verenum
Ingenieurbüro für
Verfahrens-, Energie- und Umwelttechnik

Langzeitmessung bei Kaskadenanlagen mit Holzkesseln

Teil 2 – Anzahl Starts von Praxisanlagen und Frachtsimulationen

Schlussbericht – publizierte Version

Autoren:

Peter Zotter

Jürgen Good

Thomas Nussbaumer

Auftraggeber:

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

Holzfeuerungen Schweiz

Kantone AG, BE, GR, LU, SG und ZH

Verenum AG, Zürich, 06.07.2026

Inhalt

1 Definitionen 3

2 Zusammenfassung 4

2.1 Anzahl EIN-Schaltungen (Anzahl Starts) von Praxisanlagen 4

2.2 Frachtsimulationen 5

2.2.1 Vorgehen 5

2.2.2 Resultate 6

2.3 Beurteilungsschema und maximale Anzahl Starts 8

2.4 Schlussfolgerungen und Einordnung der Resultate 10

3 Ausgangslage und Zielsetzung 13

4 Anzahl Starts von Praxisanlagen 14

4.1 Datenerhebung zur Anzahl Starts von Praxisanlagen 14

4.2 Auswertung Anzahl Starts von Praxisanlangen 16

4.3 Resultate 16

4.3.1 Anzahl Starts 16

4.3.2 Einfluss Wärmespeicher 21

4.3.3 Weitere Resultate 22

4.4 Beurteilungsschema und maximal zulässige Anzahl Starts pro Jahr 24

4.4.1 Finaler Vorschlag – mit Unterscheidung für verschiedene Startzähler 24

4.4.2 Vorgehen, wenn die maximale Anzahl Starts nicht eingehalten werden kann 26

4.5 Vorschlag zu maximal zulässigen Anzahl Starts von anderen Projekteilnehmenden (Stand Ende 2022) 28

5 Simulation der mittleren Konzentrationen von Staub und CO 29

5.1 Vorgehen - Allgemein 29

5.2 Einfluss der Emissionen im Regelbetrieb auf die Gesamtemissionen der im Projektteil 1 gemessenen Anlagen 30

5.2.1 Vorgehen 30

5.2.2 Resultate 33

5.3 Einfluss der Anlagenkonfiguration 35

5.3.1 Praxisbeispiel 1 (Standort A) 35

5.3.2 Praxisbeispiel 2 (Anlage am Standort B) 39

6 Literatur 44

7 Anhang 45

7.1 Beurteilungsschema – ohne Unterscheidung für verschiedene Startzähler (nicht angewendet) 45

7.1.1 Vorgehen zu Vorschlag 1, wenn die max. Anzahl Starts nicht eingehalten werden kann 46

7.2 Beurteilungskriterium aus Projekt Teil 1 48

7.2.1 Übersicht und Bewertung der verschiedenen Beurteilungskriterien 48

7.2.2 Zusammenfassung der Stellungnahmen zu Beurteilungskriterien aus Teil 1 50

1 Definitionen

CO	Kohlenmonoxid in mg/m^3
CO_n	CO in mg/m^3 normiert auf Bezugssauerstoff-Gehalt
EA	Elektroabscheider
EGW	Emissionsgrenzwert
FWL	Feuerungswärmeleistung
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
LZM	Langzeitmessungen nach QS-Support Methode
NWL	Nennwärmeleistung
#	Anzahl
PM_{grav}	Gesamtstaub, gemessen gravimetrisch im heissen Abgas nach LRV
Q_F	prozentuale Feuerungswärmeleistung
Q_{soll}	Leistungsvorgabe in % in der Kesselsteuerung
QMH	QM Holzheizwerke
QSH	QS Support Holzfeuerungen
V_{AG}	Betriebsabgasvolumenstrom
$V_{AG,n}$	Abgasvolumenstrom bei Normbedingungen
M	Wassergehalt
T_{AG}	Abgastemperatur
λ	Luftüberschusszahl
PM_{Fracht} [g]	Gesamt-Staubfracht
CO_{Fracht} [g]	Gesamte CO-Fracht
PS	Pellets
IBN	Inbetriebnahme
HS	Holzhackschnitzel
Q10	10 % Perzentil
Q75	75 % Perzentil.
Q90	90 % Perzentil
HZ	Betrieb nur während der Heizsaison
GJB	Ganzjahresbetrieb

Anzahl Starts… Dieser Begriff wird verwendet für die Anzahl «EIN-Schaltungen». In der Cercl'Air Empfehlung Nr. 31p wird der Begriff EIN-Schaltung pro Jahr verwendet. Eine EIN-Schaltung bezeichnet einen Anfahrvorgang. Ein Anfahrvorgang ist in der Cercl'Air Empfehlung Nr. 31p definiert, wenn bei Wärmebedarf mit der Zündung angefeuert oder aus dem Glutbettunterhaltsbetrieb angefahren wird, so dass ein Feuerbetrieb erreicht wird.

2 Zusammenfassung

2.1 Anzahl EIN-Schaltungen (Anzahl Starts) von Praxisanlagen

Insgesamt haben sich neun Mitgliederfirmen (Lieferanten/Hersteller) des Verbandes Holzfeuerungen Schweiz an der Datenerhebung beteiligt. Für die statistische Auswertung der Anzahl Starts pro Jahr stehen verwertbare Daten von 179 Anlagen mit insgesamt 476 Feuerungen zur Verfügung. Die Daten wurden entsprechend der Nennwärmeleistung der Gesamtanlage in die Leistungskategorien der LRV (<70 kW, 70-500 kW, 500-1000 kW und >1 MW) eingeteilt. Zudem wurden sie nach Feuerungstyp (industrielle Feuerung oder Seriengerät), Anzahl der Kessel pro Anlage, Brennstoffart und Art des Startzählers klassifiziert. Nach dieser Aufteilung ist die Anzahl der Anlagen in einigen Kategorien jedoch relativ gering. Zudem zeigt sich in bestimmten Kategorien eine Dominanz von wenigen Herstellern und Lieferanten. Die statistische Auswertung zeigt folgende Ergebnisse:

- Die Anzahl Starts pro Jahr nimmt mit zunehmender Anlagengrösse ab.
- Anlagen mit industriellen Feuerungen weisen eine deutlich geringere Anzahl Starts pro Jahr auf als Anlagen mit Seriengeräten.
- Die Anzahl Starts pro Jahr von Anlagen mit Seriengeräten <70 kW ist höher als für Seriengeräte >70 kW.
- Es ist ein deutlicher Unterschied der Anzahl Starts pro Jahr zwischen dem Ganzjahresbetrieb (GJB) und dem Betrieb während Heizsaison (HZ) erkennbar.
- Für Anlagen mit Seriengeräten wurde kein bzw. nur ein sehr geringer Unterschied zwischen Pellets und Hackschnitzel festgestellt.
- Seriengeräte, die alle Starts zählen, weisen eine höhere Anzahl Starts pro Jahr auf als Seriengeräte, die nur die Anzahl Zündungen zählen.
- Es gibt nur einen geringfügigen Unterschied für industrielle Feuerungen zwischen 500-1000 kW und > 1 MW. Daher wurden diese beiden Kategorien in der Folge zusammen ausgewertet.
- Die statistische Auswertung ergibt folgende Bandbreite für die Anzahl Starts pro Jahr aller Kessel einer Anlage (Median bis Q75, siehe Tabelle 1):
    - Seriengeräte
        - Einkesselanlage
            - Betrieb nur während der Heizsaison (HZ): 306 – 697
            - Ganzjahresbetrieb (GJB): 1073 – 1717
        - Zweikesselanlage im Ganzjahresbetrieb: 1155 – 1725
        - Dreikesselanlage im Ganzjahresbetrieb: 1391 – 3001
        - ca. 500-600 zusätzliche Starts pro Jahr für dem Ganzjahresbetrieb im Vergleich zum Betrieb nur während der Heizsaison
        - ca. 200-500 zusätzliche Starts pro Jahr für jeden weiteren Kessel
    - Industrielle Feuerungen
        - Bei Ein- und Zweikesselanlagen 37% bis 62% tiefere Anzahl Starts für als Seriengeräte (Leistungskategoiren 70-500 kW und >500 kW).

Ausserdem wurde der Einfluss des Wärmespeichervolumens auf die Anzahl Starts untersucht. Dies zeigt, dass die Anzahl Starts pro Jahr mit zunehmenden Speichervolumen abnimmt. Diese Reduktion ist jedoch gering und wird zudem von anderen Faktoren, wie dem Feuerungstyp und der Anlagengrösse, beeinflusst. Ein Grossteil der Anlagen erfüllt bereits die Vorgaben zum Speichervolumen der LRV (59 %) bzw. von QM Holzheizwerke (71 %). Wenn also die Vorgaben von QM Holzheizwerke bzw. der LRV erfüllt sind, haben andere Massnahmen wie z.B. eine Betriebsoptimierung vermutlich einen deutlich grösseren Einfluss auf die Anzahl Starts als ein Speichervolumen, welches deutlich grösser ist als von QM Holzheizwerke und LRV verlangt wird.

Folgende weiteren statistische Auswertungen wurden durchgeführt:

- Für Mehrkesselanlagen wurde untersucht, wie die Leistung auf die einzelnen Feuerungen aufgeteilt ist. Tritt bei Zweikesselanlagen oft die «klassische» Leistungsaufteilung von 1/3 zu 2/3 auf, oder zeigt sich bei Mehrkesselanlagen eine gleichmässigere Leistungsaufteilung pro Feuerung?
- Basierend auf den Betriebsstunden und den Gesamtstarts wurde die durchschnittliche Laufzeit pro Startvorgang ermittelt.
- Für Mehrkesselanlagen wurde eruiert, wie gross der Anteil der Anlagen im Ganzjahresbetrieb ist.

- Für Mehrkesselanlagen wurde analysiert, wie oft die gesamte Leistung der Einzelkessel dazu führt, dass die Feuerungswärmeleistung einen Wert erreicht, welcher einen Wechsel in die nächsthöhere LRV-Kategorie bedingt.

*Tabelle 1 Auszug aus der statistischen Auswertung. *Bei den Seriengeräte gab es nur 1 Anlage mit Ganzjahresbetrieb (GJB) und einem Wassergehalt >35 %.*

Leistung Einzelkessel	Brenn-stoff	Wasser-gehalt	Technologie		Anzahl Starts pro Jahr und Anlage				
					1-Kessel		2-Kessel	3-Kessel	4-Kessel
					HZ	GJB	GJB	GJB	GJB
70-500 kW	Pellets & HS*	< 35%*	Alle Seriengeräte	Anzahl	12	28	34	12	2
				Median	580	1154	1250	1647	1597
				Q75	657	1431	1601	2478	1753
	Pellets & HS*	< 35%*	Seriengeräte, die nur Zündungen zählen	Anzahl	4	10	14	6	1
				Median	306	1073	1155	1391	1910
				Q75	402	1158	1373	1577	-
	Pellets & HS*	< 35%*	Seriengeräte, die alle Starts zählen	Anzahl	8	18	20	6	1
				Median	609	1349	1408	2181	1284
				Q75	697	1717	1725	3001	-
	Pellets & HS*	beliebig	industriell	Anzahl	8	6	2	-	-
				Median	310	433	500	-	-
				Q75	413	777	503	-	-
>500 kW	Pellets & HS*	beliebig	industriell	Anzahl	17	8	27	1	1
				Median	256	380	418	322	943
				Q75	419	522	704	322	943

2.2 Frachtsimulationen

2.2.1 Vorgehen

Um die Auswirkungen einer potenziell erhöhten Anzahl Starts von Seriengeräten auf die Gesamtemissionen zu analysieren, wurden Simulationen durchgeführt. Das Hauptziel dieser Simulationen besteht darin, die über den gesamten Betrachtungszeitraum gemittelten Emissionen von Staub und CO (einschliesslich aller Phasen: Regelbetrieb, An- und Abfahren sowie Standby) zwischen verschiedenen Anlagenkonzepten zu vergleichen. Dabei werden insbesondere industrielle Feuerungen und Mehrkessel-Seriengeräte gegenübergestellt. Bei Mehrkesselanlagen kann die Gesamtanlagenleistung im Vergleich zur Leistung der Einzelkessel einen Übergang in die nächsthöhere LRV-Kategorie bewirken, in der tiefere Grenzwerte gelten. Aus diesem Grund wurde auch der Einfluss von verschiedenen Emissionsniveaus im Regelbetrieb auf die Gesamtemissionen simuliert.

Für solche Simulationen sind eine Vielzahl von Annahmen und Eingabeparametern erforderlich. Um die Komplexität zu reduzieren, konzentrierten sich die Simulationen auf dieselben zwei Anlagen, bei denen im Rahmen des Projekts Teil 1 bereits Langzeit-Emissionsmessungen für CO, gravimetrische Staubemissionen (PM_{grav}) sowie Abgasvolumenstrom-Messungen während verschiedener Betriebsphasen durchgeführt wurden. Die Simulationen wurden somit für den Zeitraum der Messungen (jeweils ca. 18 Tage) für folgende Varianten durchgeführt:

1. Einfluss der Emissionen im Regelbetrieb auf die Gesamtemissionen
   - Die Simulationen wurden für die in Projekt Teil 1 untersuchten Anlagen durchgeführt, für den gleichen Zeitraum der Messungen 2022 sowie mit dem während der Messung angetroffenen Betriebsverhalten.
   - Es wurden die über den gesamten Betrachtungszeitraum gemittelten Staub- und CO-Emissionen mit verschiedenen Emissionen im Regelbetrieb und den An- und Abfahrphasen berechnet und mit den Werten der Messperiode 2022 verglichen.
2. Einfluss der Anlagenkonfiguration und der Anzahl Starts
   - Zweikessel Pelletanlage (Standort A)
     - Eine industrielle Einkesselanlage, die mit Holzhackschnitzel betrieben wird und die gleiche Energiemenge wie während des Messzeitraums 2022 erzeugt, ersetzt die Zweikessel Pelletanlage mit Seriengeräten.

- Vierkessel Kaskadenanlage mit Holzhackschnitzel (Standort B)
  - Eine industrielle Zweikesselanlage mit 1'320 kW (Leistungsaufteilung 1/3 und 2/3 angenommen), die mit Holzhackschnitzel betrieben wird und die gleiche Energiemenge wie während des Messzeitraums 2022 erzeugt, ersetzt die Vierkessel Hackschnitzelanlage mit Seriengeräten (4x 330 kW).
- Folgende Variationen wurden simuliert:
  - Annahme der Emissionen eines «Best-» und «Worst-Case» für Staub und CO sowohl für den Regelbetrieb als auch für die An- und Abfahrphasen bei beiden Anlagen.
  - Jeweils 3 unterschiedliche Anzahl Starts pro Tag der Gesamtanlage bis hin zum Dauerbetrieb (0 Starts pro Tag)
  - 3 Variationen für unterschiedlich lange An- und Abfahrvorgänge

Mit den Simulationen ist nur ein Vergleich der mittleren Konzentration für Staub und CO einer simulierten Anlage mit den gemessenen Werten aus Projekt Teil 1 möglich. Eine Unterscheidung für verschiedene Staubkomponenten bzw. eine Gewichtung unterschiedlicher Stäube (Russ und organische Verbindungen sowie anorganische Salze), die in verschiedenen Betriebsphasen entstehen, ist nicht möglich.

2.2.2 Resultate

2.2.2.1 Einfluss der Emissionen im Regelbetrieb auf die Gesamtemissionen

Die Resultate für die mittleren Staub- und CO-Emissionen zeigen, dass die Emissionen während des Regelbetriebs einen grösseren Einfluss haben als die Emissionen während der An- und Abfahrphasen. Eine Änderung der mittleren Staubemissionen der Gesamtanlage während des Regelbetriebs von 10 mg/m^3 für die 2-Kessel Pelletanlage (Standort A) und 11 mg/m^3 für die 4-Kessel Hackschnitzelanlage (Standort B) auf 17 mg/m^3 bzw. auf 34 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 entsprechen den Werten der LRV-Messungen des Kantons Zürich für Pelletkessel <500 kW mit und ohne Feinstaubabscheider) führt zu einer Zunahme der mittleren Gesamtstaubemissionen um 40 % bzw. 140 % für die 2-Kessel Pelletanlage und 31% bzw. 126 % für die 4-Kessel Hackschnitzelanlage im Vergleich zur Messung 2022. Eine Erhöhung der Staubemissionen während der An- und Abfahrphasen führt hingegen nur zu einer Zunahme der mittleren Gesamtstaubemissionen von max. 26% für die 2-Kesselanlage und 16 % für die 4-Kesselanlage. Für CO ergibt eine Erhöhung der mittleren Emissionen im Regelbetrieb (auf den maximalen Mittelwert der Messwerte von 360 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 für alle Kessel) für die 4-Kessel Hackschnitzelanlage eine Änderung der mittleren CO-Konzentration von max. 35 % im Vergleich zur Messung 2022. Eine Erhöhung der mittleren Emissionen der An- und Abfahrphasen hingegen ergibt nur eine maximal 7 % höhere mittlere CO-Konzentration. Der geringe Einfluss der Emissionen der An- und Abfahrphasen lässt sich wie folgt begründen:

- Das An- und Abfahren ist im Mittel kurz, vor allem das Anfahren, was in einem nur geringen Anteil dieser Phasen an der Gesamtzeit resultiert.
- Zudem weisen diese Phasen einen geringeren Volumenstrom auf (47–56 % geringer für die 2-Kesselanlage und durchschnittlich 35 % geringer für die 4-Kesselanlage im Vergleich zum Regelbetrieb).
- Obwohl es während der Messung insgesamt 113 An- und Abfahrvorgänge für die 2-Kessel Pelletanlage und 120 für die 4-Kessel Hackschnitzelanlage gab, machen diese Betriebsphasen je nach Kessel nur max. 23 % für die 2-Kesselanlage und max. 6.5 % für die 4-Kesselanlage der gesamten Zeit aus.

Die Ergebnisse dieser Frachtsimulation zeigen somit, dass, um möglichst tiefe Gesamtemissionen bei Mehrkesselanlagen zu erreichen, die Emissionen im Regelbetrieb möglichst tief sein sollten. Dies kann bei Mehrkesselanlagen massgeblich durch den anzuwendenden Emissionsgrenzwert (EGW) beeinflusst werden, z.B. wenn nicht die Leistung der Einzelkessel, sondern eine für die Gesamtanlage repräsentative Leistung herangezogen wird. Bei Mehrkesselanlagen mit einer Gesamtleistung von 500-1000 kW mit Einzelkesselleistungen von <500 kW könnte ein EGW von 20 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 anstelle des EGWs von 50 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 somit zu Anforderungen an den Brennstoff bzw. den Kesseltyp sowie die Abgasreinigung führen, welche die Gesamtemissionen verringern.

2.2.2.2 Einfluss der Anlagenkonfiguration und der Anzahl Starts

Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringere Anzahl Starts der simulierten industriellen Anlagen zu einer geringeren mittleren Konzentration für Staub und CO führt.

- Am Standort A führt die Reduktion von 2.9 Starts pro Tag der industriellen Einkesselanlage auf 0 Starts pro Tag (Dauerbetrieb) unter der Annahme der Emissionen des «Best-Case» zu einer Reduktion der mittleren Staubkonzentration des gesamten Betrachtungszeitraums um 2.1 mg/m^3 (-20 %) und für CO um 95 mg/m^3 (-74 %). Für die Staubemissionen des «Worst-Case» ergibt sich eine Reduktion von 8.6 mg/m^3 (-21 %) und für CO um 136 mg/m^3 (-35 %).
- Am Standort B wurde aufgrund der Anlagengrösse von 1'320 kW für die simulierten zwei industriellen Feuerungen mit einer Leistungsaufteilung von 1/3 und 2/3 eine maximal tägliche Anzahl Stars von 2 angenommen. Eine Reduktion von 2 Starts pro Tag auf 0 Starts pro Tag (Dauerbetrieb) führt unter der Annahme der Emissionen des «Best-Case» zu einer Reduktion der mittleren Staubkonzentration des gesamten Betrachtungszeitraums um 1.2 mg/m^3 (-14 %) und für CO um 71 mg/m^3 (-37 %). Für die Staubemissionen des «Worst-Case» ergibt sich eine Reduktion von 6.3 mg/m^3 (-21 %) und für CO um 358 mg/m^3 (-59 %).

Weiter zeigen die Simulationsergebnisse, dass längere An- und Abfahrphasen zu einer höheren mittleren Konzentration des gesamten Betrachtungszeitraums führen.

- Am Standort A ergibt sich für die simulierte industrielle Feuerung für Staub durch längere An- und Abfahrphasen (0.14 h und 1.1 h verlängert auf 0.4 h und 1.3h) eine maximale Erhöhung der über den Betrachtungszeitrum gemittelten Emissionen um 3.8 mg/m^3 (+22 %) für Staub und 40 mg/m^3 (+11 %) für CO.
- Beim Standort B führt die Verlängerung der An- und Abfahrphasen (0.19 h und 0.4 h verlängert auf 0.4 h und 1.3h) zu einer maximalen Erhöhung der mittleren Emissionen um 4.5 mg/m^3 (+18 %) für Staub und 240 mg/m^3 (+65 %) für CO.

Den grössten Einfluss auf die mittleren Emissionen des gesamten Betrachtungszeitraums haben jedoch die Emissionen im Regelbetrieb.

- Am Standort A ergibt sich für die simulierte industrielle Feuerung für die Staubemissionen des «Worst-Case» eine Erhöhung der mittleren Emissionen des gesamten Betrachtungszeitraums um 30 mg/m^3, was einer Verdreifachung im Vergleich zum «Best-Case» entspricht. Für CO zeigt sich eine Erhöhung für die Emissionen des «Worst-Case» im Vergleich zum «Best-Case» um 230 mg/m^3 (+150 %).
- Am Standort B verursacht die simulierte Zweikessel Anlage mit industriellen Feuerungen für die Staubemissionen des «Worst-Case» eine Erhöhung der mittleren Emissionen des gesamten Betrachtungszeitraums um 17 mg/m^3, was rund einer Verdopplung im Vergleich zum «Best-Case» entspricht. Für CO zeigt sich eine Erhöhung für die Emissionen des «Worst-Case» im Vergleich zum «Best-Case» um rund 200 mg/m^3 (+95 %).

Der Vergleich der simulierten industriellen Anlagen mit den in Projekt Teil 1 in 2022 gemessen Anlagen mit Seriengeräte zeigt, dass die Resultate stark von den Eingabeparametern der Simulation abhängen. Je nach Annahme weisen entweder die bestehenden Anlagen mit Seriengeräten oder die simulierten industriellen Feuerungen tiefere mittlere Konzentrationen auf.

- Am Standort A ergibt sich eine Bandbreite für die Simulationsergebnisse für die mittleren Staubemissionen der industriellen Einkessel Hackschnitzelanlage im Vergleich zur Messung der Zweikessel Pelletanlage mit Seriengeräten von einer Reduktion um 61 % (Dauerbetrieb mit den Emissionen des «Best-Case») bis zu einer Erhöhung um 98 % (2.9 Starts pro Tag mit den Emissionen des «Worst-Case» und den längsten An- und Abfahrphasen). Für die mittleren CO-Emissionen ergibt sich eine Bandbreite von -78 % bis zu +129 %.
- Am Standort B ergibt sich eine Bandbreite für die Simulationsergebnisse für die mittleren Staubemissionen der industriellen Zweikessel im Vergleich zur Messung der Vierkessel Hackschnitzelanlage mit Seriengeräten von einer Reduktion um 63 % (Dauerbetrieb mit den Emissionen des «Best-Case») bis zu einer Erhöhung um 49 % (2 Starts pro Tag mit den Emissionen des «Worst-Case» und den längsten An- und Abfahrphasen). Für die mittleren CO-Emissionen ergibt sich eine Bandbreite von -77 % bis zu +17 %.

