC und VOC mit CH₄ wurden die VOC- und CH₄-Emissionsfaktoren in [3] über die Faktoren VOC/CO und CH₄/VOC berechnet, die anhand zahlreichen Literaturdaten bestimmt wurden [3]. Der Faktor CH₄/VOC wird für alle Feuerungskategorien als konstant angenommen, was auch durch Bild 5 bestätigt wird. Trotz der Gleichläufigkeit von CO und VOC kann nicht immer von einem konstanten Verhältnis zwischen den beiden Schadstoffkomponenten ausgegangen werden. Einerseits ist die Kinetik des Abbaus von CO und VOC nicht identisch und andererseits unterscheidet sich der Einfluss der verschiedenen Abbrandphasen zwischen den einzelnen Feuerungskategorien. So verursacht der Chargenbetrieb der handbeschildeten Feuerungen einen grossen Anteil an Anfahr- und Ausbrandphasen, die sich unterschiedlich auf die Emissionswerte auswirken. Die Anfahrphase mit noch kalten Feuerraumbedingungen verursacht hohe Emissionen an VOC und an CO. Die Ausbrandphase verursacht demgegenüber hohe CO-Emissionen, aber nicht notwendigerweise hohe organische Emissionen, da bei idealer Betriebsweise im Ausbrand kaum noch organischer Brennstoff vorhanden ist, sondern nur noch nahezu reiner Kohlenstoff vergast, was grundsätzlich zur Bildung von CO führt, ohne dass VOC entstehen. Die Ausbrandphase verursacht deshalb hohe CO-Emissionen bei in der Regel niedrigen organischen Verbindungen. Für kleine, handbeschildete Anlagen, die viele und lange Ausbrandphasen aufweisen, wird deshalb ein grösserer VOC/CO Faktor angenommen, als für automatische Anlagen, die weniger Anfahr- und Ausbrandphasen mit hohen CO-Frachten aufweisen. In [3] werden VOC/CO Faktoren von 13% für handbeschildete Stückholzfeuerungen, 5 %-7 % für automatische Feuerungen <50 kW und 3 %-7 % für automatische Feuerungen > 50 kW mit tieferen Werten für KWK-Anlagen (HES-Kat. 18) und grosse Anlagen für erneuerbare Abfälle (HES-Kat. 19). Ausserdem wird dieses Verhalten bei der Beurteilung von handbeschildeten Holzfeuerungen zu einem gewissen Teil

damit berücksichtigt, dass die Anfeuerungsphase als besonders kritisch gilt und besonders streng beurteilt wird (z.B. maximal 15 Minuten sichtbarer Rauch nach dem Anfeuern; im Ausbrand kann CO längere Zeit hoch sein, ohne dass dies mit hohen Gehalten an VOC und Rauch verbunden sein muss).

Fazit:

In der Regel besteht ein gleichläufiges Verhalten zwischen CO und VOC, CO und CH₄ sowie CH₄ und VOC, da diese Komponenten grösstenteils in den gleichen Teilschritten der Holzverbrennung entstehen und als Produkte der unvollständigen Verbrennung gelten. Da jedoch das Verhältnis von VOC zu CO zum Beispiel in der Anfahrphase anders (nämlich grösser) ist als in der Ausbrandphase, gibt es auch Unterschiede zwischen verschiedenen Feuerungstypen, wobei für automatische Feuerungen von tieferen Verhältnissen VOC/CO als für handbeschickte Feuerungen ausgegangen wird.

7 Methan aus der Holzvergasung und Pflanzenkohleherstellung

Bei der Holzvergasung und der Pflanzenkohleherstellung durch Pyrolyse, Vergasung oder Verkohlung entsteht ein Produktgas, welches oft grosse Mengen an Methan enthält [9-11].

Bei Holzvergasungsanlagen wird das Produktgas jedoch entweder in einem Gasmotor genutzt oder in einem Heizkessel verbrannt. Im Regelbetrieb einer Holzvergasungsanlage gibt es daher am Kaminaustritt keine relevanten CH₄-Emissionen. Im Fall von Störungen wird das Produktgas entweder über eine Gasfackel verbrannt oder der Abgasvolumenstrom der Gesamtanlage ist so gering, dass das Produktgas praktisch nicht in die Umgebung entweicht, wie bei einer Praxismessung gezeigt wurde [9].

In industriellen Feuerungen zur Pflanzenkohleherstellung wird das bei der Pyrolyse oder Vergasung entstehende Produktgas in der Feuerung nachverbrannt. Da diese Anlagen den LRV-Grenzwert für CO in der Regel deutlich einhalten können, kann davon ausgegangen werden, dass am Kaminaustritt nur geringfügige CH₄-Emissionen anfallen, die in der Grössenordnung der CH₄-Emissionsfaktoren für die HES-Kat. 12-17 liegen dürften (siehe Tabelle 1 in Kapitel 5).