Die Resultate zeigen somit, dass eine höhere Anzahl Starts zwar zu einer höheren mittleren Staub- und CO-Konzentration führten, aber die Emissionen im Regelbetrieb einen deutlich grösseren Einfluss haben. Eine industrielle Feuerung, die im Regelbetrieb dieselben Emissionen hat wie eine Mehrkesselanlage mit Seriengeräten, wird aufgrund der geringeren Anzahl Starts tiefere Gesamtemissionen aufweisen. Weist die industrielle Feuerung im Regelbetrieb jedoch deutlich höhere Emissionen auf als die Seriengeräte, kann eine Mehrkesselanlage mit Seriengeräten trotz einer höheren Anzahl Starts jedoch insgesamt eine tiefere mittlere Emissionsfracht aufweisen. Diese Betrachtungsweise berücksichtigt jedoch nicht, dass bei Mehrkesselanlagen mit Seriengeräten aufgrund der potenziellen ungünstigen Überlagerung verschiedener Betriebsphasen die Emissionen der Gesamtanlage zu einem signifikanten Anteil der Zeit (>20 %) den EGW überschreiten können.

2.3 Beurteilungsschema und maximale Anzahl Starts

Verenum AG erarbeitete zwei verschiedene Vorschläge zur maximalen Anzahl Starts pro Jahr. Nach einer Vernehmlassung durch alle Projektteilnehmer wurde folgendes Beurteilungsschema (Tabelle 2) festgelegt:

Tabelle 2 Finaler Vorschlag von Verenum AG zum Beurteilungsschema und maximalen Anzahl Starts pro Jahr und Anlage. mit Unterscheidung, für die verschiedenen Startzähler.
Legende: HZ…Betrieb nur während der Heizsaison, GJB…Ganzjahresbetrieb, HS...Holzhackschnitzel

Leistung Einzelkessel[#]	Startzähler	Brennstoff	Wassergehalt	Anzahl Starts pro Jahr und Anlage*			
				1-Kessel		2-Kessel	3-Kessel
				HZ	GJB	GJB	GJB
70–500 kW	Nur Anzahl Zündungen	Pellets & HS	≤ 25 %	**400**	**1100**	**1400**	**1700**
		HS	> 25 %	**350**	**900**	**1150**	**1400**
	Alle Starts	Pellets & HS	≤ 25 %	**700**	**1500**	**2000**	**2500**
		HS	> 25 %	**550**	**1200**	**1600**	**2000**
>500 kW	Alle Starts	Pellets & HS	beliebig	**400**	**600**	**1000**	**1250**

[#]Wenn bei Mehrkesselanlagen (≥ 2 Kessel) ein Kessel einer höheren Leistungsklassen eingebaut wird, gilt für alle Feuerungen die Anzahl Starts der kleineren Leistungsklasse.

*Für Anlagen mit ≥4 Kesseln soll eine Einzelfallbeurteilung vorgenommen und die max. Anzahl Starts pro Jahr individuell festgelegt werden.

Nachfolgend werden die wichtigsten Kriterien und Grundlagen des Beurteilungsschemas in Tabelle 2 beschrieben:

- Die Einteilung in die Leistungskategorien wurde in Anlehnung an die Kategorien der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) gewählt und die festgelegten maximalen Starts pro Jahr beruhen mehrheitlich auf dem 75 % Perzentil (Q75) der statistischen Auswertung (siehe Tabelle 1) der zur Verfügung gestellten Daten zu Anzahl Starts der Praxisanlagen.
- Da die statistische Auswertung einen deutlichen Unterschied der Anzahl Starts pro Jahr für Anlagen mit unterschiedlichen Startzählern zeigt, wird eine Unterscheidung zwischen der maximalen Anzahl Starts pro Jahr für Anlagen, die alle Starts erfassen und solchen, die lediglich Zündungen zählen eingeführt.
- Bei Feuerungen von 70-500 kW, die Brennstoff mit einem Wassergehalt >25 % verwenden, soll eine um 20% tiefere Anzahl Starts gelten als für Feuerungen, die trockene Hackschnitzel (≤25 %) oder Pellets einsetzen.
- Aufgrund der entweder geringen Datenmenge oder der grossen Bandbreite der Anzahl Starts pro Jahr für Mehrkesselanlagen (≥2 Kessel) wird die Zahl pro Kessel hier grösstenteils um 2/3 der Anzahl Starts einer Einkesselanlage mit Betrieb ausschließlich während der Heizsaison derselben Leistungsklasse angehoben.
- Aufgrund der geringen Verbreitung von Anlagen mit vier oder mehr Kesseln (gemäss statistischer Auswertung und mündlicher Auskunft der am Projekt beteiligten kantonalen Vollzugsbehörden) wird das Beurteilungsschema nur für Anlagen mit maximal drei Kesseln festgelegt. Für Anlagen mit ≥4 Kesseln soll eine Einzelfallbeurteilung vorgenommen und die maximale Anzahl Starts pro Jahr individuell festgelegt werden.
- Wenn die maximale Anzahl Starts pro Jahr überschritten werden, soll ein mehrstufiges Verfahren angewendet werden (Bild 1). Am Ende dieses Verfahrens sollen bei der Anlagenbeurteilung die maximale Anzahl Starts pro Jahr nicht isoliert betrachtet werden, sondern es sollen weitere Faktoren wie z.B. die Einhaltung der LRV-Grenzwerte, das Wärmespeichervolumen und die Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders berücksichtigt werden.

Dieser Bericht und das vorgeschlagene Beurteilungsschema wird vom Cercl'Air als Grundlage verwendet, um die Cercl'Air Empfehlung 31p und die zukünftige Beurteilung von Kaskadenanlagen und auch für Einkesselanlagen, anzupassen. Gemäss der Stellungnahme des Cercl'Air ist es nicht das Ziel, dass die Anzahl Starts

analog dem Nichteinhalten von LRV-Emissionsbegrenzungen (CO- / Staub-EGW, Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders oder Speichervolumen) behandelt werden und direkt eine Sanierungsverfügung auslösen. Sie sollen als Sekundärkriterium dienen, um die möglichen Ursachen zu behandeln (vorbehältlich abweichender Bestimmungen in kantonalen Massnahmenplänen). Die maximal zulässige Anzahl Starts pro Jahr sollen hauptsächlich als Indikator für das Betriebsverhalten von Holzfeuerungsanlagen herangezogen werden, um Anlagen mit Optimierungsbedarf zu identifizieren. Es ist jedoch nicht auszuschliessen, dass es in manchen Kantonen zu einem von der neuen Cercl'Air Empfehlung 31p abweichendem Vorgehen kommt, da einzelne Vertreter andere Kriterien (z.B. Grenzwerte und Brennstoff, dafür keine Feuerungsgrösse) für die Einteilung in Kategorien höher gewichten.

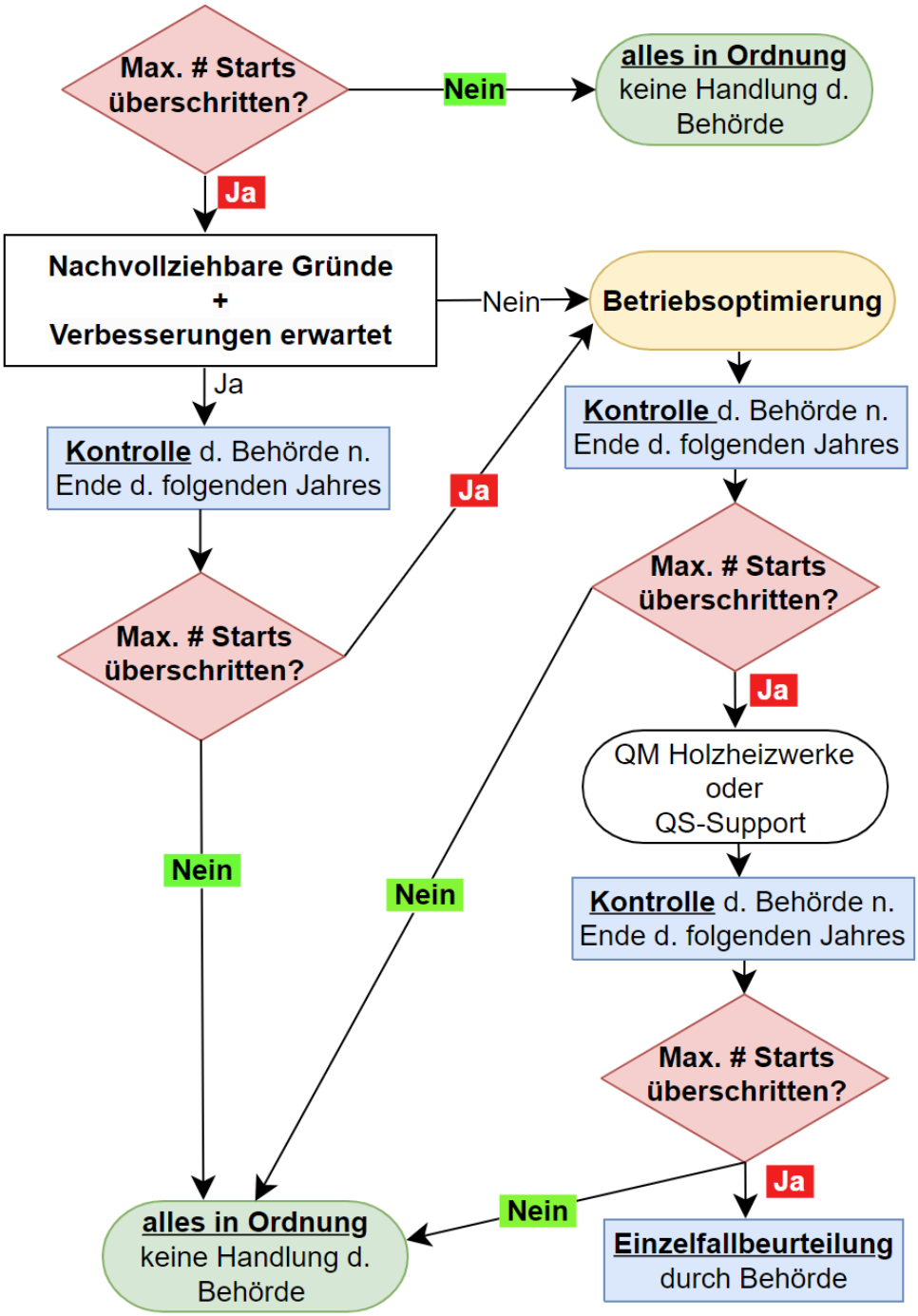


Bild 1 *Flussdiagramm zum Vorgehen, wenn die maximal zulässige Anzahl Starts pro Jahr überschritten wird.*

2.4 Schlussfolgerungen und Einordnung der Resultate

Die Reihenfolge der nachfolgenden Aufzählung entspricht keiner Gewichtung, sondern dient ausschliesslich zum Referenzieren verschiedener Aussagen.

1. Datenerhebung der Anzahl Starts pro Jahr von Praxisanlagen und Beurteilungsschema
   a. Die festgelegte maximal zulässige Anzahl Starts pro Jahr wurden anhand von Daten von 179 Anlagen mit insgesamt 476 Feuerungen bestimmt.
   b. Nach Aufteilung der Daten in die verschiedenen Kategorien ist die Anzahl der Anlagen in einigen Kategorien jedoch relativ gering. Zudem zeigen sich in bestimmten Kategorien eine Dominanz von wenigen Herstellern und Lieferanten.
   c. Industrielle Feuerungen weisen deutlich geringere Anzahl Starts pro Jahr auf als Seriengeräte.
   d. Seriengeräte, die alle Starts zählen, weisen eine höhere Anzahl Starts pro Jahr auf als Seriengeräte, die nur die Anzahl Zündungen zählen.
   e. Die maximal zulässigen Anzahl Starts pro Jahr von 500, die in der aktuellen Version der Cercl'Air Empfehlung 31p angeführt sind, kann gemäss Daten der Praxisanlagen nur von Einkesselanlagen mit Betrieb nur während der Heizsaison eingehalten werden. Mehrkesselanlagen, aber auch Einkesselanlagen mit Ganzjahresbetrieb, weisen eine grössere Anzahl Starts als 500 Starts pro Jahr und Anlage auf. Dies trifft nicht nur für Seriengeräte zu, sondern auch für industrielle Feuerungen.
   f. Die Einteilung in verschiedene Kategorien des festgelegten Beurteilungsschemas basiert auf einem Mehrheitsbeschluss aller Projektteilnehmenden. Einzelne Vertreter gewichten jedoch andere Kriterien (z.B. Grenzwerte und Brennstoff) für die Einteilung in Kategorien höher. Daher ist noch nicht abzusehen, wie einheitlich in Zukunft die maximal zulässigen Anzahl Starts von den verschiedenen Behörden vollzogen werden.

2. Frachtsimulationen
   a. Eine Reduktion der Anzahl Starts führt zu einer Reduktion der Gesamtemissionen.
   b. Eine längere Dauer eines An- und Abfahrvorganges führt zu höheren Gesamtemissionen.
   c. Den grössten Einfluss auf die simulierten Gesamtemissionen haben jedoch die Emissionen in den verschiedenen Betriebsphasen. Die Emissionen im Regelbetrieb sowie der Anteil dieser Betriebsphase und der Anteil im Standby an der Gesamtzeit haben dabei den grössten Effekt. Trotz der zahlreichen Starts bei den zwei untersuchten Anlagen (7 pro Tag für die Vierkessel Hackschnitzelanlage und 6 pro Tag für die Zweikessel Pelletanlage) betrug der Anteil der An- und Abfahrphasen max. 21 % an der Gesamtzeit. Zudem ist der Volumenstrom in diesen Phasen nur ca. ein Drittel im Vergleich zur Volllleistung.

3. Erkenntnisse aus Projekt Teil 1 und dem Projekt HoKaSpe [1]
   a. Auf einer Anlage konnte durch Betriebsoptimierungen die Anzahl Starts um über 40 % vermindert werden [1].
   b. Die Messergebnisse aus Projektteil 1 für die Einzelkessel zeigen, dass mit qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln (Feingutanteil <10 % und Wassergehalt <30 %) sowie mit Holzpellets die CO-Emissionen im Regelbetrieb deutlich unter dem EGW liegen. Der Feuerungsbetrieb (80 % der Zeit < EGW) und auch die einzelnen An- und Abfahrphasen werden mit der QSH-Methode als „erfüllt" bewertet.
   c. Die Staubemissionen sind für Holzpellets und auch für Holzhackschnitzel (HS) der einzelnen Kessel während des Regelbetriebs deutlich unter dem EGW, sowohl für HS mit guter als auch mit weniger guter Qualität (Feingutanteil 10–15 % und Wassergehalt 30–35 %). Auch für die Betriebsphasen Warm- und Kaltstart, Ausbrand sowie kleine Entaschung sind die Staubemissionen aufgrund der installierten Elektroabscheider mit nur vereinzelten Ausnahmen grösser als der EGW, der nur für den Regelbetrieb gilt.
   d. Die CO-Emissionen und die Staubemissionen der Gesamtanlage können die QSH-Vorgaben (Feuerungsbetrieb ≥ 80% der Zeit < EGW) bei guter Brennstoffqualität (Pellets und Holzhackschnitzel mit Feingutanteil < 10 %, Wassergehalt < 30 %) erfüllen.
      i. Wenn für Staub und CO jedoch ein tieferer EGW der nächsthöheren Anlagekategorie angewendet würde (für Staub 20 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 für 500–1000 kW und für CO 250 mg/m^3 bei 11 % Bezugs-O_2 für 1–10 MW), käme es bei der Beurteilung der Gesamtanlage zu Grenzwertüberschreitungen im Feuerungsbetrieb von bis zu 50 % der Zeit.

ii. Es ist jedoch anzumerken, dass für beide Anlagen nur ein Zeitraum von weniger als 3 Wochen untersucht wurde. Zudem beinhalteten diese Zeiträume, vor allem bei der Zweikessel Pelletanlage, Perioden mit wärmeren Temperaturen tagsüber, sodass nie die Gesamtanlagenleistung notwendig war und es zu häufigerem Zu- und Abschalten verschiedener Kessel kam. Ausserdem wurden nur zwei Anlagen untersucht. Bei Betrachtung längerer oder anderer Zeiträume sowie anderen Anlagen könnte die Beurteilung (Feuerungsbetrieb ≥ 80% der Zeit < EGW) für tieferer EGW der nächsthöheren Anlagekategorie auch besser ausfallen.

<u>Einordnung der Resultate und des Beurteilungsschemas</u>

- Die festgelegte maximal zulässige Anzahl Starts pro Jahr beruht mehrheitlich auf den zur Verfügung gestellten Daten der Praxisanlagen. Es wurde dabei das 75 %-Perzentil der Daten als massgebende Zahl gewählt.
  - Dies bedeutet, dass mit dem Vorschlag 25 % der untersuchten Anlagen beanstandet würden.
  - Andererseits zeigen die Frachtsimulationen (Punkt 2a), dass eine tiefere Anzahl Starts anzustreben wäre und dass durch Betriebsoptimierungen bis zu 40% der Starts reduziert werden können (Punkt 3a).
  - Bei Mehrkesselanlagen mit Seriengeräten würden mit einer geringeren Anzahl Starts pro Jahr auch potenzielle Grenzwertüberschreitungen durch die ungünstige Überlagerung verschiedener Betriebsphasen verringert werden (Punkt 3d). Zu potenziellen Grenzwertüberschreitungen sind jedoch auch noch folgende Punkte zu beachten:
    - Das Feststellen von EGW-Überschreitungen der Gesamtanlage bei Mehrkesselanlagen wird in der Praxis für eine grössere Anzahl Anlagen praktisch unmöglich. Dazu wären mindestens Langzeitemissionsmessungen notwendig, idealerweise an allen Kesseln gleichzeitig, dazu kontinuierliche Abgasvolumenstrommessungen, die nicht Stand der Technik und extrem aufwendig sind, oder Abschätzungen anhand von Betriebsdaten, die mit Unsicherheiten verbunden sind.
    - Auch bei Mehrkesselanlagen mit industriellen Kesseln kann es bei ungünstigem Betrieb während signifikanten Zeitanteilen zu Grenzwertüberschreitungen kommen.
    - Kaskadenanlagen mit ≥3 Seriengeräten gleicher Leistung könnten theoretisch wie eine grössere Zweikesselanlage mit Leistungsaufteilung 1/3 und 2/3 betrieben werden. Dies würde wahrscheinlich tendenziell zu einer grösseren Anzahl Starts führen, da mehrere Kessel jedoch gleichzeitig ein- und ausschalten, könnte der Zeitanteil mit EGW-Überschreitungen reduziert werden.
    - Bei grösseren Überbauungen oder kleineren Wärmeverbünden, wo aus baulichen Gründen Seriengeräte eingesetzt werden, könnten strenge Anforderungen hinsichtlich Luftreinhaltung auch umgangen werden, indem die Kessel auf verschiedene Heizzentralen mit unterschiedlichen Adressen aufgeteilt werden. Ein solches Vorgehen würde jedoch den Betrieb des Gesamtsystems aufwendig und komplex machen, was sich tendenziell negativ auf den Feuerungsbetrieb der Einzelkessel auswirken würde und auch die Anzahl Starts und die Emissionsfrachten erhöhen könnte.
  - Bei Einkesselanlagen mit Ganzjahresbetrieb und Mehrkessel-Anlagen mit Seriengeräten liegt jedoch auch der Median-Wert der Praxisdaten deutlich über den 500 Starts pro Jahr und Anlage, die in der aktuellen Version der Cercl'Air Empfehlung 31p festgeschrieben sind.
  - Das 75 %-Perzentil entspricht daher einem Kompromiss und Ausgangspunkt für eine neue Regelung.
    - Auch deswegen, da durch eine neue Regelung keine Verfügungswelle ausgelöst werden soll und die Anzahl Starts nicht analog dem Nichteinhalten von LRV-Emissions-begrenzungen (CO- / Staub-EGW, Verfügbarkeit des Feinstaubabscheiders oder Speichervolumen) behandelt werden. Die Anzahl Starts soll hauptsächlich dazu dienen Anlagen mit Betriebsoptimierungspotenzial zu identifizieren.

- Ausserdem haben die Messungen in Teil 1 (Punkt 3b-d) sowie die Erfahrungen (QM Holzheizwerke, QS-Support, Vollzug LRV) gezeigt, dass nicht nur die Anzahl Starts ein wichtiges Kriterium ist, sondern vor allem die Brennstoffqualität, insbesondere bei Seriengeräten entscheidend ist. Dabei ist nicht nur ein tiefer Wassergehalt, sondern auch ein Feingutanteil von <10% wichtig.

- Der Wassergehalt wird folglich als ein Hauptkriterium in der Einteilung in Kategorien im Beurteilungsschema herangezogen
  - In der Leistungsklasse 70-500 kW müssen Anlagen, in denen Brennstoff mit einem Wassergalt von >25 % verwendet wird, eine tiefere Anzahl Starts einhalten.
- Ein zu hoher Feingutanteil (schon bei Anlieferung oder verursacht durch Probleme im Fördersystem) sollte bei Überschreitung der maximal zulässigen Anzahl Starts durch eine Betriebsoptimierung und spätestens durch eine Begleitung durch QM Holzheizwerke oder QS-Support erkannt und behoben werden.

- Die Frachtberechnungen haben zudem gezeigt, dass nicht nur die Anzahl Starts für die Gesamtemissionen entscheiden sind, sondern vor allem die Emissionen im Regelbetrieb.
  - Die Emissionen im Regelbetrieb können durch die Brennstoffwahl sowie den Kesseltyp und für Staub auch durch die Abgasreinigung (Feinstaubabscheider vorhanden oder nicht, im Kessel integriert oder separat aufgestellt, sowie Dimensionierung) beeinflusst werden. Diese Faktoren wiederum können durch den massgebenden Emissionsgrenzwert beeinflusst werden.
    - Bei Mehrkesselanlagen mit Seriengeräten mit Einzelkesselleistungen <500 kW, bei denen die Gesamtanlagengrösse jedoch >500 kW ist, könnte ein tieferer EGW, welcher über die Gesamtanlage und nicht nur über die Einzelkessel definiert wird, dafür sorgen, dass die Gesamtemissionen trotz einer erhöhten Anzahl Starts so tief wie möglich sind.
    - Die Messungen in Projekt Teil 1 (Punkt 3c) sowie Daten von LRV-Emissionsmessungen aus dem Kanton Zürich zeigen, dass Seriengeräte mit einer NWL < 500 kW mit qualitativ gutem Brennstoff und Feinstaubscheidern auch die EGW der LRV für Anlagen >500 kW einhalten können.
    - Eine mögliche neue Regelung zur EGW-Festlegung von Mehrkesselanlagen, die ebenfalls in die angepasste Cercl'Air Empfehlung 31p aufgenommen werden könnte, wird aktuell noch zwischen der Holzfeuerungsbranche und dem LRV-Vollzug diskutiert.

- Nach einer gewissen Zeit (z.B. 2 Jahre) sollen die maximal zulässige Anzahl Starts pro Jahr sowie das gesamte Beurteilungsschema anhand der vom Vollzug erhobenen Daten überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.
  - Eine Überprüfung ist auch deshalb zielführend, da die Umsetzung gewisser Aspekte in die Praxis mit Unsicherheiten verbunden ist, z.B. hinsichtlich der Datenerhebung, insbesondere im Hinblick auf die Unterscheidung zwischen Anlagen, die alle Starts zählen und solchen, die nur die Zündungen zählen.

- Auch wenn durch die aktuelle Generation von Feuerungen die Emissionen in den letzten Jahren zurückgegangen sind, gibt es weiterhin Optimierungspotenzial (Optimierung einzelner Betriebsphasen, insbesondere die Dauer der Abbrandphasen, Kaskadenschaltungen, Speicherbewirtschaftung, …), das nach Möglichkeit umgesetzt werden sollte.

- Ausserdem wäre es anzustreben, dass vermehrt Betriebsoptimierungen durchgeführt werden, auch ohne nachdrücklichen Hinweis durch die Behörden.

3 Ausgangslage und Zielsetzung

Die Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p für Holzfeuerungen über 70 kW Feuerungswärmeleistung (FWL) beinhaltet eine Überprüfung der Anzahl Starts pro Jahr (bis 100 kW_{FWL}: < 1'000, über 100 kW_{FWL}: < 500), die sich bei Mehrkesselanlagen auf die Summe der Einschaltungen aller Feuerungen bezieht. Das SFIH Merkblatt 11/1 aus dem Jahr 2011, auf das Bezug genommen wird, wurde inzwischen zurückgezogen und bezog sich auf damalige industrielle Holzfeuerungen für Holzhackschnitzel mit Leistungen meist über 500 kW.

Kaskadenanlagen mit zwei oder mehreren sogenannten „Seriengeräten" von automatischen Holz- oder Pelletkesseln erleben eine zunehmende Verbreitung. Solche kostengünstigen Seriengeräte weisen im Vergleich zu industriellen Holzfeuerungen eine leichtere Bauweise auf und sind deshalb rascher zu- und wegschaltbar. Dank ihrer kompakten Bauweise können sie auch in beengten Platzverhältnissen eingebaut werden, in denen industrielle Feuerungen nicht mehr infrage kommen. Derzeit werden solche Geräte im Leistungsbereich von ca. 50 kW bis 350 kW angeboten. Viele dieser Feuerungen müssen nach einer bestimmten Betriebsdauer, beispielsweise 6 bis 8 Stunden, eine Entaschung des Verbrennungsrostes durchführen. Dies führt dazu, dass diese Feuerungen eine grössere Anzahl Starts aufweisen als industrielle Holzfeuerungen und die Vorgaben der maximalen Anzahl Einschaltungen pro Jahr gemäß Cercl'Air-Empfehlung Nr. 31p oft nicht erfüllen können.

Im ersten Teil des Projekts «Langzeitmessung bei Kaskadenanlagen mit Holzkesseln (LZM-Kaskaden)» hat die Verenum AG Langzeitmessungen (LZM) von gasförmigen Schadstoffen (CO) und gravimetrischen Staubmessungen während verschiedener Betriebsphasen auf zwei Mehrkesselanlagen mit Seriengeräten durchgeführt. Der Fokus lag dabei vor allem auf der lufthygienischen Qualität der An- und Abfahrvorgänge der Seriengeräte. Die Messergebnisse zeigen, dass mit qualitativ hochwertigen Holzhackschnitzeln (Feingutanteil <10 % und Wassergehalt <30 %) sowie mit Holzpellets die CO-Emissionen im Regelbetrieb deutlich unter dem Emissionsgrenzwert (EGW) liegen. Der Feuerungsbetrieb (80 % der Zeit < EGW) und auch die einzelnen An- und Abfahrphasen werden mit der QSH-Methode als „erfüllt" bewertet. Die Staubemissionen sind für Holzpellets und auch für Holzhackschnitzel (HS) während des Regelbetriebs deutlich unter dem EGW, sowohl für HS mit guter als auch mit weniger guter Qualität (Feingutanteil 10–15 % und Wassergehalt 30–35 %). Auch für die Betriebsphasen Warm- und Kaltstart, Ausbrand sowie kleine Entaschung sind die Staubemissionen aufgrund der installierten Elektroabscheider mit nur vereinzelten Ausnahmen grösser als der EGW, der nur für den Regelbetrieb gilt. Wenn die Kessel nicht einzeln, sondern die Gesamtanlage beurteilt wird, kommt es aufgrund der zahlreichen An- und Abfahrvorgänge (7 pro Tag bei der Vierkessel Hackschnitzelanlage und 6 pro Tag bei der Zweikessel Pelletanlage) oftmals zu ungünstigen Überlagerungen von verschiedenen Betriebsphasen der einzelnen Kessel und dadurch teilweise zu EGW-Überschreitungen der Gesamtanlage. Die QSH-Vorgaben (Feuerungsbetrieb ≥ 80% der Zeit < EGW) für die CO- und Staubemissionen der Gesamtanlage können für Brennstoff mit guter Qualität (Pellets und Holzhackschnitzel mit Feingutanteil < 10 %, Wassergehalt < 30 %) jedoch eingehalten werden. Wenn für Staub und CO jedoch ein tieferer EGW der nächsthöheren Anlagekategorie angewendet würde (für Staub 20 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 für 500–1000 kW und für CO 250 mg/m^3 bei 11 % Bezugs-O_2 für 1–10 MW), käme es bei der Beurteilung der Gesamtanlage zu Grenzwertüberschreitungen im Feuerungsbetrieb von bis zu 50 % der Zeit.

Aufgrund der Ergebnisse des ersten Teils des Projekts LZM-Kaskaden sowie einer Vernehmlassung mit allen Projektteilnehmern wurde entschieden, dass ein Beurteilungskriterium für Kaskadenanlagen weiterhin eine Begrenzung der Anzahl Starts pro Jahr enthalten soll. Aufgrund der begrenzten Datenlage gestaltet sich jedoch die genaue Festlegung eines Zielwerts für die maximale Anzahl Starts pro Jahr als schwierig. Zudem kann noch nicht abschließend beurteilt werden, wie sich neue Anlagenkonzepte (Kaskadenanlagen im Vergleich zu industriellen Feuerungen) und Betriebsweisen (Feuerungen mit und ohne periodische Entaschung des Verbrennungsrostes, Speichervolumen, Ganzjahresbetrieb im Vergleich zu Betrieb während der Heizperiode) auf die Gesamtemissionsfracht auswirken.

Daher soll im Teil 2 dieses Projekts eine umfassendere Datenbasis zur Festlegung eines Zielwerts für die maximale Anzahl Starts pro Jahr geschaffen werden. Zu diesem Zweck sollen Daten von verschiedenen Feuerungsherstellern und Anlagenkonzepten bezüglich der Anzahl Starts von allen Projektbeteiligten (Feuerungshersteller, Holzfeuerungen Schweiz, Cercl'Air) zusammengetragen und ausgewertet werden. Zudem sollen unter Verwendung der Daten und Erkenntnisse aus den abgeschlossenen Projekten HoKaSpe und LZM-Kaskaden Teil 1 Frachtsimulationen für verschiedene Anlagen- und Betriebskonzepte durchgeführt werden. Basierend auf der Datenerhebung zur Anzahl Starts pro Jahr von Praxisanlagen und den Frachtsimulationen soll die Verenum AG einen Vorschlag für einen Zielwert für die maximale Anzahl Starts pro Jahr ausarbeiten. Dieser Vorschlag soll dann von allen Projektteilnehmern diskutiert und gegebenenfalls angepasst werden.

4 Anzahl Starts von Praxisanlagen

4.1 Datenerhebung zur Anzahl Starts von Praxisanlagen

Aus den Resultaten des ersten Teils des Projekts LZM-Kaskaden sowie einer Vernehmlassung mit allen Projektteilnehmern wurde entschieden, dass ein Beurteilungskriterium für Kaskadenanlagen weiterhin eine Begrenzung der Anzahl Starts pro Jahr enthalten soll. Aufgrund der begrenzten Datenlage gestaltet sich jedoch die genaue Festlegung eines Zielwerts als schwierig. Daher wurde eine umfassendere Datenbasis geschaffen, um einen Zielwert für die maximale Anzahl von Starts pro Jahr festzulegen.

Tabelle 3 Übersicht über die Datenlieferung zu Anzahl Starts von Praxisanlagen. Legende: HS…Holzhackschnitzel, GJB…Ganzjahresbetrieb, HZ…nur Betrieb während Heizsaison

Leistung Gesamtanlage	**Brennstoff**	**Wassergehalt**	**Anzahl Anlagen**								
			1-Kessel		**2-Kessel**		**3-Kessel**		**4-Kessel**		**total**
			GJB	HZ	GJB	HZ	GJB	HZ	GJB	HZ	
< 70 kW	Pellets & HS	<35%	3	4	-	-	-	-	-	-	7
70-500 kW	Pellets	8-10%	10	4	24	3	3	3	-	-	47
	HS	<35%*	24	16	9	3	-	-	-	-	52
500-1000 kW	Pellets	8% - 10%	-	-	2	2	5		1	-	10
	HS	<35% od. >35%**	7	12	13	1	3	-	-	-	36
> 1 MW	Pellets & HS	8-50%	1	5	17	-	2	-	2	-	27
Summe	Anzahl Anlagen										**179**
	Anzahl Kessel										**476**

*Nur 1 Anlage mit Wassergehalt > 35% im Ganzjahresbetrieb
**15 Anlagen mit Wassergehalt > 35%, davon nur 1 Seriengerät

Zu diesem Zweck wurde eine Anfrage an alle Mitglieder vom Verband Holzfeuerungen Schweiz geschickt, um einen grösstmöglichen Datensatz zu erhalten, der folgende Parameter abdecken soll:

- Anzahl Starts von verschiedenen Kesseltypen, Brennstoffen, Leistungskategorien und Betriebsweisen
  - Seriengeräte, industrielle Feuerungen
  - 70-500 kW, 500-1000 kW, > 1 MW
  - Ganzjahresbetrieb, nur Betrieb Heizsaison
  - Einkesselanlagen, Zweikessel und Mehrkesselanlagen
  - Holzhackschnitzel und Pellets
- Zusätzliche Informationen
  - Betriebsstunden
  - Volumen des Wärmespeichers
  - Wassergehalt des Brennstoffs (< 35% oder > 35%)
  - Angaben zum Betriebsverhalten (z.B. Dauerbetrieb, periodischer Unterbruch wegen Entaschung)
  - Angaben zum Zählen der Starts
    - Werden alle Starts gezählt oder nur Starts mit Zündung?
    - Wie werden die Starts gezählt?
      - Z.B. Statussignale in Kesselsteuerung, Signal Zündelement
    - Was ist Bedingung für das Einschalten der Zündung, falls nur die Starts mit Zündung gezählt werden.

Die Übersicht der zur Verfügung gestellten Daten ist in Tabelle 3 zu sehen. Insgesamt haben sich 9 Unternehmen (Lieferanten/Hersteller) beteiligt und es liegen nun verwertbare Daten von 179 Anlagen mit 476 Feuerungen vor. Die Datenmenge ist umfangreich und übersteigt die im Projektantrag angestrebte Zahl von 120 Anlagen. Nach der Aufteilung auf verschiedene Kategorien ist die Anzahl Anlagen jedoch teilweise sehr gering. Ausserdem sind die Daten in einzelnen Kategorien von wenigen Herstellern/Lieferanten dominiert.

Verenum AG hatte keinen Einfluss auf die Anlagenauswahl, daher kann nicht beurteilt werden, ob eine Selektion bezüglich «guter» oder «schlechter» Anlagen stattgefunden hat. Es gibt jedoch keine Indikation für eine solche Selektion. Im Gegenteil, Gespräche mit verschiedenen Personen, die für die Datenlieferung seitens der Feuerungslieferanten/-hersteller verantwortlich sind, zeigten, dass folgende Faktoren die Anlagenauswahl am meisten beeinflusst oder eingeschränkt haben:

- Möglichkeit des Fernzugriffs auf die Kesselsteuerung
- Vollständigkeit der Informationen (Anzahl Starts, Angaben zum Wärmespeichervolumen, etc.)
- Zustimmung des Anlagenbetreibers

Die Angaben zum Wassergehalt des Brennstoffs sind bei einigen Anlagen unsicher, da oft nur grobe Angaben vorhanden waren und der Aufwand, dies bei jedem Anlagenbetreiber genau zu erfragen, zu groß wäre. Insgesamt gab es bei 5 % der Anlagen überhaupt keine Angaben zum Wassergehalt des Brennstoffs.

Für die Anlagenauswahl wurden auch Vorschläge bzw. Wünsche von einzelnen Kantonen vorgebracht. Der Kanton BE schlug 4 Anlagen vor, und der Kanton GR schlug 5 Anlagen vor, die teilweise in den gelieferten Daten enthalten sind.

4.2 Auswertung Anzahl Starts von Praxisanlangen

Bevor die übermittelten Daten ausgewertet werden konnten, mussten diese in eine einheitliche Form gebracht werden. Dazu wurde wie folgt vorgegangen bzw. folgende Annahmen getroffen:

- Zuordnung der Anlagen gemäss Gesamtleistung in die Leistungskategorien der LRV.
- Zuordnung der Feuerungstypen in «Seriengeräte» und «industrielle Feuerungen».
    - Als «industrielle Feuerungen» wurden alle Vorschubrostfeuerungen der Firma Schmid AG energy solutions sowie Vorschubrostfeuerungen >350 kW von anderen Herstellern eingeteilt.
    - In die Kategorie «Seriengeräte» eingeteilt wurden die Feuerungen von allen Herstellern mit Kipprost sowie Feuerungen <350 kW, die nicht von Schmid AG energy solutions sind.
    - Wenn auf einer Anlage verschiedene Feuerungstypen vorhanden sind, ist die Kategorie der grösseren Feuerung massgebend für die Einteilung. Das heisst bei einer Zweikesselanlage mit einer industriellen Feuerung >500 kW und einem Seriengerät <500 kW wird die gesamte Anlage als Feuerungstyp «industriell» eingestuft.
- Einteilung der Brennstoffspezifikationen in die Kategorien «Pellets» und «Hackschnitzel».
- Einteilung der verschiedenen Brennstoffwassergehalte in die Kategorien «<35 %» und «>35 %».
- Aufteilung aller Anlagen in die Kategorien «Zählen aller Starts, inkl. Warmstarts» und «nur Zählen der Anzahl Zündungen»
- Die Daten zur Anzahl Starts wurden teilweise bereits als Anzahl Starts pro Jahr für das Jahr 2022 übermittelt, grösstenteils jedoch als Anzahl Starts seit der Inbetriebnahme (IBN).
    - Die IBN der Anlagen reicht von 2023 bis 2008 zurück
    - Die übermittelte Anzahl Starts wurde mit der Differenz aus dem Inbetriebnahme-Datum und dem Ablesedatum in eine mittlere Anzahl Starts pro Jahr umgerechnet.

4.3 Resultate

4.3.1 Anzahl Starts

Die statistische Auswertung der Anzahl Starts pro Jahr für die verschiedenen Leistungskategorien unterteilt in Ein-, Zwei- und Mehrkesselanlagen sowie für verschiedene Feuerungstypen und Brennstoffe ist in Bild 2 bis Bild 4 als Box-Plots dargestellt. Die wichtigsten Zahlen sind auch in Tabelle 5 zusammengefasst. Mit den Box-Plots können einerseits die Medianwerte (robust gegenüber Ausreißern im Gegensatz zum Durchschnitt) als auch die Streuung der Werte anhand der verschiedenen Quantile veranschaulicht werden. Als Lesebeispiel werden nachfolgend die Werte des Ganzjahresbetriebs (GJB) für Einkesselanlagen der Leistungskategorie 70-500 kW für Seriengeräte (Pellets und Hackschnitzel) näher erläutert:

- Der Median von 1154 Starts pro Jahr bedeutet, dass 50% der ausgewerteten Anlagen weniger Starts aufweisen würden, wenn diese Zahl als maximal zulässiger Wert festgelegt würde. Die anderen 50% der Anlagen haben jedoch eine größere Anzahl Starts pro Jahr und könnten die Vorgabe nicht erfüllen.
- Der Wert von 1431 für das 75% Perzentil (Q75) bedeutet, dass 75% der ausgewerteten Anlagen weniger Starts pro Jahr haben, während die restlichen 25% eine noch größere Anzahl aufweisen.

Eine Auswertung, die über die dargestellten Kategorien hinausgeht (z.B. herstellerspezifische Auswertung, Baujahr, etc.) ist nicht möglich, da für die weitere Unterteilung nicht genügend Daten vorhanden sind.

4.3.1.1 70-500 kW

Die statistische Auswertung der Anlagen mit einer Leistung von 70-500 kW (Bild 2 und Tabelle 5) zeigt folgende Resultate:

- Einkesselanlagen im Ganzjahresbetrieb (GJB) weisen einen Median von ungefähr 1000 Starts pro Jahr auf. Im Vergleich dazu haben Zweikesselanlagen mehr Starts pro Jahr, aber nicht doppelt so viele. Der Unterschied zwischen Zwei- (Median im GJB von 1304) und Dreikesselanlagen (Median im GJB von 2477) mit Seriengeräten ist größer als der Unterschied zwischen Ein- (Median im GJB von 1154) und Zweikesselanlagen (Median im GJB von 1304).
- Die Anzahl Starts pro Jahr (sowohl Median als auch Q75) für Anlagen, die mit Pellets und Hackschnitzeln (HS) betrieben werden, sind sehr ähnlich. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass in dieser Anlagenkategorie nur bei einer Anlage mit Hackschnitzeln der Wassergehalt über 35 % beträgt.

- Es gibt einen deutlichen Unterschied zwischen Seriengeräten (Median von 580 im HZ und 1154 im GJB) und industriellen Feuerungen, die rund die Hälfte weniger Starts pro Jahr aufweisen (Median von 310 im HZ und 433 im GJB).
- Für Einkesselanlagen ist ein klarer Unterschied zwischen dem Betrieb während der Heizsaison (HZ) und dem Ganzjahresbetrieb (GJB) erkennbar. Der Median liegt dabei zwischen ~300 bis ~600 im HZ und zwischen ~1000 bis ~1350 im GJB.
- Die Anzahl der Starts pro Jahr für Einkesselanlagen mit Seriengeräten, die alle Starts zählen, ist grösser als für jene, die nur die Anzahl der Zündungen zählen. Bei Zweikesselanlagen ist dieser Unterschied jedoch nur sehr geringfügig im GJB für das Q75 evident.
- Die Anzahl Starts pro Jahr von Zweikesselanlagen mit Seriengeräten, bei denen die Einzelkesselleistung <70 kW beträgt, ist höher als für Zweikesselanlagen mit Einzelkesselleistungen von 70-500 kW.

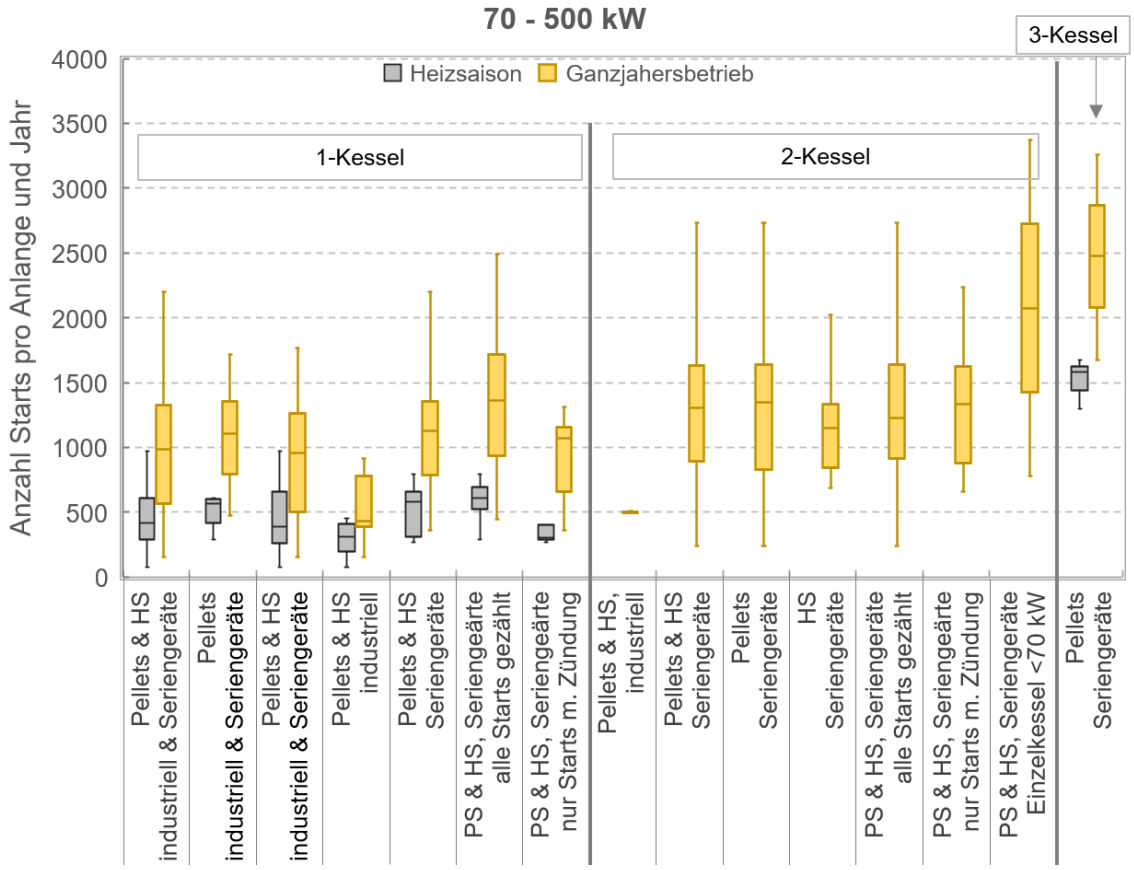


Bild 2 *Box-Plot der Ergebnisse der Datenerhebung zur Anzahl Starts pro Jahr für Anlagen 70-500 kW. Die obere und untere Linie der Box kennzeichnen das 75- und 25-Prozent Perzentil und die Linie innerhalb der Box den Median. Die Linie oberhalb und unterhalb der Box kennzeichnen das 90- und 10-Prozent Perzentil. Die wichtigsten Zahlen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Legende: HS…Holzhackschnitzel, PS…Pellets.*

4.3.1.2 500-1000 kW

Für Anlagen mit 500-1000 kW (Bild 3 und Tabelle 5) sind folgende Trends bzw. Unterschiede erkennbar:

- Die Datenmenge für die verschiedenen Unterteilungen dieser Leistungskategorie ist grösstenteils deutlich kleiner als noch für die Kategorie 70-500 kW (siehe Tabelle 3).
- Bei Einkesselanlagen dieser Leistungskategorie handelt es sich gemäss Definition (siehe Kapitel 4.2) ausschliesslich um industrielle Feuerungen.
- Die Anzahl Starts pro Jahr für industrielle Einkesselanlagen dieser Leistungskategorie (Median von 311 im HZ und 405 im GJB) ist jenen der Kategorie 70-500 kW (Median von 310 im HZ und 433 im GJB) sehr ähnlich.
- Die Unterschiede zwischen Zwei- und Dreikesselanlagen sind geringer als in der Leistungskategorie 70-500 kW. Die Anzahl Daten für Vierkesselanlagen ist zu gering für Schlussfolgerungen.