Bei kleinen mobilen und teilweise selbst hergestellten Systemen zur Pflanzenkohleproduktion, wie zum Beispiel dem «Kon Tiki», wird das Produktgas der Pyrolyse und Vergasung zwar zu einem gewissen Mass nachverbrannt [10], die Ausbrandqualität ist jedoch nicht mit derjenigen von automatischen Feuerungen >50 kW zu vergleichen, was aus zahlreichen Videos vom Betrieb eines Kon-Tikis ersichtlich ist⁴. In [10] sind Resultate einer Emissionsmessung von Kon-Tiki Abgasen dokumentiert und ein mittlerer Emissionsfaktor für CH₄ von 30 [g/kg Kohle] angegeben. Mit der Annahme, von einer Kohleausbeute von 30% (das heisst, das aus 1 kg Holz 0.33 kg Kohle entstehen) und einem Heizwert von 14.6 MJ/kg (aus [12] für den Brennstoff und Wassergehalt für die HES-Kat. offene Cheminées) ergibt sich für den Kon-Tiki ein CH₄-Emissionsfaktor von 616 g/GJ was rund einen Faktor 6 höher ist als für die Holzverbrennung in offenen Cheminées.

Fazit:

Holzvergasungsanlagen und industrielle Feuerungen zur Pflanzenkohleherstellung emittieren kein bzw. nur geringe Mengen an CH₄, welche in der Grössenordnung der CH₄-Emissionen von automatischen

⁴ <https://www.ithaka-institut.org/de/ct/108-Kon-Tiki-Videos>

Holzfeuerungen liegen. Bei kleinen mobilen und teilweise selbst hergestellten Systemen zur Pflanzkohleproduktion, wie zum Beispiel dem «Kon Tiki», entstehen aufgrund der schlechteren Qualität der Nachverbrennung des Produktgases CH_4 -Emissionen, die deutlich höher sind als die höchsten Werte für Holzfeuerungen (offenen Cheminées und Holzkochherde).

8 Messung von Methan-Emissionen von Holzfeuerungen

Die Messung von Methan ist mit verschiedenen Methoden möglich, darunter nachfolgende:

- Infrarot (IR) Detektion
- Flammenionisationsdetektor (FID)
- Diodenlaser-Spektrometer (TDL)

Es gibt zahlreiche Hersteller die Methan-Messgeräte für verschiedenen Anwendungen anbieten, darunter auch für die Emissionsmessung von Feuerungen⁵.

Die meisten Messgeräte basieren auf IR-Detektion oder FID. FIDs messen die Summe der Kohlenwasserstoffe in Luft und in heißen Abgasen. Zur CH_4 -Messung mittels FID sind die FIDs mit einem Nicht-Methan-Cutter ausgerüstet, der abwechselnd VOC und CH_4 misst. Es gibt sowohl tragbare Messgeräte als auch Versionen, die in einen Messturm zur kontinuierlichen Emissionsüberwachung eingebaut werden können.

Fazit:

Die Messung von Methan im heißen Abgas von Holzfeuerungen ist Stand der Technik und es sind zahlreiche Messgeräte dafür vorhanden. Zum Beispiel besitzt die Fachgruppe Bioenergie der HSLU einen CH_4 /NMVOC FID und führt mit diesem bereits seit vielen Jahren Messungen durch.

9 Auswirkungen auf das Klima durch Emissionen der Holzverbrennung sowie der Öl- und Gasverbrennung

In Zusammenhang mit den Auswirkungen auf das Klima wird hauptsächlich von Treibhausgasemissionen gesprochen. Das wichtigste anthropogene Treibhausgas ist CO_2 gefolgt von CH_4 , welches ein bei einer Betrachtungszeit von 100 Jahren ein 25-fach höheres Erwärmungspotenzial aufweist als CO_2 [1].

Neben den Treibhausgasemissionen beeinflussen aber auch Aerosole das Klima. Aerosole wirken dabei

- a) direkt (1. Lichtstreuung und dadurch Kühlung der Atmosphäre, hauptsächlich durch Salze und andere organische Aerosole oder 2. Absorption von Licht und dadurch Erwärmung der Atmosphäre, hauptsächlich durch Russ mit dem Hauptbestandteil Black Carbon (BC)) oder
- b) indirekt (1. generell Einfluss auf die Wolkenbildung, wirkt im Durchschnitt kühlend auf die Atmosphäre und 2. Russ verringert die Schnee-Albedo was zu einer Erwärmung führt).