- Folgende Unterschiede sind ähnlich wie für die Leistungskategorie 70-500 kW
  - Betrieb Heizsaison und Ganzjahresbetrieb
  - Deutlich tiefere Anzahl Starts pro Jahr für industrielle Feuerungen als für Seriengeräte
  - Zweikesselanlagen, die mit Pellets und Hackschnitzel (HS) betrieben werden, haben ähnliche Werte. Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass in dieser Anlagenkategorie bei den Hackschnitzelanlagen nur bei einer Anlage der Wassergehalt >35 % beträgt.
  - Die Anzahl Starts pro Jahr für Seriengeräte, die alle Starts zählen, ist grösser als für jene, die nur die Anzahl Zündungen zählen.
  - Die Anzahl Starts pro Jahr für Zwei- und Dreikesselanlagen dieser Leistungskategorie ist kleiner als für die Kategorie 70-500 kW (-16% für Zweikesselanlagen und -44% für Dreikesselanlagen).

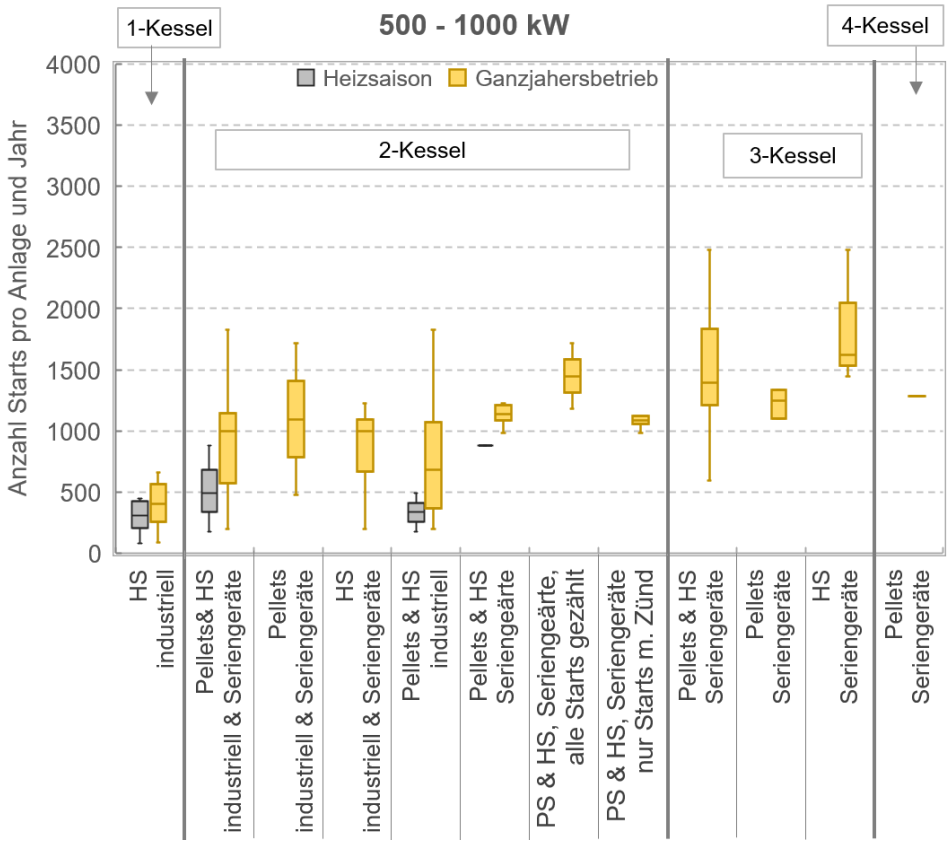


Bild 3 *Box-Plot der Ergebnisse der Datenerhebung zur Anzahl Starts pro Jahr für Anlagen 500-1000 kW. Die obere und untere Linie der Box kennzeichnen das 75- und 25-Prozent Perzentil und die Linie innerhalb der Box den Median. Die Linie oberhalb und unterhalb der Box kennzeichnen das 90- und 10-Prozent Perzentil. Die wichtigsten Zahlen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Legende: HS…Holzhackschnitzel, PS…Pellets*

4.3.1.3 >1 MW

Für Anlagen mit >1 MW (Bild 4 und Tabelle 5) sind folgende Trends bzw. Unterschiede erkennbar:

- Die Datenmenge für die verschiedenen Unterteilungen dieser Leistungskategorie ist von allen Leistungskategorie am kleinsten und die Daten sind zudem stark von einem Hersteller dominiert (23 von 27 Anlagen, siehe Tabelle 3).
- Bei Ein und Zweikesselanlagen dieser Leistungskategorie handelt es sich gemäss Definition (siehe Kapitel 4.2) ausschliesslich um industrielle Feuerungen.
- Die Anzahl Starts pro Jahr für industrielle Einkesselanlagen dieser Leistungskategorie ist am kleinsten (Median im HZ von 244) aber mit jenen der anderen Kategorie vergleichbar (Median im HZ von 310 bzw. 311 für 70-500 kW und 310 für 500-1000 kW).
- Bei den Drei- und Vierkesselanlagen gibt einen deutlichen Unterschied der Anzahl Starts pro Jahr zwischen industriellen Feuerungen und Seriengeräten:
  - Dreikesselanlagen: Seriengeräte = 1883 und industriell = 332
  - Vierkessel-Anlagen: Seriengeräte = 1910 und industriell = 943

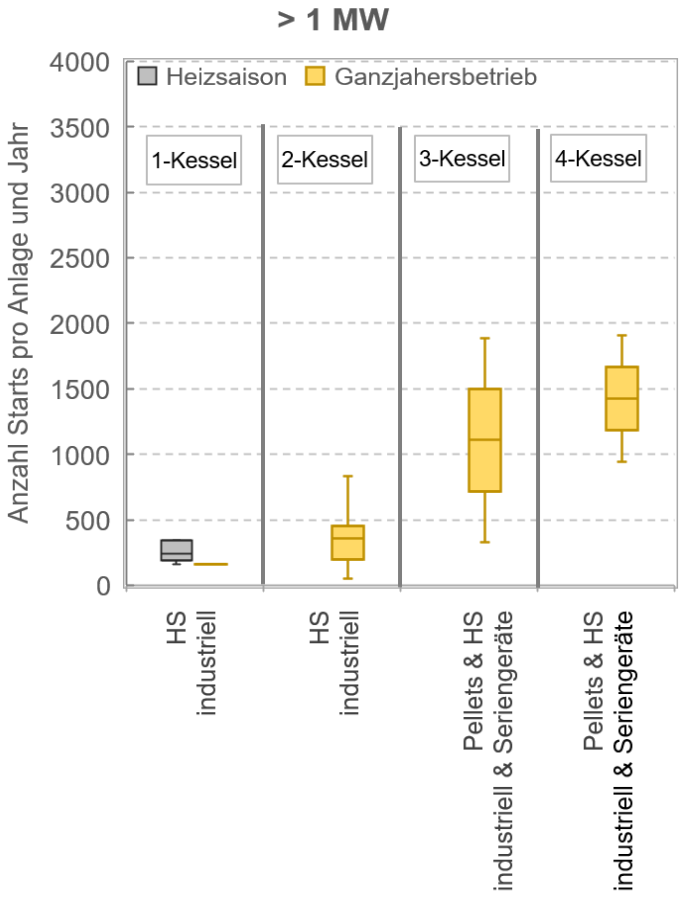


Bild 4 *Box-Plot der Ergebnisse der Datenerhebung zu Anzahl Starts pro Anlage und Jahr für Anlagen >1 MW. Die obere und untere Linie der Box kennzeichnen das 75- und 25-Prozent Perzentil und die Linie innerhalb der Box den Median. Die Linie oberhalb und unterhalb der Box kennzeichnen das 90- und 10-Prozent Perzentil. Die wichtigsten Zahlen sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Für Drei- und Vierkesselanlagen sind jeweils 1 Wert für industrielle und 1 Wert für Seriengeräte Anlagen Legende: HS…Holzhackschnitzel*

Tabelle 4 *Zusammenfassung der statistischen Auswertung für Seriengeräte. Die Auswertung wurde unabhängig von der Gesamtanalgengrösse über alle Seriengeräte durchgeführt.*

Leistung Einzel-kessel	Brenn-stoff	Wasser-gehalt	Technologie	Anzahl Starts pro Jahr und Anlage					
					1-Kessel		2-Kessel	3-Kessel	4-Kessel
					HZ	GJB	GJB	GJB	GJB
70 kW – 350 kW	Pellets	-	Alle Seriengeräte	Anzahl	4	9	21	9	1
				Median	511	1209	1539	1675	1284
				Q75	607	1393	1717	2477	-
	HS	< 35%*	Alle Seriengeräte	Anzahl	8	19	13	3	1
				Median	604	1145	1087	1619	1910
				Q75	697	1453	1222	2049	-
	Pellets & HS*	< 35%*	Alle Seriengeräte	Anzahl	12	28	34	12	2
				Median	580	1154	1250	1647	1597
				Q75	657	1431	1601	2478	1753
	Pellets & HS*	< 35%*	Seriengeräte, die nur Zündungen zählen	Anzahl	4	10	14	6	1
				Median	306	1073	1155	1391	1910
				Q75	402	1158	1373	1577	-
	Pellets & HS*	< 35%*	Seriengeräte, die alle Starts zählen	Anzahl	8	18	20	6	1
				Median	609	1349	1408	2181	1284
				Q75	697	1717	1725	3001	-

*Nur 1 Anlagen mit M > 35% im Ganzjahresbetrieb

Tabelle 5: Zusammenfassung der statistischen Auswertung von den wichtigsten Anlage- und Leistungskategorien

Leistung Anlage	Brenn-stoff	Wasser-gehalt	Technologie		Anzahl Starts pro Jahr und Anlage				
					1-Kessel		2-Kessel	3-Kessel	4-Kessel
					HZ	GJB	GJB	GJB	GJB
< 70 kW[+]	Pellets & HS	< 35%[++]	Alle Anlagen = Seriengeräte	Anzahl	4	3	-	-	-
				Median	643	505	-	-	-
				Q75	742	711	-	-	-
70 kW – 500 kW	Pellets & HS	< 35%*	Alle Anlagen	Anzahl	20	34	33	3[+++]	-
				Median	409	1015	1277	2477	-
				Q75	623	1357	1606	2867	-
			Alle Seriengeräte	Anzahl	12	28	31	3	-
				Median	580	1154	1304	2477	-
				Q75	657	1431	1634	2867	-
			Seriengeräte, die alle Starts zählen	Anzahl	8	18	20	-	-
				Median	609	1349	1229	-	-
				Q75	697	1717	1642	-	-
			Seriengeräte, die nur Zündungen zählen	Anzahl	4	10	11		
				Median	306	1073	1332		
				Q75	402	1158	1623		
			Seriengeräte, <70 kW	Anzahl	-	-	2		
				Median	-	-	2075		
				Q75	-	-	2724		
			Industriell	Anzahl	8	6	2	-	-
				Median	310	433	500	-	-
				Q75	413	777	503	-	-
500 kW – 1 MW	Pellets & HS	< 35% & > 35 %[#]	Alle Anlagen	Anzahl	12	7**	15	8	1
				Median	311	405	998	1391	1284
				Q75	427	568	1142	1834	-
			Alle Seriengeräte	Anzahl	-	-	5	8	1
				Median	-	-	1087	1391	1284
				Q75	-	-	1222	1834	-
			Seriengeräte, die alle Starts zählen	Anzahl	-	-	1	3	-
				Median	-	-	1717	2480	-
				Q75	-	-	-	2827	-
			Seriengeräte, die nur Zündungen zählen	Anzahl	-	-	4	5	-
				Median	-	-	1084	1334	-
				Q75	-	-	1121	1448	-
			Industriell	Anzahl	12	7	10	-	-
				Median	311	405	686	-	-
				Q75	427	568	1072	-	-
> 1 MW	Pellets & HS	< 35% & > 35 %-	Alle Anlagen[‡]	Anzahl	5***,[+]	1***	17***	2[##]	2[‡‡]
				Median	244	163	356	1108	1426
				Q75	347	-	452	1495	1668

[++]3 Anlagen mit Pellets und 4 mit HS, alle Anlagen mit HS mit M < 35 %

[+++]Ausschliesslich Pellet-Anlagen

*Nur 2 Anlagen mit M > 35% und davon nur 1 Anlage mit Ganzjahresbetrieb, die industrieller Bauart ist

**4 Einkessel Anlagen mit M > 35%, davon alle industriell

[#]15 Anlagen mit M > 35%, davon nur 1 Seriengerät

‡Aufgrund der geringen Zahl an Anlagen mit Seriengeräten ist für diese Leistungsklasse eine weitere Unterteilung nicht möglich.

***nur industrielle Anlagen

[+] Anlagen von 2 Herstellern, davon 1 Hersteller mit 4 Anlagen und ein weiterer Hersteller mit 1 Anlage

[##]1 Anlage mit Seriengeräten (# Starts/Jahr = 1883) u. 1 Anlage mit industriellen Feuerungen (# Starts/Jahr = 332)

‡‡ 1 Anlage mit industriellen Feuerungen (# Starts/Jahr = 943) u. 1 Anlage mit Seriengeräte (# Starts/Jahr = 1910)

4.3.2 Einfluss Wärmespeicher

Neben der statistischen Auswertung der Anzahl Starts wurde auch der Einfluss des Wärmespeichervolumens auf die Anzahl Starts pro Jahr untersucht. In Tabelle 6 ist die allgemeine statistische Auswertung zum Wärmespeichervolumen aufgeführt. Von den 179 Anlagen gab es bei 9 % keine Angaben zum Wärmespeichervolumen. Bei 59 % der Anlagen entspricht das Wärmespeichervolumen den Vorgaben der LRV (25 Liter pro kW Nennwärmeleistung), und bei 71 % erfüllt es die Anforderungen von QM Holzheizwerke. QM Holzheizwerke berücksichtigt die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf des Wärmespeichers, und bei Mehrkesselanlagen ist ein um 1/3 reduziertes Wärmespeichervolumen zulässig.

Tabelle 6 Allgemeine statistische Auswertung zum Wärmespeichervolumen

	Anlagen total	**Keine Angabe zum Speicher**	**LRV erfüllt** kW x 25 L pro kW*	**QMH erfüllt** Anzahl Kessel = 1: kW x 29 L pro kW** Anzahl Kessel > 1: $\sum_K$ kW x 29 L pro kW x 2/3
Anzahl	179	16	105	127

*Entspricht einem ΔT über dem Speicher von 35°C

**Entspricht einem ΔT über dem Speicher von 30°C

In Bild 5 ist das Wärmespeichervolumen als Funktion der Nennwärmeleistung (NWL) der Gesamtanlage dargestellt. Wie man erkennen kann, nimmt das Speichervolumen mit 23-25 Litern pro kW zu. Dies entspricht genau den Vorgaben der LRV. Die Vorgaben der LRV zum Wärmespeichervolumen wurden jedoch erst 2018 für Anlagen <500 kW und erst 2022 für Anlagen >500 kW eingeführt. Das Erfüllen der LRV-Vorgaben für die ausgewerteten Anlagen <500 kW ist wenig überraschend, da die Daten nur 10 Anlagen mit einem Baujahr vor 2018 enthalten. Für größere Anlagen sind nur wenige Daten verfügbar (n = 19 für 500-1000 kW und n = 6 für Anlagen >1 MW), um abschließende Schlussfolgerungen zum LRV-konformen Speichervolumen zu ziehen.

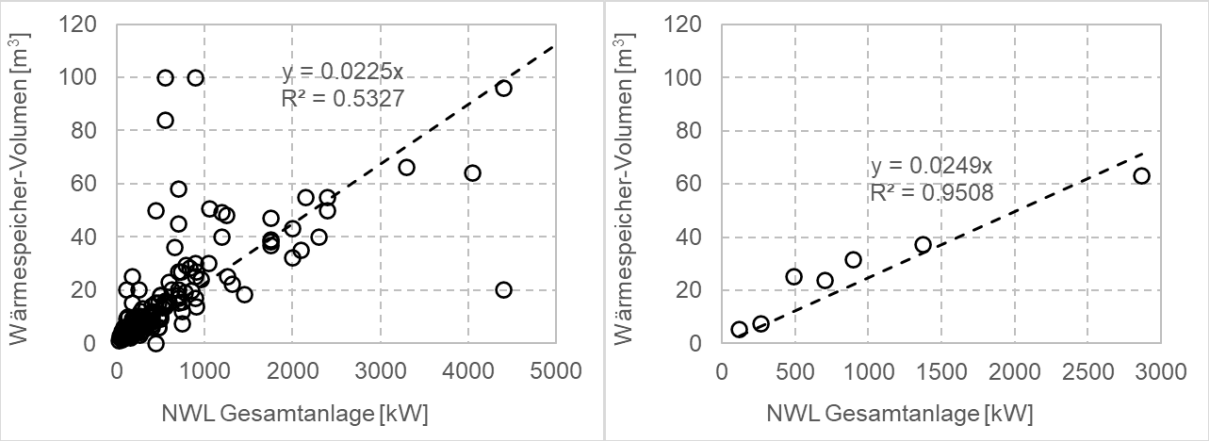


Bild 5 Wärmespeichervolumen als Funktion der Nennwärmeleitung (NWL) der Gesamtanlage. Links: Alle Datenpunkte, rechts: Anlagen gruppiert nach NWL-Bereichen.

In Bild 6 ist zu erkennen, dass die Anzahl der Starts pro Jahr und pro Anlage mit zunehmender Anlagengröße abnimmt. Pro zusätzlichen 40 kW Anlagengröße verringert sich die Anzahl der Starts um etwa 10 pro Jahr. Dieser Zusammenhang wird jedoch erst klar, wenn die Datenpunkte nach Bereichen der Nennwärmeleistung (NWL) gruppiert werden. Außerdem hängt die Steigung der linearen Regression in gewissem Maße von der Wahl der NWL-Bereiche ab. Im Allgemeinen ist zu erwarten, dass die Anzahl der Starts pro Jahr ab einer bestimmten Anlagengröße abnimmt, da in grösseren Anlagen meist industrielle Feuerungen eingesetzt werden, welche durch gute Leistungsmodulation im Idealfall einen Dauerbetrieb ermöglichen.

In Bild 7 wird die Abhängigkeit der Anzahl der Starts pro Jahr und pro Anlage vom Wärmespeichervolumen veranschaulicht. Es zeigt sich, dass die Anzahl der Starts mit zunehmendem Speichervolumen abnimmt. Bei einer 250 kW Anlage würde gemäß den Daten aus Bild 7 (eine Reduktion von 13 Starts pro Jahr pro

zusätzlichem Volumen von 1 m³) eine Verdoppelung des Speichervolumens (von 6,25 m³, wie von der LRV vorgeschrieben, auf 12,5 m³) nur zu einer Reduktion von 81 Starts pro Jahr führen. Bei einer angenommenen Anzahl von 1000 bzw. 1500 Starts pro Jahr würde dies einer Reduktion von nur 5 % bzw. 8 % entsprechen. Diese Reduktion ist also sehr gering und wird teilweise auch durch andere Faktoren beeinflusst, wie beispielsweise den Feuerungstyp, die Anlagengröße und das Betriebsverhalten. Eine frühere Studie [1] hat bereits gezeigt, dass ein Wärmespeichervolumen, das über die Anforderungen von QM Holzheizwerke hinausgeht, zwar zu einer Reduktion der Anzahl Starts pro Jahr führt, aber dieser Rückgang gering ist und hauptsächlich von anderen Faktoren, insbesondere der Leistungsmodulation, beeinflusst wird.

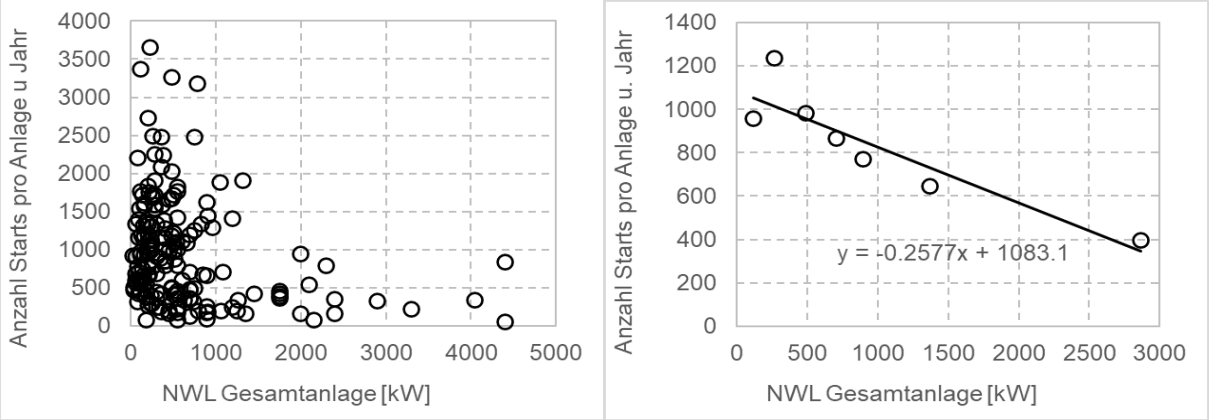


Bild 6 *Anzahl Starts pro Jahr und Anlage als Funktion der Nennwärmeleitung (NWL) der Gesamtanlage. Links: Alle Datenpunkte, rechts: Anlagen gruppiert nach NWL-Bereichen.*

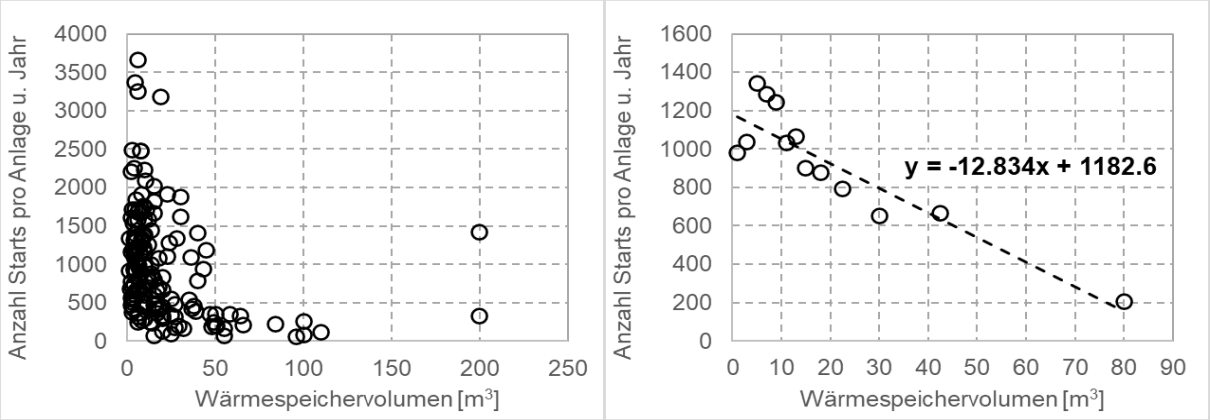


Bild 7 *Anzahl Starts pro Jahr und Anlage als Funktion des Wärmespeichervolumens. Links: Alle Datenpunkte, rechts: Anlagen gruppiert nach Speichervolumen-Bereichen.*

4.3.3 Weitere Resultate

Neben der Anzahl der Starts pro Jahr und dem Einfluss des Wärmespeichervolumens können aus dem grossen Datensatz noch folgende weitere Informationen ausgewertet werden:

4.3.3.1 Leistungsaufteilung bei Mehrkesselanlagen

Für Mehrkesselanlagen wurde untersucht, wie die Leistungsaufteilung verteilt ist und dabei analysiert, ob es bei Zweikesselanlagen eher die "klassische" Leistungsaufteilung in 1/3 und 2/3 gibt, oder ob bei Mehrkesselanlagen eher eine Leistungsaufteilung mit derselben Leistung pro Feuerung vorherrscht. Die Auswertung zeigt folgende Ergebnisse:

- Bei den Zweikesselanlagen (n = 75) zeigen 45 % eine Leistungsaufteilung von 50:50, während bei 44 % eine Aufteilung in 1/3 und 2/3 vorliegt. Bei 11 % der Anlagen liegt die Leistungsaufteilung zwischen der 50:50 Variante und der 1/3 und 2/3 Lösung.