⁵ siehe z.B. <https://www.directindustry.de/industrie-hersteller/methan-analysator-89788.html>

Um die Auswirkung auf das Klima von Holzfeuerungen und fossilen Feuerungen zu vergleichen ist in Tabelle 2 ein einfaches Berechnungsbeispiel angeführt. Holz- sowie fossile Feuerungen emittieren die Treibhausgase CO₂ und CH₄, aber auch BC. Wie Tabelle 2 zeigt, sind die CH₄- und BC-Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen <50 kW deutlich höher als jene von fossilen Heizkesseln <50 kW. Bei den fossilen Feuerungen fallen jedoch die CO₂-Emissionen aufgrund der viel grösseren Grössenordnungen viel stärker ins Gewicht als die CH₄- und BC Emissionen (g/MJ für CO₂ gegenüber mg/MJ für CH₄, siehe Tabelle 2) und Holzfeuerungen gelten zudem als CO₂-neutral (somit werden deren CO₂-Emissionen im Berechnungsbeispiel auch nicht berücksichtigt).

Aufgrund des sehr hohen Erwärmungspotenzials von BC (460 gegenüber CO₂) und den im Vergleich zu fossilen Feuerungen relevanten BC-Emissionen von der Holzfeuerungen zeigt sich, dass

- 1) gut betriebene automatischen Holzfeuerungen deutlich kleinere Auswirkungen auf das Klima haben als fossile Feuerungen und
- 2) handbeschickte Feuerungen aufgrund der hohen BC-Emissionen nicht unbedingt besser sind für das Klima als fossile Feuerungen.

Tabelle 2 Einfaches Berechnungsbeispiel zum Vergleich der Treibhausgasemissionen von Feuerungen mit fossilen Brennstoffen mit Holzfeuerungen. Die Emissionsfaktoren für CO₂ sowie CH₄ und BC für Ergas und Heizöl wurden aus dem Faktenblatt Emissionsfaktoren des BAFU [12] entnommen und die Emissionsfaktoren für die Holzfeuerungen aus Tabelle 1. Um die schlechteren Wirkungsgrade der Holzfeuerungen zu berücksichtigen, wurde angenommen, dass für Stückholz und Pelletkessel 10 %, für Raumheizer 15 % und für Zentralheizungsherde 30 % mehr Brennstoffinput notwendig ist. Die CH₄-Emissionen wurden mit einem CO₂eq von 25 und die BC-Emissionen mit einem CO₂eq von 460 gemäss [5] in [CO₂eq g] umgerechnet.

Feuerung	CH ₄	CO ₂	BC	Brennstoff Input ^{##}	Treibhausgas-Emissionen total*
	[mg/MJ]	[g/MJ]	[mg/MJ]	[MJ]	[g]
Erdgas < 50 kW	6	56.6	0.1**	1	56.8
Heizöl < 50 kW	1	73.7	0.2**	1	73.8
Pelletkessel < 50 kW	6	92.0 [#]	7	1.1	3.7 [#]
Stückholzkessel < 50 kW	30	92.0 [#]	16	1.1	8.9 [#]
Raumheizer für feste Brennstoffe	90	92.0 [#]	57	1.15	32.7 [#]
Einzelherde für feste Brennstoffe (inkl. Z-Herde)	130	92.0 [#]	130	1.3	82.0 [#]

*Treibhausgas-Emissionen-total = CH₄ [mg/MJ] / 1000 * Brennstoff-Input [MJ] * 25 + CO₂ [g/MJ] * Brennstoff-Input [MJ] + BC [mg/MJ] / 1000 * Brennstoff-Input [MJ] * 460

**Annahme, dass die in [12] angeführten Staubemissionen zu 100 % BC-Emissionen sind.

[#]Aufgrund der „zeitverzögerten CO₂-Neutralität“ der Holzverbrennung werden die CO₂-Emissionen vernachlässigt

^{##}Um den schlechteren Wirkungsgrad für Holzfeuerungen zu berücksichtigen, wurde eine grösserer Brennstoffinput als für fossile Feuerungen angenommen.

Fazit:

Aufgrund der Annahme der CO₂-Neutralität von Holzfeuerungen und den viel höheren CO₂-Emissionen im Vergleich zu CH₄- und BC-Emissionen (g/MJ für CO₂ gegenüber mg/MJ für CH₄ und BC) haben gut betriebene automatischen Holzfeuerungen deutlich kleinere Auswirkungen auf das Klima als fossile Feuerungen. Aufgrund der deutlich höheren BC-Emissionen von handbeschickten Holzfeuerungen und des im Vergleich zu CO₂ sehr hohen Erwärmungspotenzials von BC (Faktor 460) sind diese Feuerungen jedoch nicht unbedingt besser für das Klima als fossile Feuerungen.

10 Gegenüberstellung der CH₄-Emissionen der Pflanzenkohleherstellung mit der CH₄-Reduktion durch die Pflanzenkohlenutzung

Mögliche Auswirkungen auf CH₄-Emissionen durch die Pflanzenkohlenutzung in der Landwirtschaft ergeben sich bei der Ausbringung in den Boden sowie dem Einsatz in der Tierhaltung.