- Bei den Dreikesselanlagen (n = 16) zeigt sich, dass in 81 % der Fälle eine Leistungsaufteilung mit gleicher Leistung pro Kessel vorliegt.
- Bei den Vierkesselanlagen (n = 3) liegt die Leistungsaufteilung in 100 % der Fälle bei gleicher Leistung pro Kessel.

4.3.3.2 Anteil Mehrkesselanlagen im Ganzjahresbetrieb

Der Anteil von Mehrkesselanlagen mit zwei oder mehr Feuerungen (n = 94), die im Ganzjahresbetrieb betrieben werden liegt bei 87 %.

4.3.3.3 LRV-Kategorie bei Mehrkesselanlagen

Wie häufig kommt es vor, dass bei Mehrkesselanlagen die Summe der Leistungen der Einzelkessel einen Wert für der Feuerungswärmeleistung der Gesamtanlage ergibt, der einen Übergang in die nächsthöhere LRV-Kategorie bewirkt im Vergleich zur LRV-Kategorie der Leistung der Einzelkessel.

- Bei Zweikesselanlagen (n = 75) kommt dies bei 20 % der Anlagen vor.
- Bei Dreikesselanlagen (n = 16) kommt dies bei 56 % der Anlagen vor.
- Bei Vierkesselanlagen (n = 3) kommt dies bei 100 % der Anlagen vor.

4.3.3.4 Laufzeit pro Start

Mit den Angaben zu den Betriebsstunden und den Gesamtstarts wurde die durchschnittliche Laufzeit pro Startvorgang ermittelt. Die Ergebnisse für die verschiedenen Leistungskategorien sind in Tabelle 7 angeführt. Die Laufzeit nach einem Anfahrvorgang ist für industrielle Feuerungen deutlich länger als für Seriengeräte. Außerdem nimmt die Laufzeit pro Startvorgang bei industriellen Feuerungen mit zunehmender Anlagengröße zu. Die Laufzeit von Seriengeräten der Leistungskategorie 70-500 kW und 500-1000 kW ist ähnlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in der Leistungskategorie 500-1000 kW Seriengeräte nur in Mehrkesselanlagen vorkommen und die Einzel-Feuerungen der Leistungskategorie 70-500 kW entsprechen. Die kürzeste Laufzeit pro Startvorgang tritt bei Seriengeräten <70 kW auf. Die kürzeren Laufzeiten pro Startvorgang für Seriengeräte sind wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass bei den Feuerungen mit Kipprost nach 6-8 Betriebsstunden eine Entaschung des Verbrennungsrosts mit Unterbrechung der Verbrennung stattfindet. Ein weiterer Grund ist, dass bei Mehrkesselanlagen oft versucht wird, dieselbe Anzahl an Betriebsstunden für alle Kessel zu erreichen. Der Zeitraum, in dem diese Bedingung erfüllt werden soll, wird jedoch oft zu kurz gewählt.

Tabelle 7 Mittlere Laufzeit pro 1x Start für die verschiedenen Leistungskategorien und Kesselkonfigurationen. Die Werte sind Mittelwerte der jeweiligen Leistungskategorie für alle Brennstoffe (Pellets und Holzhackschnitzel) ohne Unterscheidung zw. Ganzjahresbetrieb und Betrieb nur während der Heizsaison.

Leistungs-kategorie	**Feuerungs-typ**	**Laufzeit pro Start***			
		1-Kessel	2-Kessel	3-Kessel	4 Kessel
<70 kW	Seriengeräte	3.0	-	-	-
70-500 kW	Seriengeräte	6.1	4.8	4.8	-
	industriell	13.3	13.9	-	-
500-1000 kW	Seriengeräte	-	7.4	5.6	3.3
	industriell	19.4	31.2	-	-
>1 MW	Seriengeräte	-	-	7.9	7.0
	industriell	29.6	46.4	35.2	11.6

*Als Start wird auch das Hochfahren aus dem Glutbettunterhalt bei industriellen Feuerungen gezählt

4.4 Beurteilungsschema und maximal zulässige Anzahl Starts pro Jahr

Verenum AG hat zwei verschiedene Vorschläge zur maximalen Anzahl Starts pro Jahr und zum Vorgehen, wenn diese Vorgabe überschritten wird, erstellt. Nachfolgend wir nur der finale Vorschlag beschrieben, der nach der Vernehmlassung durch alle Projektteilnehmenden (siehe Anhang 7.2) festgelegt wurde. Jener Vorschlag, der verworfen wurde, ist im Anhang zu finden. Für das Festlegen des Beurteilungsschemas und der maximal zulässigen Starts pro Jahr wurden folgende allgemeine Grundsätze angewendet:

- Die Zahlen für die maximal zulässigen Starts pro Jahr und Anlage in den Vorschlägen von Verenum AG wurde hauptsächlich die statistische Auswertung der Zahlen der Praxisanlagen (Boxplots, siehe Kapitel 4.3.1) herangezogen.
- Die Anzahl der Starts soll pro Anlage gelten und nicht pro Kessel. Im ersten Teil des Projekts wurde die Anzahl der Starts pro Kessel noch höher gewichtet. Eine Bewertung für jeden einzelnen Kessel bei Mehrkesselanlagen würde es erforderlich machen, die Unterschiede für verschiedene Anlagenkonfigurationen (Ein-, Zwei- bzw. Mehrkesselanlagen, Seriengeräte und industrielle Feuerungen) und Betriebsweisen (Ganzjahresbetrieb bzw. Betrieb nur während der Heizsaison) auf eine Anzahl von Starts pro Kessel umzurechnen, was in der Praxis wahrscheinlich schwierig umzusetzen wäre.
- Zur Einteilung in die Leistungskategorie wird die Leistung der Einzelkessel herangezogen aus folgenden Gründen:
    - Bei Mehrkesselanlagen werden häufig Kaskaden mit Kesseln der gleichen Leistung eingesetzt, wobei oft Seriengeräte verwendet werden. In der Leistungskategorie >500 kW werden dabei häufig die gleichen Kesseltypen wie in der Leistungsklasse 70-500 kW eingesetzt.
    - Seriengeräte haben eine deutlich höhere Anzahl Starts als industrielle Anlagen. Bei der Festlegung der Leistungskategorie anhand der Leistung der Gesamtanlage käme es dadurch in der Leistungsklasse >500 kW zu einer «Vermischung» zwischen Seriengeräten und industriellen Anlagen. Dadurch müsste in diesen Leistungsklassen eine zusätzliche Unterscheidung eingeführt werden oder es kommt zur Bevorzugung oder Benachteiligung einer Technologie.
- Wenn bei Mehrkesselanlagen (≥ 2 Kessel) ein Kessel einer höheren Leistungsklassen eingebaut wird, gilt für alle Feuerungen die Anzahl Starts der kleineren Leistungsklasse. Nachfolgend sind 3 Lesebeispiele angeführt:
    - Zweikesselanlage mit 1’200 kW Gesamtleistung im Ganzjahresbetrieb und einer Leistungsaufteilung 1/3 und 2/3 mit Kesselleistungen von 400 kW und 800 kW mit Holzhackschnitzel:
        - 1'500 Starts pro Jahr (Anzahl Starts der Leistungsklasse 70-500 kW).
    - Zweikesselanlage mit 1’200 kW Gesamtleistung im Ganzjahresbetrieb und einer Leistungsaufteilung 50 % und 50 % mit Kesselleistungen von 600 kW und 600 kW mit Holzhackschnitzeln
        - 1'000 Starts pro Jahr (Anzahl Starts der Leistungsklasse >500 kW).
    - Dreikesselanlage mit 3x 400 kW mit Holzhackschnitzeln im Ganzjahresbetrieb
        - 1’850 Starts pro Jahr (Anzahl Starts der Leistungsklasse 70-500 kW).
    - Dreikesselanlage mit 2x 520 kW und 1x160 kW mit Holzhackschnitzeln im GJB
        - 1’250 Starts pro Jahr (Anzahl Starts der Leistungsklasse >500 kW).
- Da die Unterschiede der statistischen Auswertung für Feuerungen mit 500-1000 kW und >1 MW gering sind, wird zur Vereinfachung auf die Unterscheidung der Anzahl Starts für diese beiden Kategorien verzichtet und nur eine Leistungsklasse >500 kW definiert. Für diese Leistungsklasse soll die Anzahl Starts der statistischen Auswertung für Anlagen 500-1000 kW gelten.

4.4.1 Finaler Vorschlag – mit Unterscheidung für verschiedene Startzähler

Im finalen Vorschlag (Tabelle 8) gibt es eine Unterscheidung für die maximale Anzahl Starts pro Jahr für Anlagen, die alle Starts zählen und für Anlagen, die nur die Anzahl Zündungen zählen. Die vorgeschlagene maximale Anzahl entspricht für Ein- und Zweikesselanlagen mehrheitlich dem Q75 der statistischen Auswertung (siehe Tabelle 4).

Tabelle 8 Vorschlag 2 von Verenum AG zur maximalen Anzahl Starts pro Jahr und Anlage mit Unterscheidung, für die verschiedenen Startzähler.
Legende: HZ…Betrieb nur während der Heizsaison, GJB…Ganzjahresbetrieb, HS...Holzhackschnitzel

Leistung Einzelkessel[#]	Brennstoff	Wassergehalt	Startzähler	Anzahl Starts pro Jahr und Anlage			
				1-Kessel		2-Kessel	3-Kessel
				HZ	GJB	GJB	GJB
70 kW–500 kW	Pellets & HS	≤ 25 %	Nur Anzahl Zündungen	**400**	**1100**	+300* pro Kessel **1400**	+300* pro Kessel **1700**
	HS	> 25 %		-20 % **350**	-20 % **900**	-20 % **1150**	-20 % **1400**
70 kW–500 kW	Pellets & HS	≤ 25 %	Alle Starts	**700**	**1500**	+500* pro Kessel **2000**	+500* pro Kessel **2500****
	HS	> 25 %		-20 % **550**	-20 % **1200**	-20 % **1600**	-20 % **2000**
>500 kW	Pellets & HS	beliebig	Alle Starts	**400**	**600**	+400** pro Kessel **1000**	+250* pro Kessel **1250**

[#]Wenn bei Mehrkesselanlagen (≥ 2 Kessel) ein Kessel einer höheren Leistungsklassen eingebaut wird, gilt für alle Feuerungen die Anzahl Starts der kleineren Leistungsklasse.

*Zusätzliche Anzahl Starts pro weiteren Kessel entspricht ~2/3 der Anzahl Starts für einen Kessel derselben Leistungsklasse für die Heizperiode.

** Zusätzliche Anzahl Starts für den zweiten Kessel entspricht der Anzahl Starts des HZ vom ersten Kessel.

Beschreibung Beurteilungsschema für die Leistungskategorie 70-500 kW

- Für Brennstoffe mit höherem Wassergehalt (>25 %) wird im Vergleich zu Holzhackschnitzeln mit Wassergehalt <25 % eine um 20% tiefere Anzahl Starts verlangt.
- Zwischen industriellen Feuerungen und Seriengeräten wird aus folgenden Gründen keine Unterscheidung vorgenommen:
  - Einfacher für den Vollzug
  - Wenn industrielle Anlagen eine so hohe Anzahl Starts aufweisen würden wie Seriengeräte, gäbe es mit grosser Wahrscheinlichkeit erhebliche Probleme im Betrieb (Störungen, Verschleiss, etc.) oder Nachbarschaftsklagen, was höchst wahrscheinlich zu Betriebsoptimierungen führen würde.
- Es wird keine Unterscheidung zwischen Pellets und Hackschnitzel mit einem Wassergehalt <25 % vorgenommen

Beschreibung Beurteilungsschema für die Leistungskategorie >500 kW

- Einzel-Kessel mit dieser Leistung sind ausschliesslich industrielle Feuerungen, in denen auch problemlos Brennstoffe mit höheren Wassergehalten eingesetzt werden können. Daher wird keine Unterscheidung für die Anzahl Starts pro Jahr und Anlage zwischen verschiedenen Brennstoffen vorgenommen.
- Aufgrund der grösseren Leistungsklasse wird vermehrt der Einsatz von Hackschnitzeln erwartet und dadurch wird keine Toleranz von 20% gewährt.
- Da die Unterschiede zw. Anlagen mit 500-1000 kW und >1 MW Gesamtanlagenleistung gering sind, wird zur Vereinfachung auf die Unterscheidung der Anzahl Starts für diese beiden Leistungsklassen verzichtet und nur eine Leistungsklasse >500 kW definiert. Für diese Leistungsklasse soll die Anzahl Starts der statistischen Auswertung für Anlagen 500-1000 kW gelten.

Beschreibung Beurteilungsschema für Einkesselanlagen generell

- Die Anzahl im Heizbetrieb (HZ) sowie im Ganzjahresbetrieb (GJB) für die Leistungskategorie 70-500 kW entspricht dem Q75 der statistischen Auswertung (siehe Tabelle 4).
- Anlagen mit 70-500 kW im GJB, die alle Starts zählen:
  - Da die Q75 für Einkesselanlagen (1717) und Zweikesselanlagen (1725) im GJB praktisch ident sind, wurde ein Wert zwischen dem Median und dem Q75 festgelegt.
- Anlagen >500 kW im GJB
  - Das Q75 der statistischen Auswertung (522) ist nur um 25% höher als der Wert für den Heizbetrieb. Daher wurde eine geringfügig höhere Zahl von 600 festgelegt.

Beschreibung Beurteilungsschema für Mehr-Kesselanlagen (≥ 2 Kessel) generell

- Da für Mehrkesselanlagen (≥2 Kessel) entweder die Anzahl Daten gering ist oder die Bandbreite der Resultate sehr gross ist, wird die Anzahl Starts hier pro Kessel bis auf eine Ausnahme (GJB Zweikesselanlage >500 kW) für alle Leistungsklassen um 2/3 der Anzahl Starts für eine Einkesselanlage mit Betrieb nur während der Heizsaison derselben Leistungsklasse erhöht.
- Aufgrund der geringen Verbreitung von Anlagen mit vier oder mehr Kesseln (gemäss statistischer Auswertung und mündlicher Auskunft der am Projekt beteiligten Kantonalen Vollzugsbehörden) wird das Beurteilungsschema nur für Anlagen mit maximal drei Kesseln festgelegt. Für Anlagen mit ≥4 Kesseln soll eine Einzelfallbeurteilung vorgenommen und die max. Anzahl Starts pro Jahr individuell festgelegt werden.
- 70-500 kW
  - 300 ist aufgerundet von 400x2/3=267
  - 500 ist aufgerundet von 700x2/3 = 467
- >500 kW: 250 ist abgerundet von 400x2/3=266.7

4.4.2 Vorgehen, wenn die maximale Anzahl Starts nicht eingehalten werden kann

Wenn die maximale Anzahl Starts pro Jahr überschritten werden, soll ein mehrstufiges Verfahren angewendet werden (Bild 8).

- Wenn die maximale Anzahl Starts pro Jahr und Anlage nicht eingehalten werden kann
  - soll der Anlagenbetreiber der Behörde möglich Gründe für das Überschreiten mitteilen.
  - Keine weiteren Auflagen seitens der Behörde sind erforderlich, wenn
    1. es nachvollziehbare Gründe für das Überschreiten gibt (z.B. 1. Betriebsjahr mit Einregulierungsphase; Defekt an Anlagenkomponente, der nicht sofort erkannt wurde, etc.) und,
    2. davon ausgegangen werden kann, dass im darauffolgenden Jahr die Vorgabe wieder eingehalten werden kann.
    3. Nach Abschluss des darauffolgenden Jahres, muss die Anzahl Anfahrvorgängen pro Jahr den Behörden zur Kontrolle übermittelt werden.
       a. Wenn die max. zulässig Anzahl Starts wieder überschritten wird, wird der Anlagenbetreiber von der Behörde hingewiesen, dass eine Betriebsoptimierung durchzuführen ist.
  - Wenn es keine nachvollziehbaren Gründe gibt, wird der Anlagenbetreiber von der Behörde hingewiesen, dass eine Betriebsoptimierung durchzuführen ist.
- Die Betriebsoptimierung
  - sieht vor, dass der Anlagenbetreiber die nötigen Schritte zur Reduktion der Anzahl Starts einleitet (Kontrolle von Kesselanlage und Abgasreinigung, Prüfen der Brennstoffqualität (Wassergehalt und Stückigkeit), Optimierung des Speicher-Lademanagements, Optimierungen der Wärmebezüger, usw.).
  - Die Betriebsoptimierung soll in angemessener Zeit jedoch spätestens bis nach der nächsten Heizperiode abgeschlossen.
- Sollte sich nach einer durchgeführter Betriebsoptimierung nach einem weiteren Betriebsjahr keine Verbesserung zeigen, ist QM-Holzheizwerke oder QS-Support einzuschalten.
- Sollte die Begleitung durch QM-Holzheizwerke oder QS-Support zeigen, dass keine Verbesserungen möglich sind oder durch die vorgeschlagenen Massnahmen die maximal zulässige Anzahl Starts weiterhin nicht eingehalten werden kann, soll die Behörde eine Einzelfallbeurteilung vornehmen.
  - In der Einzelfallbeurteilung sollen neben der Anzahl Starts pro Jahr weitere Faktoren wie z.B. die Einhaltung der LRV-Grenzwerte, das Wärmespeichervolumen und die Verfügbarkeit von Feinstaubabscheidern berücksichtigt werden.

In Klagefällen wird von der Behörde angeordnet, dass die Brennstoffqualität beurteilt werden muss und eine Betriebsoptimierung durchzuführen ist.

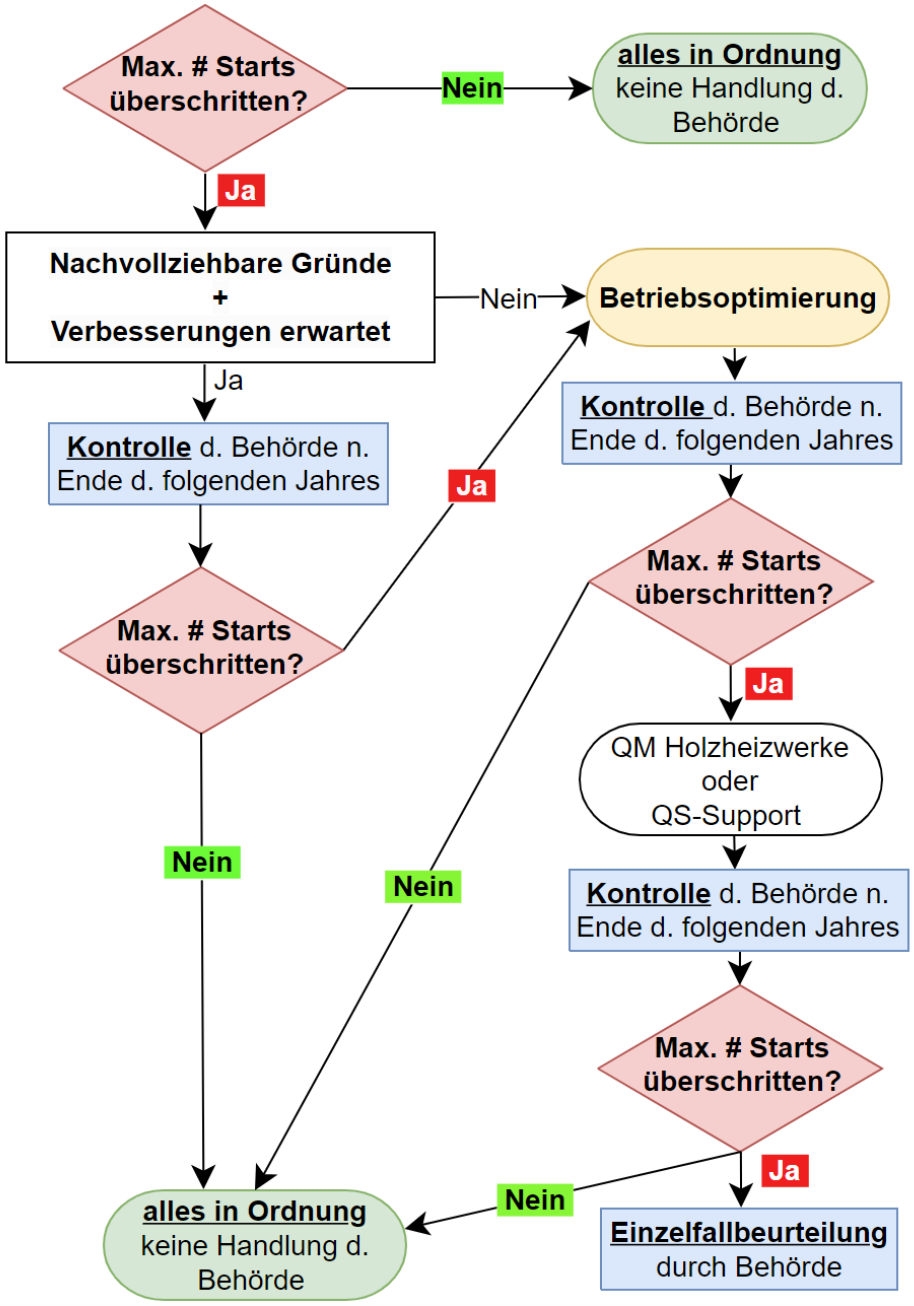


Bild 8 *Flussdiagramm zum Vorgehen, wenn die maximal zulässige Anzahl Starts überschritten wird.*

4.5 Vorschlag zu maximal zulässigen Anzahl Starts von anderen Projekteilnehmenden (Stand Ende 2022)

Bereits zum Ende von Projekt-Teil 1 wurden von 3 Projektteilnehmenden Vorschläge zu maximal zulässigen Anzahl Starts pro Jahr übermittelt. Bei der Startsitzung von Projekt-Teil 2 blieb jedoch nicht genügend Zeit diese Vorschläge zu diskutieren. Aus diesem Grund sind diese hier nachfolgend nochmals aufgelistet. Die Vorschläge wurden in die gleiche Kategorisierung transferiert, wie von Verenum AG vorgeschlagen.

Tabelle 9: Vorschlag von Holzfeuerungen Schweiz zur maximalen Anzahl Starts pro Jahr und Anlage für Anlagen ohne oder mit zu kleinem Wärmespeicher sowie Neuanlagen ab 70 kW_{FWL}.

			Anzahl Starts pro Jahr und Anlage				
Leistung Gesamtanlage	**Brennstoff**	**Wassergehalt**	**1-Kessel**		**2-Kessel**	**3-Kessel**	**4-Kessel**
			HZ	GJB	GJB	GJB	GJB
>70 kW	Pellets & HS	< 35 %	500	1000	+800 pro Kessel **1800**	+800 pro Kessel **2600**	+800 pro Kessel **3400**
	HS	> 35 %	500	800	+700 pro Kessel **1500**	+700 pro Kessel **2200**	+700 pro Kessel **2900**

Tabelle 10: Vorschlag des AWEL zur maximalen Anzahl Starts pro Jahr und Anlage für Anlagen >70 kW.

			Anzahl Starts pro Jahr und Anlage				
Leistung Gesamtanlage	**Brennstoff**	**Wassergehalt**	**1-Kessel**		**2-Kessel**	**3-Kessel**	**4-Kessel**
			HZ	GJB	GJB	GJB	GJB
>70 kW	Pellets & HS	< 35 %	500	1000	1500	1500	1500
	HS	> 35 %	500	750	1000	1000	1000

Tabelle 11: Vorschlag des ANU Graubünden zur maximalen Anzahl Starts pro Jahr und Anlage

			Anzahl Starts pro Jahr und Anlage				
Leistung Einzelkessel#	**Brennstoff**	**Wassergehalt**	**1-Kessel**		**2-Kessel**	**3-Kessel**	**4-Kessel**
			HZ	GJB	GJB	GJB	GJB
70 kW–500 kW	Pellets	-	-	1000/ 1200*	1500	+1/3 von 2-Kessel 1500+500= **2000**	+1/3 von 2-Kessel 2000+500= **2500**
	HS	< 35 %	-	700	1200	+1/3 von 2-Kessel 1200+400= **1600**	+1/3 von 2-Kessel 1600+400= **2000**
	HS	> 35 %	300	-	-	-	-
500 kW-1 MW	Pellets	-	-	700	1500	+1/3 von 2-Kessel 1500+500= **2000**	+1/3 von 2-Kessel 2000+500= **2500**
	HS	< 35 %	-	700	1200	+1/3 von 2-Kessel 1200+400= **1600**	+1/3 von 2-Kessel 1600+400= **2000**
	HS	> 35 %	300	-	-	-	-
> 1 MW	HS	> 35 %	200	500	-	-	-

*1000 für Kessel mit Leistungen 250-500 kW und 1200 für Kessel mit Leistungen 70-250 kW

5 Simulation der mittleren Konzentrationen von Staub und CO

5.1 Vorgehen - Allgemein

Das Ziel der Simulation ist es, die mittleren Emissionen für Staub und CO von verschiedenen Anlagenkonzepten miteinander zu vergleichen. Beim Vergleich verschiedener Anlagenkonzepte soll vor allem ein Anlagenbetrieb mit industriellen Feuerungen dem Betrieb mit Mehrkessel-Seriengeräten gegenübergestellt werden. Bei Mehrkesselanlagen kann die Gesamtanlagenleistung im Vergleich zur Leistung der Einzelkessel einen Übergang in die nächsthöhere LRV-Kategorie bewirken, in der tiefere Grenzwerte gelten. Aus diesem Grund soll auch der Einfluss von verschiedenen Emissions-Niveaus im Regelbetrieb auf die Gesamtemissionen simuliert werden. Für solche Simulationen müssen jedoch zahlreiche Annahmen zum Anlagenbetrieb getroffen werden und zahlreiche Eingabeparameter verfügbar sein oder ebenfalls angenommen werden. Nachfolgend werden exemplarisch einige notwendige Annahmen und Parameter aufgelistet.

- Betrachtungszeitraum
  - Ganzes Jahr, Heizperiode, Sommerbetrieb, einzelner Tag, etc.
- Anlagenkonfiguration
  - Einkesselanlagen oder Zweikesselanlage, Mehrkessel-Kaskadenanlage
  - Industrielle Feuerungen oder Seriengeräte
  - Aufteilung der Kesselleistung bei Zwei- und Mehrkesselanlagen
- Angaben zum Feuerungsbetrieb
  - Anteil im Standby-/AUS-Betrieb
  - Anzahl Starts
  - Leistungsbedarf und Leistungsmodulation im Regelbetrieb
  - Emissionen während der verschiedenen Betriebsphasen
  - Abgasvolumenstrom bzw. produzierte Leistung der verschiedenen Betriebsphasen

Alle Annahmen und Eingabeparameter können erhebliche Bandbreiten aufweisen und daher haben die Ergebnisse der Frachtsimulation erhebliche Unsicherheiten. Um die Anzahl der Annahmen zu reduzieren, wurden für die Simulationen die beiden Anlagen ausgewählt, bei denen in Projekt Teil 1 Langzeit-Emissionsmessungen für CO, gravimetrisch Messungen der Staubemissionen (PM_{grav}) sowie Abgasvolumenstrom-Messungen für verschiedene Betriebsphasen durchgeführt wurden. Die Simulationen wurden für den Zeitraum der Messungen durchgeführt. In Tabelle 12Tabelle 13 ist eine Übersicht über die Anlagendaten und der in Projekt Teil 1 bestimmten Parameter zu finden sowie die simulierten Anlagenkonfigurationen, die mit den Messergebnissen aus Teil 1 verglichen werden. Die mittleren Emissionen über den gesamten Messzeitraum, der alle Phasen (Regelbetrieb, Anfahren, Abfahren und Standby) beinhaltet, für Schadstoffe CO und Staub wird gemäss nachfolgender Formel berechnet:

$$Schadstoffkonzentration\ total\ [mg/m^3] = \frac{\sum_i EF_{i,j}\left[\frac{mg}{m^3}\right] \cdot V_{AG,i}\left[\frac{m^3}{h}\right] \cdot Zeit_i\ [h]}{\sum_i V_{AG,i}\left[\frac{m^3}{h}\right] \cdot Zeit_i\ [h] \cdot} \qquad (1)$$

$EF_{i,j}$ … Mittlere nicht-normierte Konzentration des Schadstoffs j (CO oder PM_{grav}) während der Betriebsphase i

$V_{AG,i}$ … Betriebsabgasvolumenstrom während der Betriebsphase i

$Zeit_{,i}$ … Gesamte Zeit (Summe aller h) der jeweiligen Betriebsphase i während der Messperiode

Mit den Simulationen ist nur ein Vergleich der berechneten mittleren Konzentrationen (beinhaltet alle Phasen: Regelbetrieb, An- und Abfahren sowie Standby) für Staub und CO einer simulierten Anlage mit den gemessenen Werten aus Projekt Teil 1 möglich. Eine Unterscheidung für verschiedene Staub-Komponenten bzw. eine Gewichtung unterschiedlicher Stäube, die in verschiedenen Betriebsphasen entstehen ist nicht möglich. Folgende Staubarten können in den unterschiedlichen Betriebsphasen auftreten:

- Russ und organische Verbindungen, die als potenziell gesundheitsschädlich eingestuft sind entstehen hauptsächlich während der An- und Abfahrvorgänge.
- Anorganische Salze, die weniger gesundheitsrelevant sind und während des Regelbetriebs entstehen.

Tabelle 12 Übersicht über die Anlagendaten und der in Projekt Teil 1 bestimmten Parameter sowie die für die Berechnungen simulierten Anlagenkonfigurationen, Parameter und Parametervariationen.

Anlage 1 (Standort A)	Anlage 2 (Standort B)
Informationen zur Anlage: • Zweikessel Pellet-Anlage • Kesselleistung: o Kessel 1 (K1) = 140 kW o Kessel 2 (K2) = 220 kW • Messperiode: o 18 Tage o 04.04.2022 bis 22.04.2022	Informationen zur Anlage • Vierkessel Holzhackschnitzel-Anlage • Kesselleistung: o 4 x 330 kW • Messperiode: o 17 Tage o 07.03.2022 bis 23.03.2022
Messergebnisse • Anzahl Starts o K1 = 40 und K2 = 73 total o ~6 Starts pro Tag der Gesamtanlage • CO und Abgasvolumenstrom kontinuierlich • PM_{grav} für die Betriebsphasen o An- und Abfahren sowie Regelbetrieb	Messergebnisse • Anzahl Starts o 120 Starts total o ~7 pro Tag und Gesamtanlage • CO und Abgasvolumenstrom kontinuierlich • PM_{grav} für die Betriebsphasen o An- und Abfahren sowie Regelbetrieb • Wassergehalt von zahlreichen Brennstoffproben für alle 4 Kessel
Annahmen und Variationen der Simulation • Berechnung Gesamtemissionen der Messperiode der Zweikessel Pelletanlage mit Variationen der Emissionen des Regelbetriebs • Simulation einer Einkessel Hackschnitzel Anlage mit gleicher Gesamt-Leistung (360 kW) • Gleicher Zeitraum wie Messung • Gleiche totaler Volumenstrom wie während Messperiode (entspricht gleicher Energiemenge) • Mit Emissionswerten aus den Messungen • Mit zusätzlichen Annahmen für die Emissionen • Verschiedene Annahmen zur Anzahl Starts pro Tag und Dauer der An- und Abfahrphasen	Annahmen und Variationen der Simulation • Berechnung Gesamtemissionen der Messperiode der Vierkessel Holzhackschnitzel-Anlage mit Variationen der Emissionen des Regelbetriebs. • Simulation einer Zweikessel Hackschnitzel Anlage mit gleicher Gesamt-Leistung (1'320 kW) o Leistungsaufteilung 1/3 und 2/3 • Gleicher Zeitraum wie Messung • Gleiche totaler Volumenstrom wie während Messperiode (entspricht gleicher Energiemenge) • Mit Emissionswerten aus den Messungen • Mit zusätzlichen Annahmen für die Emissionen • Verschiedene Annahmen zur Anzahl Starts pro Tag und Dauer der An- und Abfahrphasen

5.2 Einfluss der Emissionen im Regelbetrieb auf die Gesamtemissionen der im Projektteil 1 gemessenen Anlagen

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Emissionen des Regelbetriebs auf die Gesamtemissionen untersucht, die erheblich durch den massgebenden LRV-Grenzwert (EGW) beeinflusst werden können. Bei Mehrkesselanlagen kann nämlich die Gesamtanlagenleistung im Vergleich zur Leistung der Einzelkessel einen Übergang in die nächsthöhere LRV-Kategorie bewirken, in der tiefere Grenzwerte gelten. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel verschiedenen Emissions-Niveaus im Regelbetrieb angenommen und deren Einfluss auf die Gesamtemissionen simuliert.

5.2.1 Vorgehen

Die Simulationen werden durchgeführt für die beiden in Projekt Teil 1 untersuchten Anlagen, für den gleichen Zeitraum der Messungen 2022 sowie mit dem während der Messung angetroffenen Betriebsverhalten.

In Tabelle 13 sind die Messergebnisse aus Projekt Teil 1 von der Zweikessel Pelletanlage (1x 140 kW und 1x 220 kW) am Standort A aufgelistet. Die Messung fand während 18 Tagen zwischen 04.04.2022 bis 22.04.2022 statt. Täglich kam es zu rund 6 An- und Abfahrvorgängen von beiden Kesseln zusammengezählt. Um die Simulation zu vereinfachen, wurden die Resultate der Staubmessungen für Warmstarts (<6h) und Kaltstarts (>12h) in einem gewichteten Mittelwert für «Anfahren» umgerechnet.

In Tabelle 14 sind die Messergebnisse aus Projekt Teil 1 von der Vierkessel Holzhackschnitzelanlage (4x 330 kW) am Standort B aufgelistet. Die Messung fand während 17 Tagen zwischen 07.03.2022 bis 23.03.2022 statt. Täglich fanden rund 7 An- und Abfahrvorgänge von allen Kesseln zusammengezählt. Um die Simulationen zu vereinfachen, wurden die Resultate der Staubmessungen für Warmstarts (<6h) und Kaltstarts (>12h) in einem gewichteten Mittelwert für «Anfahren» umgerechnet. Da am Standort B Staubemissionen nur von Kessel A (KA, Holzhackschnitzel mit einem Wassergehalt zw. ~30 % und einem Feingutanteil von 10-14 %)

und Kessel E (KE, Wassergehalt zw. 9-14 % und einem Feingutanteil von 1-6 % gemessen wurden, wurden die Werte für Kessel B (KB) und Kessel C (KC) angenommen (siehe Tabelle 14).

Tabelle 13 Mittelwerte der jeweiligen Betriebsphase aus allen Messwerten aus Projekt Teil 1 der Zweikessel Pelletanlage. Legende: K1…Kessel 1 (140 kW); K2…Kessel 2 (220 kW); V_{AG}, CO u. PM_{grav}: Nicht-normierte Werte für den Abgasvolumenstrom, CO und gravimetrisch bestimmte Gesamt-Staubemissionen.

Betriebsphase	O_2 [%]		V_{AG} [m³/h]		CO [mg/m³]		PM_{grav} [mg/m³]		Zeit [h]	
	K1	K2	K1	K2	K1	K2	K1	K2	K1	K2
Anfahren	16.7	17.1	182 ± 32	176 ± 77	284 ± 224	455 ± 276	21.6*	22.2*	5.6#	11.7#
Abfahren	18.3	18.8	126 ± 78	169 ± 110	926 ± 876	1086 ± 619	28 ± 17	88 ± 21	44	85
Regelbetrieb	7.8	9.1	301 ± 99	376 ± 239	36 ± 106	40 ± 251	32 ± 25	8 ± 5	125	240
Aus	20.1	20.9	56 ± 27	13 ± 43	64 ± 111	193 ± 253	0**	0**	252	90
Total									427	427

*Mit der Zeit [h] von Warmstart <6h, Kaltstart >12h und Anfahren 6-12h gewichteter Mittelwert

**Annahme, dass es keine Staubemissionen während des AUS-/Standby-Betriebs gibt. Im Gegensatz zu CO wurden keine Staubemissionen im AUS-/Standby-Betrieb gemessen.

#Summe aus Warmstart <6h, Kaltstart >12h und Anfahren 6-12h

Tabelle 14 Mittelwerte der jeweiligen Betriebsphase aus allen Messwerten der Vierkessel Hackschnitzelanlage (4x 330 kW) aus Projekt Teil 1. Legende: KA…Kessel A, KB…Kessel B, KC…Kessel C, KE…Kessel E, V_{AG}, CO und PM_{grav}: Nicht-normierte Werte für Abgasvolumenstrom, Kohlenmonoxid und gravimetrisch bestimmte Gesamt-Staubemissionen.

Betriebsphase	O_2 [%]				V_{AG} [m³/h]				CO [mg/m³]				PM_{grav} [mg/m³]				Zeit [h]			
	KA	KB	KC	KE	KA	KB	KC	KE	KA	KB	KC	KE	KA	KB*	KC**	KE	KA	KB	KC	KE
Aus	20.9	20.3	21.0	21.0	10	176	154	70	112	127	89	104	0.0#	0.0#	0.0#	0.0#	165	157	169	214
Abfahren	18.2	17.3	18.0	18.6	328	333	426	440	1947	1818	2109	2652	22.6	65.4	44.0	65.4	17.4	16.3	13.6	8.3
Anfahren	17.9	17.2	16.3	18.3	329	549	429	336	1074	1359	1793	511	68‡	68‡	60‡	52‡	12.5+	14.7+	11.5+	4.2+
Regelbetrieb	11.1	8.1	8.8	7.7	544	623	577	732	380	580	239	121	23.8	23.8	15.6	7.4	161	152	162	149
kl. Entaschung	12.0	10.7	10.3	9.3	621	557	530	689	1164	1650	2623	965	27.7	57.5	42.6	57.5	23.5	36.8	21.6	2.3
Total																	380	378	378	379

*jeweils höchste Werte von Kessel A oder Kessel E

**Mittelwerte zwischen KA und KE, da es bei KC Perioden gab mit Hackschnitzel mit ähnlichem Wassergehalt und Feingutanteil gab wie in KA und Perioden mit ähnlichem Brennstoff wie in KE

#Annahmen, dass es keine Staubemissionen während des AUS-/Standby-Betriebs gibt. Im Gegensatz zu CO wurden keine Staubemissionen im AUS-/Standby-Betrieb gemessen.

‡Mit der Zeit [h] von Warmstart <6h, Kaltstart >12h und Anfahren 6-12h gewichteter Mittelwert

+ Summe aus Warmstart <6h, Kaltstart >12h und Anfahren 6-12h

Die mittleren Konzentrationen von CO und PM_{grav} für die beiden Anlagen am Standort A und B über den gesamten Zeitraum (beinhaltet alle Phasen: Regelbetrieb, An- und Abfahren sowie Standby) wird mit Formel (1) und den Werten aus Tabelle 13 sowie Tabelle 14 für die Betriebsphasen Anfahren, Abfahren, AUS und Regelbetrieb berechnet. Da die Werte beider Anlagen im Regelbetrieb teilweise deutlich unterhalb der massgebenden EGW liegen und um den Einfluss verschiedener EGW aufzuzeigen, wurde die Simulation ausserdem mit folgenden weiteren Variationen durchgeführt:

- V_{AG} und Zeit für alle Betriebsphasen und Kessel unverändert gemäss Tabelle 13 und Tabelle 14
- Mittlere Emissionen für die Betriebsphase Regelbetrieb
    - Staub für beide Anlagen
        - Mit 17 mg/m³ bei Bezugs-O_2 von 13 % (26 mg/m³ nicht-normiert).
            - Dies entspricht dem Mittelwert der LRV-Messungen im Kanton Zürich für Pelletkessel <500 kW mit Feinstaubabscheider.
        - Mit 34 mg/m³ bei Bezugs-O_2 von 13 % (53 mg/m³ nicht-normiert).
            - Dies entspricht dem Mittelwert der LRV-Messungen im Kanton Zürich für Pelletkessel <500 kW ohne Feinstaubabscheider. Der Mittelwert der LRV-Messungen im Kanton Zürich für Hackschnitzelfeuerungen <500 kW mit Feinstaubabscheider beträgt 29 mg/m³ bei Bezugs-O_2 von 13 %.
        - Die EGW der LRV für Staub sind

        - 70-500 kW: 50 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 13%
        - 500-1000 kW: 20 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 13%
        - 1 MW-10 MW: 20 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 11% (entspricht 16 mg/m^3 bei 13%)
    - CO der 2-Kessel Pelletanlage am Standort A
        - Keine weitere Simulation, da Daten[1] zeigen, dass Pelletkessel <500 kW in der Regel sogar den Grenzwert von 250 mg/m^3 bei Bezugs-O2 von 11% einhalten können.
    - CO der 4-Kessel Hackschnitzelkaskadenanlage am Standort B
        - Mit dem höchsten Wert aus Messungen (580 mg/m^3 entspricht rund 400 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2) für alle Kessel
        - Mit 250 mg/m^3 bei 11 % Bezugs-O_2 (~300 mg/m^3 nicht-normiert) für alle Kessel
        - Die EGW der LRV für CO sind
            - 70-500 kW: 500 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 13%
            - 500-1000 kW: 500 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 13%
            - 1 MW-10 MW: 250 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 11% (entspricht 200 mg/m^3 bei 13%)
- Mittlere Emissionen der Betriebsphasen An- und Abfahren sowie AUS:
    - Mit unveränderten Werten gemäss Tabelle 13 und Tabelle 14 für beide Anlagen
    - Mit den höchsten Werten gemäss Tabelle 13 und Tabelle 14 für beide Anlagen
    - Mit 3-mal höheren Werten als der «Worst-Case» Regelbetrieb
        - Mit 159 mg/m^3 (= 3x 53 mg/m^3) für Staub für beide Anlagen
        - Keine weitere Variation für CO am Standort B, da die höchsten Werte aus Tabelle 14 (2652 mg/m^3 und 1793 mg/m^3) grösser sind als der dreifache Wert des Regelbetriebs.

Tabelle 15 Übersicht über die Variationen der Simulationen zum Einfluss der Emissionen im Regelbetrieb auf die Gesamtemissionen der im Projektteil 1 gemessenen Anlagen.

Anlage	Komponente	Variation	Emissionen	
			Regelbetrieb	An- und Abfahren
Standort A	Staub	1	gemäss Tabelle 13*	gemäss Tabelle 13*
		2	gemäss Tabelle 13*	88 mg/m3 für beide Kessel**
		3	26 mg/m^3 für beide Kessel#	gemäss Tabelle 13*
		4	53 mg/m^3 für beide Kessel***	gemäss Tabelle 13*
		5	53 mg/m^3 für beide Kessel***	159 mg/m^3 für beide Kessel (= 3 x 53 mg/m^3)
	CO	1	gemäss Tabelle 13	gemäss Tabelle 13
Standort B	Staub	1	gemäss Tabelle 14*	gemäss Tabelle 14*
		2	gemäss Tabelle 14*	68 mg/m^3 für alle Kessel**
		3	26 mg/m^3 für alle Kessel#	gemäss Tabelle 14*
		4	53 mg/m^3 für alle Kessel***	gemäss Tabelle 14*
		5	53 mg/m^3 für alle Kessel***	159 mg/m^3 für alle Kessel (= 3 x 53 mg/m^3)
	CO	1	gemäss Tabelle 14*	gemäss Tabelle 14*
		2	gemäss Tabelle 14*	1793 mg/m^3 für An- & 2652 mg/m^3 für Abfahren*
		3	300 mg/m^3 für alle Kessel##	gemäss Tabelle 14*
		4	580 mg/m^3 für alle Kessel###	gemäss Tabelle 14*
		5	580 mg/m^3 für alle Kessel###	1793 mg/m^3 für An- & 2652 mg/m^3 für Abfahren*

*entspricht gemessenen Werten für jeden Kessel aus Projekt Teil 1. Für Staub entspricht dies einem für die Gesamtanlage gewichteten Mittelwert von 9.9 mg/m^3 und für CO für 25 mg/m^3 jeweils bei 13 % Bezugs-O_2.

**höchste(r) Wert(e) aus Tabelle 13 oder Tabelle 14

***entspricht 34 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 13 %

#entspricht 17 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 13 %

##entspricht 250 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 11 % und ist der EGW der LRV für Anlagen 1–10 MW

###entspricht 360 mg/m^3 bei Bezugs-O_2 von 13 % und ist der höchste Mittelwert der Messung (siehe Tabelle 14)

[1]In [2] ergibt die Auswertung von 360 LRV-Messungen von Pelletfeuerungen 70-500 kW einen CO-Medianwert von 55 mg/MJ bei Voll- (entspricht 83 mg/m^3 bei 13% Bezugs-O_2) und 130 mg/MJ bei Teilleistung (entspricht 195 mg/m^3 bei 13% Bezugs-O_2).

5.2.2 Resultate

5.2.2.1 Standort A - Zweikessel Pelletanlage, 1x 140 kW und 1x 220 kW

Die mittleren nicht-normierten Konzentrationen von CO und PM_{grav} über den gesamten Zeitraum (beinhaltet alle Phasen: Regelbetrieb, An- und Abfahren sowie Standby) werden mit Formel (1) berechnet. Für den Standort A ergibt sich für PM_{grav} gemäß den Werten der Messperiode 2022 (Eingabeparameter gemäß Tabelle 15) eine mittlere Konzentration von 20.7 mg/m³ (Simulation Variation 1, siehe Bild 9) und für CO 169 mg/m³.