Die Datenlage zum Einfluss von Pflanzenkohle auf CH₄-Emissionen von Landwirtschaftsböden ist noch unklar. In [13] werden Studien genannt, die sowohl keine signifikanten Veränderungen der CH₄-Emissionen der Böden durch Pflanzenkohle zeigen als auch solche, die eine signifikante Erhöhung der CH₄-Emissionen von 15 % finden. In [13] wird abschliessend jedoch festgehalten, dass die CH₄-Emissionen aus schweizerischen Böden im Allgemeinen sehr gering sind, sodass es in der gesamten Klimabilanz der schweizerischen Landwirtschaft keine relevante Rolle spielt.

Im Gegensatz dazu ist das CH₄-Einsparungspotential in der Tierhaltung gross. Dies umfasst gemäss [13] enterische CH₄-Emissionen von Wiederkäuern, die Ausgasung von CH₄ aus Einstreu und Gülle- sowie die CH₄-Freisetzung während der Mistlagerung, bis hin zur Ausbringung von Hofdüngern. Die Landwirtschaft macht in der Schweiz 83 % der Methanemissionen aus, davon stammen 75 % von der Verdauung von Wiederkäuern und 16 % vom Gülle- und Mistmanagement (entspricht 14 % der Gesamt-CH₄-Emissionen) [1]. Es gibt gemäss [13] im Moment noch zu wenig Daten, um das Potenzial der CH₄-Reduktion in der Tierhaltung zu quantifizieren. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass das Reduktionspotenzial aufgrund der generell hohen Anteile der CH₄-Emissionen in der Tierhaltung viel grösser ist als die zusätzlichen CH₄-Emissionen bei der Pflanzenkohleherstellung.

Fazit:

Aufgrund der vorliegenden Grobabschätzung, die auf einer unsicheren Daten basiert, wird davon ausgegangen, dass das Potenzial zur CH₄-Reduktion durch die Pflanzenkohlenutzung in der Tierhaltung vermutlich grösser ist als die zusätzlichen CH₄-Emissionen, die bei der Pflanzenkohleherstellung entstehen. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass die CH₄-Emissionen der Pflanzenkohleherstellung stark variieren kann und durch die Technologie und die Betriebsweise stark beeinflusst werden kann. Es wird deshalb empfohlen, einerseits die Datenbasis durch vertiefende Untersuchungen zu präzisieren und gleichzeitig sicherzustellen, dass unnötige Emissionen an CH₄ und Luftschadstoffen wie insbesondere NMVOC durch Pflanzenkohleproduktionsanlagen vermieden werden.

11 Literatur

- [1] FOEN, *Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2020: National Inventory Report and reporting tables (CRF). Submission of April 2022 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol.* Federal Office for the Environment, Bern. <http://www.climatereporting.ch>. 2022.
- [2] Schweizerische Holzenergiestatistik. *Erhebung für das Jahr 2020.* Basler & Hofmann im Auftrag des Bundesamtes für Energie (BFE), Bern. 2021.
- [3] Zotter, P. and T. Nussbaumer, *Emissionsfaktoren von Holzfeuerungen – Aktualisierung und Ergänzung 2020.* Verenum, im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt [Bericht wird Ende 2022 auf der Webpage des BAFU verfügbar sein]. 2022.
- [4] WSL - Informationshomepage zu "Totholz und alte Bäume – kennen, schützen, fördern" - "Phasen des Holzabbaus", verfügbar unter: <https://www.spektrum.de/lexikon/biologie/holzabbau/32299>.
- [5] IPCC, 2007: *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- [6] Nussbaumer, Th.: *Holzenergie – Übersicht, Energie du bois – Aperçu général,* Schweizer Baudokumentation, Blauen, August 2000, 1–8, verfügbar unter: <http://www.verenum.ch/Publikationen/Baudoc/1862601.pdf>.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] A., L., Z. P., and N. T., *Anlagen zur Vergasung und Verkohlung von Holz und anderer fester Biomasse Teil 2 – Praxisuntersuchung zum Betrieb und Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung.* 2022.
- [10] Cornelissen, G., et al., *Emissions and Char Quality of Flame-Curtain "Kon Tiki" Kilns for Farmer-Scale Charcoal/Biochar Production.* PLOS ONE, 2016. **11**(5): p. e0154617.
- [11] T., N., L. A., and Z. P., *Anlagen zur Vergasung und Verkohlung von Holz und anderer fester Biomasse Teil 1 – Grundlagen und Empfehlungen zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung.* 2022.
- [12] 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_eneuerungen.pdf. 2015.
- [13] Schmidt, H.P., et al., *Pflanzkohle in der Landwirtschaft : Hintergründe zur Düngerzulassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken.* Agroscope Science, 112, 2021, 1-71., 2021.