In Variation 2, wenn für den Regelbetrieb die Werte von Variation 1 und für die An- und Abfahrphasen beider Kessel der höchste Wert verwendet wird (88.3 mg/m³ nicht normiert, entspricht dem 2.7- bis 11-fachen des Regelbetriebs), erhöht sich die mittlere Staubkonzentration auf 24.0 mg/m³, was einer Zunahme um 16 % entspricht.

In Variation 3 und 4 wurden für den Regelbetrieb beider Kessel die Werte der LRV-Messungen des Kantons Zürich eingesetzt (17 mg/m^3 und 34 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 für Pelletkesseln <500 kW mit und ohne Feinstaubabscheider). Diese Werte sind teilweise deutlich höher als die gemessenen (19.6 mg/m^3 für K1 und 8.5 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2). Für die An- und Abfahrphasen wurden die Mittelwerte für jeden Kessel der Messung in 2022 verwendet. Für Variation 3 ergibt sich eine mittlere Staubkonzentration von 29.0 mg/m^3 was einer Zunahme um 40% im Vergleich zum gemessenen Wert (Variation 1) entspricht. Mit Variation 4 ist die mittlere Staubkonzentration sogar um 140 % höher (49.8 mg/m^3).

In Variation 5 wurden die Werte des Regelbetriebs von Variation 4 (34 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 bzw. 53 mg/m^3 nicht-normiert) verwendet, und für die An- und Abfahrphasen wurde der dreifache Wert des Regelbetriebs (159 mg/m^3 nicht-normiert). Die mittlere Staubkonzentration von Variation 5 erhöht sich damit auf 62.8 mg/m^3, was einer Zunahme im Vergleich zu Variation 4 um 26% entspricht.

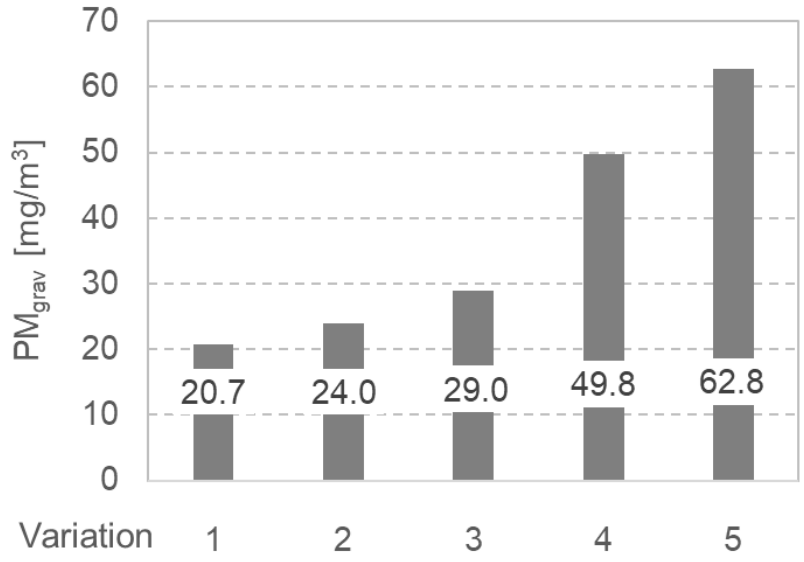


Bild 9 *Resultate der Frachtsimulationen zum Einfluss der Staubemissionen des Regelbetriebs am Standort A. Dargestellt ist die mittleren Staubkonzentration (PM_{grav}, nicht-normiert) über den gesamten Betrachtungszeitraum. Die Eingabeparameter der verschiedenen Variationen der Simulation (1-5) sind in Tabelle 15 aufgelistet.*

Die Resultate zeigen, dass die Emissionen während des Regelbetriebs einen grösseren Einfluss haben als die Emissionen der An- und Abfahrphasen. Eine Änderung der mittleren Emissionen während des Regelbetriebs von 10 auf 17 und auf 34 mg/m³ (bei 13% Bezugs-O_2) führt zu einer Zunahme der mittleren Gesamtemissionen um 40 % und 140 %. Eine Erhöhung der Emissionen während der An- und Abfahrphasen führt hingegen nur zu einer Zunahme der Gesamtemissionen von max. 26 %. Dies lässt sich wie folgt begründen:

- Die An- und Abfahrphasen sind kurz und weisen zudem einen geringeren Volumenstrom auf (47-56 % geringer im Vergleich zum Regelbetrieb).
- Obwohl es während der 18-tägigen Messung 40 An- und Abfahrvorgänge für Kessel 1 und 73 für Kessel 2 gab, machen diese Betriebsphasen zusammen nur 12 % für K1 und 23 % für K2 aus.
- Der Anteil des Standby-/AUS-Betriebs der beiden Kessel, bei dem keine Emissionen angenommen wurden, war hoch (59 % für Kessel 1 und 21 % für Kessel 2).

5.2.2.2 Standort B - Vierkessel Hackschnitzelanlage, 4x 330 kW

Die mittleren nicht-normierte Konzentrationen von CO und PM_{grav} über den gesamten Zeitraum (beinhaltet alle Phasen: Regelbetrieb, An- und Abfahren sowie Standby) wird mit Formel (1) berechnet. Für den Standort B ergibt die mit den Messwerten von 2022 (Tabelle 14) für PM_{grav} eine mittlere Konzentration von 20.2 mg/m^3 und für CO von 519 mg/m^3 (Simulation Variation 1, Bild 10).

In Variation 2, wenn für den Regelbetrieb die Werte von Variation 1 und für die An- und Abfahrphasen aller Kessel der höchste Mittelwert der Messungen verwendet wird (68.0 mg/m³ nicht normiert, entspricht dem 2.8- bis 7-fachen des Regelbetriebs), erhöht sich die mittlere Staubkonzentration auf 21.1 mg/m³. Dieser Unterschied zwischen Simulation Variation 2 und 1 für PM_{grav} (+4 %) ist nur sehr gering, da die mittleren Emissionen der An- und Abfahrphasen der verschiedenen Kessel jeweils nur für einen Kessel um mehr als 50 % höher waren, und die durchschnittliche Dauer der An- und Abfahrphasen kurz ist (0.2–0.5 Stunden).

Für PM_{grav} wurden in Variation 3 und 4 für den Regelbetrieb aller Kessel die Werte der LRV-Messungen des Kantons Zürich eingesetzt (17 mg/m^3 und 34 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 für Pelletkesseln <500 kW mit und ohne Feinstaubabscheider). Diese Werte sind teilweise deutlich höher als die gemessenen Werte (19.2 mg/m^3 für KA, 14.8 mg/m^3 für KB, 10.2 mg/m^3 für KC und 4.5 mg/m^3 für KE bei 13 % Bezugs-O_2). Für die An- und Abfahrphasen wurden die Mittelwerte für jeden Kessel der Messung in 2022 verwendet. Für Variation 3 ergibt sich eine mittlere Staubkonzentration von 26.4 mg/m^3, was einer Zunahme um 31% im Vergleich zum gemessenen Wert entspricht (Variation 1). Mit Variation 4 ist die mittlere Staubkonzentration sogar um 126 % höher (45.6 mg/m^3 nicht-normiert).

In Variation 5 wurden für PM_{grav} die Werte des Regelbetriebs von Variation 4 (34 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 bzw. 53 mg/m^3 nicht-normiert) verwendet, und für die An- und Abfahrphasen wurden die jeweils höchsten Mittelwerte der Messung 2022 (159 mg/m^3 nicht-normiert) angenommen. Die mittlere Staubkonzentration von Variation 5 erhöht sich damit auf 53.0 mg/m^3, was einer Zunahme im Vergleich zu Variation 4 um 16% entspricht.

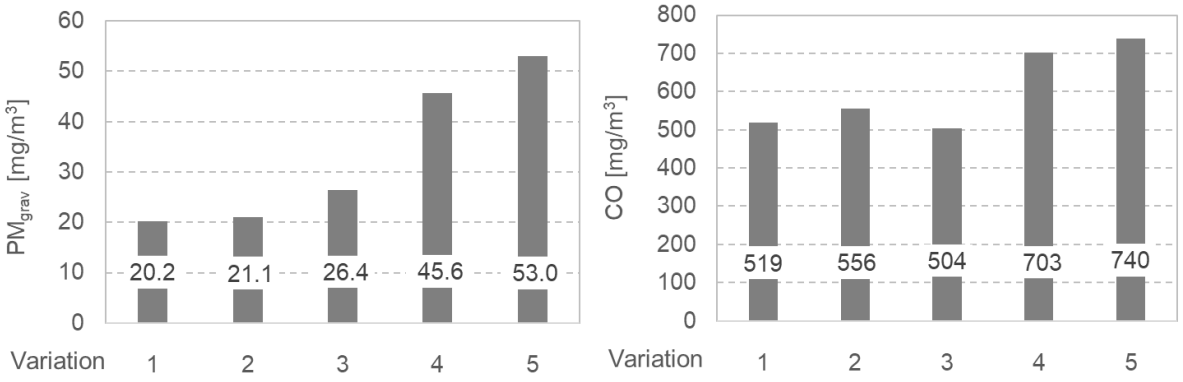


Bild 10 *Resultate der Frachtsimulationen zum Einfluss der Staubemissionen des Regelbetriebs am Standort B. Dargestellt ist die mittleren nicht-normierte Staubkonzentration (PM_{grav}, nicht-normiert, Bild links) und CO-Konzentration (Bild rechts) über den gesamten Betrachtungszeitraum. Die Eingabeparameter der verschiedenen Variationen der Simulation (1-5) sind in Tabelle 15 aufgelistet.*

In Variation 2, wenn für den Regelbetrieb die Werte von Variation 1 und für die An- und Abfahrphasen aller Kessel der jeweils höchste Mittelwert der Messungen verwendet wird (1793 mg/m^3 für An- & 2652 mg/m^3 für Abfahren), erhöht sich die mittlere Staubkonzentration auf 21.1 mg/m³. Dieser Unterschied zwischen Simulation Variation 2 und 1 für CO (+7 %) ist aus denselben Gründen wie für PM_{grav} sehr gering.

In Variation 3 wurde für alle Kessel im Regelbetrieb der EGW der LRV für Anlagen 1–10 MW angenommen (250 mg/m^3 bei 11 % Bezugs-O_2 bzw. 300 mg/m^3 nicht-normiert) und für die An- und Abfahrphasen wurden die Mittelwerte für jeden Kessel der Messung 2022 verwendet. Da für Kessel A und B die Mittelwerte der Messwerte des Regelbetriebs höher sind (380 mg/m^3 und 580 mg/m^3 nicht-normiert), jene von Kessel C geringfügig tiefer (239 mg/m^3 nicht-normiert) und nur jene von Kessel E deutlich tiefer (121 mg/m^3 nicht-normiert) sind, ist die mittlere CO-Konzentration von Variation 3 im Vergleich zur Messperiode 2022 (Variation 1) praktisch ident (-3 %).

In Variation 4 wurden CO-Werte für den Regelbetrieb für alle Kessel eingesetzt, die dem höchsten Mittelwert der Messung 2022 entsprechen (360 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 bzw. 580 mg/m^3 nicht-normiert). Für die An- und Abfahrphasen wurden, wie in Variation 3, die Mittelwerte für jeden Kessel der Messung 2022 verwendet. Für Variation 4 ergibt sich somit eine mittlere CO-Konzentration von 703 mg/m^3 was einer Zunahme um 35% im Vergleich zum gemessenen Wert entspricht (Variation 1).

In Variation 5 wurden für CO die Werte des Regelbetriebs von Variation 4 (360 mg/m^3 bei 13 % Bezugs-O_2 bzw. 580 mg/m^3 nicht-normiert) verwendet, und für die An- und Abfahrphasen aller Kessel wurde der höchste Mittelwert der Messungen verwendet (1793 mg/m^3 für An- und 2652 mg/m^3 für Abfahren, nicht-normiert). Die mittlere CO-Konzentration von Variation 5 erhöht sich damit auf 740.0 mg/m^3, was einer Zunahme im Vergleich zu Variation 4 um 5% entspricht.

Die Resultate für die mittleren Staub- und CO-Emissionen zeigen somit, wie bereits für die Zweikessel Pelletanlage am Standort A, dass die Emissionen während des Regelbetriebs einen größeren Einfluss haben als die Emissionen während der An- und Abfahrphasen. Eine Änderung der mittleren Staubemissionen während des Regelbetriebs von 11 mg/m³ auf 17 mg/m³und auf 34 mg/m³ (bei 13 % Bezugs-O_2) führt zu einer Zunahme der mittleren Gesamtemissionen um 31% und 126 % im Vergleich zur Messung 2022. Eine Erhöhung der Staubemissionen während der An- und Abfahrphasen führt hingegen nur zu einer Zunahme der mittleren Gesamtstaubemissionen von max. 16 %. Für CO ergibt eine Erhöhung der mittleren Emissionen im Regelbetrieb eine maximale Änderung der mittleren CO-Konzentration von 35 % im Vergleich zur Messung 2022, eine Erhöhung der mittleren Emissionen der An- und Abfahrphasen hingegen ergibt nur eine maximal 7 % höhere mittlere CO-Konzentration. Dies lässt sich wie folgt begründen:

- Die An- und Abfahrphasen sind kurz (0.2–0.5 Stunden) und weisen zudem einen geringeren Volumenstrom auf (im Mittel 35 % geringer im Vergleich zum Regelbetrieb).
- Obwohl es während der 17-tägigen Messung insgesamt 120 An- und Abfahrvorgänge der Gesamtanlage gab, machen diese Betriebsphasen im Mittel nur 4 % der gesamten Zeit aus. Im Gegensatz waren alle Kessel im Mittel 41% der Zeit im Regelbetrieb.

5.3 Einfluss der Anlagenkonfiguration

In diesem Kapitel werden die mittleren Emissionen für Staub und CO von verschiedenen Anlagenkonzepten miteinander vergleichen. Dabei wird hier simuliert, dass die in Projekt Teil 1 gemessen Anlagen mit Seriengeräten (Zweikessel Pelletanlage am Standort A und Vierkessel Hackschnitzelkaskadenanlage am Standort B) durch Anlagen mit industriellen Feuerungen ersetzt werden (Einkesselanalge am Standort A und Zweikesselanlage am Standort B).

5.3.1 Praxisbeispiel 1 (Standort A)

5.3.1.1 Vorgehen

Für die Simulation am Standort A wird folgendes angenommen:

- Eine industrielle Einkesselanlage, die mit Holzhackschnitzel betrieben wird und die gleiche Energiemenge erzeugt, ersetzt die Zweikessel Pelletanlage.
- Die Kesselleistung der Einkesselanlage entspricht exakt der Summer der Leistungen der Einzelkessel der Zweikessel Pelletanlage.
  - Daher wird angenommen, dass der Betriebsabgasvolumenstrom der Einkesselanlage der Summe der gemessenen Betriebsabgasvolumenströme von Kessel 1 und Kessel 2 entsprechen.
- Emissionen für die verschiedenen Betriebsphasen für einen «Best-» und einen «Worst-Case» sowie für weitere Varianten in denen entweder ein die Emissionen im An- und Abfahren oder im Regelbetrieb variiert wurden. Für den «Best-» und den «Worst-Case» werden die jeweils tiefsten und höchsten Messwerte von Kessel 1 und Kessel 2 verwendet.
- 3 Variationen für die durchschnittliche Dauer eines An- und Abfahrvorganges
  - «Best-» und «Worst-Case» bezeichnen die kürzesten bzw. längsten Werte aus den Messungen.
  - Die durchschnittlichen Zeiten der Variante «LZM» stammt aus der Auswertung der QS-Support Langzeitmessungen (LZM) von 18 Anlagen < 500 kW für Holz-Haschschnitzel und Pellets [1].
- 3 Variationen der täglichen Anzahl Starts
  - Es wird keine Unterscheidung für verschiedene Starts (Warm- oder Kaltstart, Start mit oder ohne Zündung bzw. Hochfahren aus dem Glutbettunterhalt) vorgenommen

- 2.9 Starts pro Tag für die Gesamtanlage
    - Die Anzahl 2.9 Starts pro Tag wurde ermittelt aus der Anzahl der Wechsel zwischen Phasen, in denen weder K1 noch K2 in Betrieb war und dem Start von mindestens einem Kessel, was insgesamt 52 Mal vorkam. Während der 18-tägigen Messung ergibt das somit 2.9 Starts pro Tag.
    - Es wird keine höhere Anzahl Starts simuliert, da die ~3 Starts pro Tag für eine industrielle Einkesselanlage bereits eine eher hohe Zahl ist.
- Eine reduzierte Anzahl von 1 Start pro Tag für die Gesamtanlage
- 0 Starts pro Tag für die Gesamtanlage unter der Annahme, dass der Kessel im Dauerbetrieb ist.

Tabelle 16 Parameter, die für Simulation für die Einkesselanlage am Standort A verwendet wurden. Legende: K1…Kessel 1 (140 kW); K2…Kessel 2 (220 kW); V_{AG}, CO und PM_{grav} sind die nicht-normierten Werte für den Betriebsabgasvolumenstrom, Kohlenmonoxid und die gravimetrisch bestimmten Gesamt-Staubemissionen. Best und Worst…Die jeweils tiefsten und höchsten Werte aus Tabelle 13

Betriebsphase	V_{AG} [m³/h]	PM_{grav} [mg/m³]				CO [mg/m³]				Zeit pro 1 Vorgang [h]		
	K1+K2* Pellets	Best	Worst Start & Stopp	Worst. Regel-betrieb	Worst alle Phasen	Best	Worst Start & Stopp	Worst Regel-betrieb	Worst alle Phasen	Best## t von K1	Worst## t von K2	LZM‡
Anfahren	358	21.6	88.3	21.6	88.3	284	455	284	1086**	0.14	0.16	0.4
Abfahren	295	28.0	88.3	28.0	88.3	926	1086	926	1086	1.10	1.18	1.30
Regelbetrieb	677	8.1	8.1	32.3	32.3	36	36	121	250#			
AUS	69	0	0	0	0	64	64	64	193			

*Summe von V_{AG} für Kessel 1 und Kessel 2 aus Tabelle 13.

**Selber Wert wie für Abfahren angenommen, da dieser ca. doppelt so gross ist wie der höchste Wert für Anfahren aus den Messungen.

#Für den Worst Case angenommen. Grenzwert für diese Anlage wäre 500 mg/m3 bei 13% O_2.

##Die Mittlere Dauer pro Phase wurde aus der Anzahl Starts (40 für K1 und 73 für K2) und der gesamten Zeit dieser Phasen während der Messperiode (siehe Tabelle 13) berechnet.

‡Mittlere Dauer pro Phase aus den QS-Support LZM von 18 Anlagen < 500 kW für Holz-Hackschnitzel und Pellets [2].

Simulation – wichtigste Schritte

- Berechnen der Gesamt-Zeit pro Phase anhand der mittleren Dauer für An- und Abfahren sowie der Anzahl Starts, des Anteil im Standby/AUS Betrieb und der Betrachtungszeit von 427 h (siehe Tabelle 17).
- Damit mit jeder Simulation die gleiche Energiemenge erzeugt wird wie während der Messung, also die gleich Gesamtmenge V_{AG} in [m³] entsteht muss V_{AG} im Regelbetrieb für die verschiedenen Variationen der Simulation reduziert werden (siehe Tabelle 17)
- Berechnung der mittleren Konzentration über den gesamten Zeitraum von CO und PM_{grav} mit Formel (1) für die verschiedenen Variationen und Vergleich mit den Messresultaten der Zweikessel Pelletanlage.

Tabelle 17 Parameter und wichtige Berechnungsschritte für die Simulationen am Standort A. Die Anzahl Starts (#) bezeichnen die Anzahl Starts pro Tag der Gesamtanlage.

Betriebs-phase	Gesamt-Zeit pro Phase					V_{AG} pro Phase		
	Anzahl (#) Starts = 2.9			# Starts = 1	# Starts = 0	# Starts = 2.9	# Starts = 1	# Starts = 0
	t = Best	t = Worst	t = LZM	t = LZM‡	-			
	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[%] vom Ausgangswert*		
Anfahren	7.3	8.3	20.8	7.2		100%	100%	-
Abfahren	57.2	61.4	67.6	23.4		100%	100%	-
Regelbetrieb	315.6	310.4	291.6	375.1	427	67.1-68.6%	61.1%	57.5%
AUS	47.0	47.0	47.0	21.4		100%	100%	-
total [h]	427							
AUS**	11.0%	11.0%	11.0%	5.0%	0%			

*Der Volumenstrom im Regelbetrieb wurde angepasst, sodass immer der totale Volumenstrom jenem des Messzeitraums entspricht, also dass in der Simulation gleich viel Energie produziert wird, wie während der Messperiode.

**11% AUS für 2.9 Starts pro Tag entspricht jener Zeit der Messperiode, in der keiner der beiden Kessel in Betrieb war.

‡Da die Anzahl Starts geringer ist, wird auch ein geringerer Anteil im Standby angenommen.

5.3.1.2 Resultate mittlere Staubkonzentration

Die Resultate der Simulationen für Staub am Standort A für eine 360 kW industrielle Feuerung, sind in Bild 11 zu sehen und werden dort mit der in Projekt Teil 1 gemessenen Konzentration der Zweikessel Pelletanlage mit Seriengeräten (1x 140 kW und 1x 220 kW) verglichen.

Einfluss der Staub-Emissionen

Die simulierte Staubkonzentration über den gesamten Zeitraum ist unter der Annahme der Staub-Emissionen des «Best-Case» (siehe Tabelle 16) für die verschiedenen Variationen geringer (10.2-11.0 mg/m^3) als der gemessene Wert (20.7 mg/m^3), was einer Reduktion von 47-51% entspricht. Die Annahmen für die Staubemissionen des «Best-Case» sind jedoch sehr tief (z.B. 8.1 mg/m^3 im Regelbetrieb was 5.5 mg/m$_n^3$ bei 13 % Bezugs-O_2 und einem λ von 1.8 entspricht) und werden von einer Hackschnitzelfeuerung im Praxisbetrieb wahrscheinlich nur schwer erreicht.

Unter der Annahme der Staub-Emissionen des «Worst-Case» ist simulierte Staubkonzentration über den gesamten Zeitraum der Einkessel Hackschnitzelanlage für alle Variationen deutlich höher (38-41 mg/m^3) als die in Projekt Teil 1 gemessenen Staubkonzentration der Zweikessel Pelletanlage mit Seriengeräten (20.7 mg/m^3), was einer Zunahme von 85-97 % entspricht. Dies, obwohl die für den «Worst-Case» angenommenen Staub-Emissionen eher moderaten und nicht sehr hohen Staub-Emissionen entsprechen (z.B. 32.3 mg/m^3 im Regelbetrieb was 22.1 mg/m$_n^3$ bei 13 % Bezugs-O_2 und einem λ von 1.8 entspricht und deutlich unter dem LRV-Grenzwert von 50 mg/m$_n^3$ für Feuerungen <500 kW ist, siehe Tabelle 16).

Einfluss der durchschnittlichen Dauer eines An- und Abfahrvorganges

Die Ergebnisse der simulierten Einkesselanlage zeigen, dass längere An- und Abfahrphasen zu höheren mittleren nicht-normierten Staubemissionen führen. Die verschiedenen Variationen zu unterschiedlichen Dauern eines An- und Abfahrvorganges (siehe Tabelle 16) haben jedoch nur geringen Einfluss auf die simulierte mittlere Staubkonzentration. Die Unterschiede zwischen den Simulationen mit 2.9 Starts pro Tag sind für die Staubemissionen des «Best-» und «Worst-Case» maximal 2.7 mg/m^3 bzw. 7 %. Dies ist darauf zurückzuführen, dass vor allem die Anfahrphasen sehr kurz sind und der Anteil der An- und Abfahrphasen an der Gesamt-Zeit nur gering ist (15-21 %).

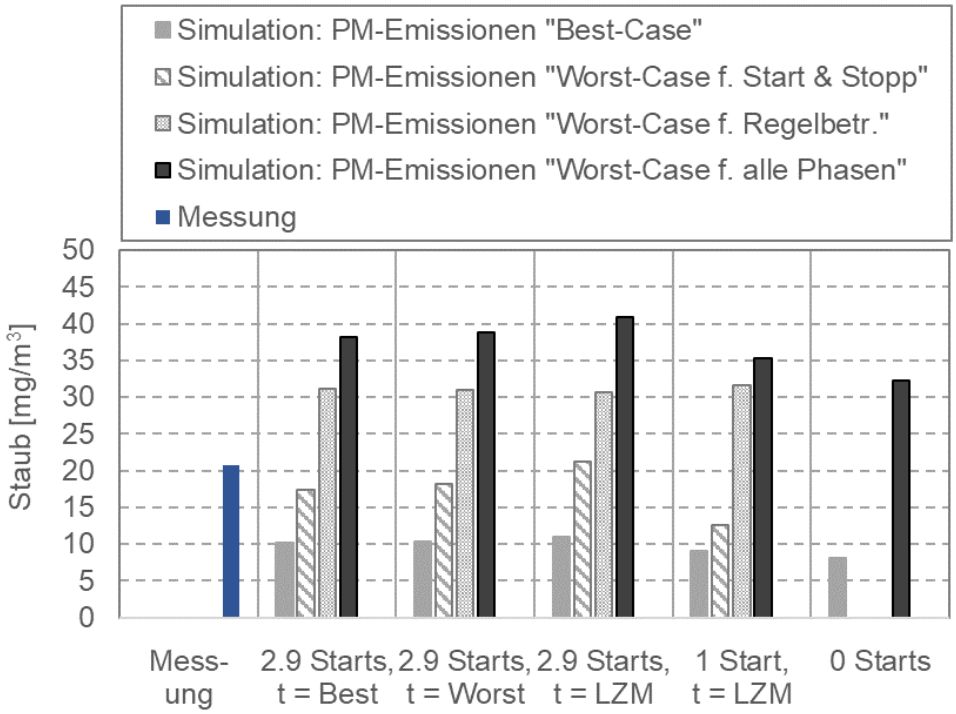


Bild 11 *Mittlere nicht-normierte Staubkonzentration (beinhaltet alle Phasen; Regelbetrieb, Anfahren, Abfahren und Standby), die in Projekt Teil 1 an der Zweikessel Pelletanlage mit Seriengeräten (140 kW und 220 kW) gemessen wurde (blauer Balken), sowie für die simulierten Staubkonzentrationen für eine 360 kW industrielle Feuerung. Die Anzahl Starts bezeichnen die Anzahl Starts pro Tag und «t» die verschiedenen Variationen der zeitlichen Anteile der unterschiedlichen Betriebsphasen (Tabelle 16 und Tabelle 17).*

Einfluss der Anzahl Starts pro Tag der Gesamt-Anlage

Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringere Anzahl Starts der simulierten Einkesselanlage zu einer geringeren mittleren nicht-normierten Staubkonzentration führt. Die Variationen der Simulation, die dem Anlagenbetrieb während der Messung entsprechen (2.9 Starts pro Tag und 11 % Standby-/AUS-Betrieb) und die Simulationen mit einer reduzierten Anzahl (1 Start pro Tag und 0 Starts pro Tag) zeigen jedoch einen deutlich geringeren Einfluss auf die simulierte Staubkonzentration als die Annahme der Staubemissionen. Der Unterschied zwischen dem Dauerbetrieb mit 0 Starts pro Tag und dem Anlagenbetrieb mit 2.9 Starts pro Tag ist unter Annahme der Emissionen des «Best-Case» maximal 2.8 mg/m^3 (11.0 mg/m^3 für 2.9 Starts und 8.1 mg/m^3 für 0 Starts) und unter Annahme der Staubemissionen des «Worst-Case» maximal 8.6 mg/m^3 (40.9 mg/m^3 für 2.9 Starts und 32.3 mg/m^3 für 0 Starts).

Kurz-Zusammenfassung der Resultate und Begründung

Die Ergebnisse der Simulationen für den Standort A zeigen, dass die Anzahl Starts sowie die Dauer eines An- und Abfahrvorgangs geringere Änderungen der simulierten mittleren nicht-normierten Staubkonzentrationen ergeben als die Annahme der Staub-Emissionen im Regelbetrieb und der Anteil im Standby/AUS-Betrieb. Dies lässt sich folgendermassen erklären:

- Die An- und Abfahrphasen sind kurz und weisen zudem eine geringeren Volumenstrom auf (47-56 % geringer im Vergleich zum Regelbetrieb).
- Die Staub-Emissionen während des An- und Abfahrens sind nicht übermässig hoch, und mit einer Ausnahme, kleiner als der LRV-Grenzwert von 50 mg/m$_n^3$, der für den Regelbetrieb gilt.
- Dies bedeutet, dass die Staub-Fracht in [g/h] für An- und Abfahren im «Best Case» nur ~45% höher ist als für den Regelbetrieb, der Anteil des Regelbetriebs an der Gesamt-Zeit jedoch 68-88 % beträgt, während die An- und Abfahrphasen gemeinsam nur 7-21 % an der Gesamt-Zeit ausmachen.
- Die geringen Unterschiede für den «Best-Case» im Vergleich zur gemessenen mittleren Staubkonzentration ist ausserdem auf den hohen Anteil des Standby/AUS-Betriebs der beiden Kessel während der Messung zu erklären (59 % für Kessel 1 und 21 % für Kessel 2) während in den Frachtsimulationen nur ein Standby/AUS-Anteil von 0-11 % möglich ist, damit nicht mehr Energie erzeugt wird als während der Messung mit der Zweikessel Pelletanlage.

5.3.1.3 Resultate mittlere CO-Konzentration

Die Resultate der Simulationen für die mittlere CO-Konzentration für den gesamten Zeitraum (beinhaltet alle Phasen: Regelbetrieb, An- und Abfahren sowie Standby) am Standort A für eine 360 kW industrielle Feuerung, die mit Holzhackschnitzeln betrieben wird, sind in Bild 12 dargestellt.

Einfluss der CO-Emissionen in verschiedenen Betriebsphasen

Die Variationen der Simulation, die dem Anlagenbetrieb während der Messung entsprechen (2.9 Starts pro Tag und 11 % Standby-/AUS-Betrieb), ergeben für die Emissionen des «Best-Case» 131-154 mg/m^3, was einer geringfügigen Reduktion von 8.5-22.5 % gegenüber der Messung von Projekt Teil 1 (169 mg/m^3) entspricht. Für die Emissionen des «Worst-Case» ist die simulierte CO-Konzentration mit 347-387 mg/m^3 um 105-129 % höher als für die Messung. Für den Worst-Case wurden zudem eher moderate CO-Emissionen für den Regelbetrieb von 250 mg/m3 gewählt, was deutlich unterhalb des LRV Grenzwerts von 500 mg/m^3 ist.

Einfluss der durchschnittlichen Dauer eines An- und Abfahrvorganges

Die Ergebnisse der simulierten Einkesselanlage zeigen, dass längere An- und Abfahrphasen zu höheren mittleren nicht-normierten CO-Emissionen führen. Die verschiedenen Variationen zu unterschiedlichen Dauern eines An- und Abfahrvorganges (131-154 mg/m^3 für 2.9 Starts pro Tag) haben für den «Best-Case» einen maximalen Effekt von 24 mg/m^3 und für den «Worst-Case» von 40 mg/m^3 (347-387 mg/m^3 für 2.9 Starts pro Tag). Dies ist deutlich geringer die Änderungen aufgrund der angenommenen CO-Emissionen für die verschiedenen Betriebsphasen oder der Anzahl Starts.

Einfluss der Anzahl Starts pro Tag der Gesamt-Anlage

Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringere Anzahl Starts der simulierten Einkesselanlage zu einer geringeren mittleren nicht-normierten CO-konzentration führt. Wenn ein Anlagenbetrieb mit einer reduzierten Anzahl Starts (0-1) pro Tag simuliert wird kommt es unter der Annahme der Emissionen des «Best-Case» zu einer Reduktion der simulierten mittleren CO-Konzentration im Vergleich zur gemessenen um 54-79 %. Unter der Annahme der Emissionen des «Worst-Case» sind ist die mittlere simulierte CO-Konzentration jedoch sogar mit der reduzierten Anzahl Starts um 35-74% höher als die in Projekt Teil 1 gemessene (Bild 12).

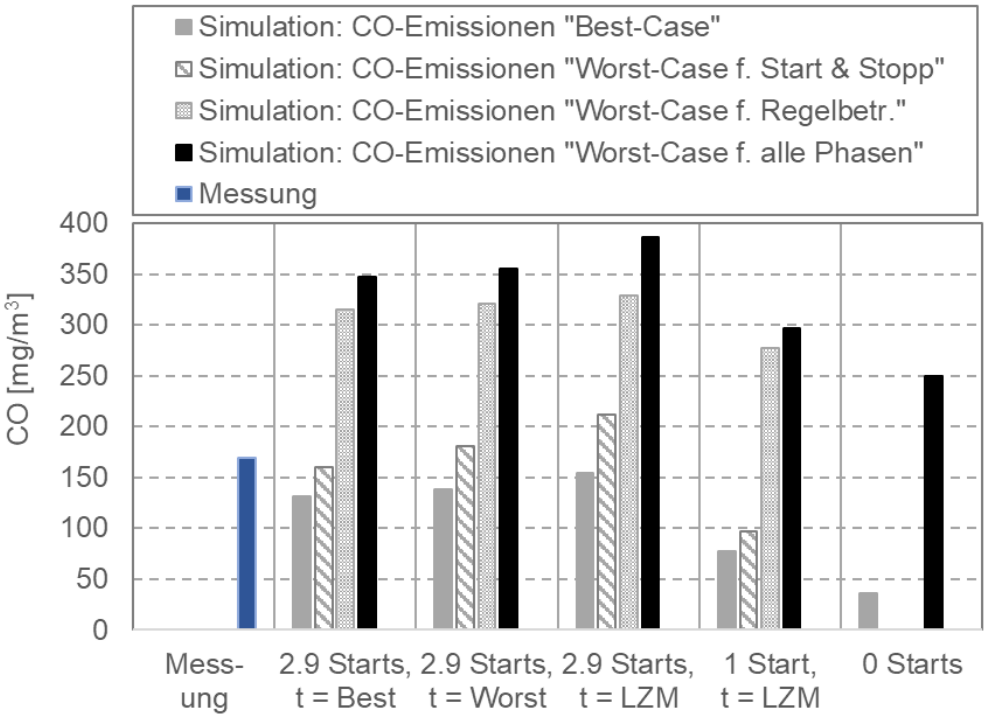


Bild 12 *Mittlere nicht-normierte CO-Konzentration (beinhaltet alle Phasen; Regelbetrieb, Anfahren, Abfahren, Standby), die in Projekt Teil 1 an der Zweikessel Pelletanlage mit Seriengeräten (140 kW und 220 kW) gemessen wurde (blauer Balken), sowie die simulierten CO-Konzentrationen für eine 360 kW industrielle Feuerung. Die Anzahl Starts bezeichnen die Anzahl Starts pro Tag und «t» die verschiedenen Variationen der zeitlichen Anteile der unterschiedlichen Betriebsphasen (Tabelle 16 und Tabelle 17).*

Kurz-Zusammenfassung der Resultate und Begründung

Die Simulationen einer Einkessel Hackschnitzelfeuerung zeigen für die mittlere CO-Konzentration, ähnlich wie die Simulationen für die mittlere Staubkonzentration, dass die Annahme der CO-Emissionen für die verschiedenen Betriebsphasen einen deutlich grösseren Einfluss haben als die Anzahl Starts pro Tag. Die Gründe dafür sind dieselben wie für die simulierten Staubkonzentrationen (siehe Kapitel 5.3.1.2).

5.3.2 Praxisbeispiel 2 (Anlage am Standort B)

5.3.2.1 Vorgehen

Für die Simulation am Standort B wird folgendes angenommen:

- Eine industrielle Zweikesselanlage mit 1'320 kW, die mit Holzhackschnitzel betrieben wird und die gleiche Energiemenge erzeugt, ersetzt die Vierkessel Hackschnitzelanlage mit Seriengeräten.
- Die Kesselleistung der Zweikesselanlage entspricht exakt der Summer der Leistungen der Einzelkessel der Vierkessel Holzhackschnitzelanlage (4x 330 kW).
  - Daher wird angenommen, dass der Betriebsabgasvolumenstrom der Einkesselanlage der Summe der gemessenen Betriebsabgasvolumenströme von Kessel 1 und Kessel 2 entsprechen.
  - Die Leistungsaufteilung wird mit 1/3 (440 kW) und 2/3 (880 kW) angenommen.
- Emissionen für die verschiedenen Betriebsphasen für einen «Best-» und einen «Worst-Case» für PM_{grav}, sowie für eine 3. Variante für CO. Für den «Best-» und den «Worst-Case» werden die jeweils tiefsten und höchsten Messwerte von allen Kesseln verwendet.
- 3 Variationen für die durchschnittliche Dauer eines An- und Abfahrvorganges
  - «Best-» und «Worst-Case» bezeichnen wieder die kürzesten bzw. längsten Werte aus den Messungen.
  - Die durchschnittlichen Zeiten der Variante «LZM» stammt aus der Auswertung der QS-Support Langzeitmessungen (LZM) von 18 Anlagen < 500 kW für Holz-Haschschnitzel und Pellets [1].
- 3 Variationen der täglichen Anzahl Starts
  - Da während der Messung immer mindestens 1 Kessel in Betrieb war, können ausschliesslich Variationen mit Annahmen gerechnet werden. Folgende Variationen wurden simuliert:
    - 2 Starts pro Tag für die Gesamtanlage, was 1 Start pro Tag und Kessel entspricht.

- Eine höhere Anzahl Starts pro Tag wurde nicht simuliert, da es sich hier um eine Anlage >1 MW mit industriellen Kesseln mit in der Regel sehr guter Leistungsmodulation handelt
- Annahme einer reduzierten Anzahl von 1 Start pro Tag für die Gesamtanlage
- 0 Starts pro Tag für die Gesamtanlage unter der Annahme, dass ein Kessel im Dauerbetrieb ist.

○ Es wird keine Unterscheidung für verschiedene Starts (Warm- oder Kaltstart, Start mit oder ohne Zündung bzw. Hochfahren aus dem Glutbettunterhalt) vorgenommen.

Tabelle 18 Parameter für Simulation der Zweikesselanlage (1x 440 kW, 1x 880 kW) am Standort B
Legende: KA…Kessel A, KB…Kessel B, KC…Kessel C, KE…Kessel E; V_{AG}, CO und PM_{grav} sind die nicht-normierten Werte für den Betriebsabgasvolumenstrom, CO und die gravimetrisch bestimmten Gesamt-Staubemissionen. Best und Worst…Die jeweils tiefsten und höchsten Werte aus Tabelle 14.

Betriebs-phase	V_{AG} [m³/h]	PM_{grav} [mg/m³]				CO [mg/m³]				Zeit pro 1 Vorgang [h]		
	KA+KB+ KC+KE* Pellets	Best	Worst Start & Stopp	Worst. Regel-betrieb	Worst alle Phasen	Best	Worst Start & Stopp	Worst Regel-betrieb	Worst alle Phasen	t1 = Best##	t2 = Worst##	t = LZM‡
Anfahren	1'643	51.7	67.5	51.7	67.5	511	1'793	511	1'793	0.19	0.47	0.4
Abfahren	1'527	22.6	65.4	22.6	65.4	1'818	2'652	1'818	2'652	0.40	0.53	1.3
Regelbetrieb	2'476	7.4	7.4	23.8	23.8	121	121	250#	250#			
AUS	410	0	0	0	0	89	89	89	127			

*Summe von V_{AG} von KA, KB, KC und KE aus Tabelle 14.

#Für den Worst Case angenommen. Grenzwert für diese Anlage wäre 250 mg/m3 bei 11% O_2.

##Die Mittlere Dauer pro Phase wurde aus der Anzahl Starts (37 für KA, 32 für KB, 34 für KC und 22 für KE) und der gesamten Zeit dieser Phasen während der Messperiode (siehe Tabelle 14) berechnet.

‡Mittlere Dauer pro Phase aus den QS-Support Langzeitmessungen (LZM) von 18 Anlagen < 500 kW für Holz-Hackschnitzel und Pellets [2].

Tabelle 19 Parameter und wichtige Berechnungsschritte für die Frachtsimulation am Standort B. Die Anzahl Starts (#) bezeichnen die Anzahl Starts pro Tag der Gesamtanlage.

Betriebs-phase	Gesamt-Zeit pro Phase					V_{AG} pro Phase		
	Anzahl (#) Starts = 2			# Starts = 1	# Starts = 0	# Starts = 2	# Starts = 1	# Starts = 0
	t = Best	t = Worst	t = LZM	t = LZM				
	[h]	[h]	[h]	[h]	[h]	[% vom Ausgangswert]		
Anfahren	6.5	16	14	7		100%	67%##	-
Abfahren	13	18	44	23		100%	67%##	-
Regelbetrieb	321	307	283	329	379	62.35-62.46%#	62.1%#	57.9%#
AUS	38	38	38	19		0%	0%	-
total [h]	379							
KA+KB+KC+ KE AUS*	10%		10%	10%	5%**	0%		

*Während der Messperiode war immer mindestens 1 Kessel in Betrieb, daher wird auch für die Frachtsimulation von 0 % Standby/AUS-Betrieb angenommen.

**Da die Anzahl Starts geringer ist, wird auch ein geringerer Anteil im Standby angenommen.

#Damit gleich viel Energie wie während der Messperiode produziert wird, muss die Leistung, also V_{AG} angepasst werden.

##Da nur der 880 kW ausreichend ist, um den Energiebedarf decken, muss auch der Volumenstrom im An- und Abfahren entsprechend reduziert werden.

Simulation – wichtigste Schritte

- Berechnen der Gesamt-Zeit pro Phase anhand der mittleren Dauer für An- und Abfahren sowie der Anzahl Starts und der Betrachtungszeit von 397 h (siehe Tabelle 19).
- Damit mit jeder Simulation die gleiche Energiemenge erzeugt wird wie während der Messung, also die gleich Gesamtmenge V_{AG} in [m³] entsteht muss V_{AG} im Regelbetrieb für die verschiedenen Variationen der Simulation reduziert werden (siehe Tabelle 19).

- Berechnung der mittleren Konzentration über den gesamten Zeitraum (beinhaltet alle Phasen: Regelbetrieb, An- und Abfahren sowie Standby) von CO und PM_{grav} mit Formel (1) für die verschiedenen Varianten und Vergleich mit den Messresultaten der Vierkessel Hackschnitzelanlage mit Seriengeräten.

5.3.2.2 Resultate mittlere Staubkonzentration

Die Resultate der Simulationen für Staub am Standort B für eine 1'340 kW Anlage mit zwei industriellen Feuerungen, die mit Holzhackschnitzeln betrieben wird, sind in Bild 13 zusammen mit der in Projekt Teil 1 gemessenen mittleren Staubkonzentration der Vierkessel Hackschnitzel mit Seriengeräten (4x 330 kW) dargestellt.

Einfluss der Staub-Emissionen

Die simulierte mittlere nicht-normierte Staubkonzentration ist unter der Annahme der Staub-Emissionen des «Best-Case» (siehe Tabelle 18) für die verschiedenen Variationen geringer (8.6-10.9 mg/m^3) als der gemessene Wert (20.2 mg/m^3), was einer Reduktion von 46 % bis 57 % entspricht (siehe Bild 13).

Unter der Annahme der Staub-Emissionen des «Worst-Case» ist die mittlere Staubkonzentration der Zweikessel Hackschnitzelanlage für alle Variationen höher (26-30 mg/m^3) als die in Projekt Teil 1 gemessenen Konzentration der Vierkesselanlage mit Seriengeräten (20.2 mg/m^3), was einer Zunahme von 27 % bis 49 % entspricht. Dies, obwohl die Staub-Emissionen des «Worst-Case» im Regelbetrieb dem LRV-Grenzwert für Feuerungen >1 MW entsprechen (23.8 mg/m^3 entsprechen bei einem λ von 1.8 einem Wert von 20.4 mg/m$_n^3$ bei 11 % Bezugs-O_2).

Einfluss der durchschnittlichen Dauer eines An- und Abfahrvorganges

Die Ergebnisse der simulierten Zweikesselanlage zeigen, dass längere An- und Abfahrphasen zu höheren mittleren nicht-normierten Staubemissionen führen. Der Einfluss der angenommenen durchschnittlichen Dauer der An- und Abfahrvorgänge ist, ähnlich wie in den Simulationen für den Standort A, nur gering. Die maximale Änderung zwischen den verschiedenen Variationen mit 2 Starts pro Tag beträgt 4.5 mg/m^3 (+18 %). Die ist darauf zurückzuführen, dass die An- und Abfahrphasen kurz sind und der Anteil beider Phasen an der Gesamt-Zeit nur gering ist (5-15 %).

Einfluss der Anzahl Starts pro Tag der Gesamt-Anlage

Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringere Anzahl Starts der simulierten Zweikesselanlage zu einer geringeren mittleren nicht-normierten Staubkonzentration führt. Der Einfluss der angenommenen Anzahl Starts pro Tag der Gesamtanlage auf die mittlere Staubkonzentration ist am Standort B jedoch gering. Eine Reduktion von 2 Starts pro Tag auf 0 Starts pro Tag (Dauerbetrieb) führt unter der Annahme der Emissionen des «Best-Case» zu einer Reduktion der mittleren Staubkonzentration des gesamten Betrachtungszeitraums um 1.2 mg/m^3 (-14 %). Für die Staubemissionen des «Worst-Case» ergibt sich eine Reduktion von 6.3 mg/m^3 (-21 %).

Kurz-Zusammenfassung der Resultate und Begründung

Die Ergebnisse der Simulationen für den Standort B zeigen, dass die Anzahl Starts nur geringe Änderungen für die mittleren Staubkonzentration ergeben und dass die Annahme der Staub-Emissionen für die Simulation für die verschiedenen Betriebsphasen, vor allem im Regelbetrieb, einen viel grösseren Einfluss auf die Resultate hat. Dies hat ähnliche Gründe wie für die Simulation für den Standort A und lässt sich folgendermassen erklären:

- Die An- und Abfahrphasen sind kurz und weisen zudem eine geringeren Volumenstrom auf (34-38 % geringer im Vergleich zum Regelbetrieb).
- Die Staub-Emissionen während des An- und Abfahrens sind nicht übermässig hoch (maximal 68 mg/m^3).
- Der Anteil der An- und Abfahrphasen gemeinsam nur 5-15 % an der Gesamt-Zeit ausmachen, während der Anteil des Regelbetriebs 75-87% beträgt.

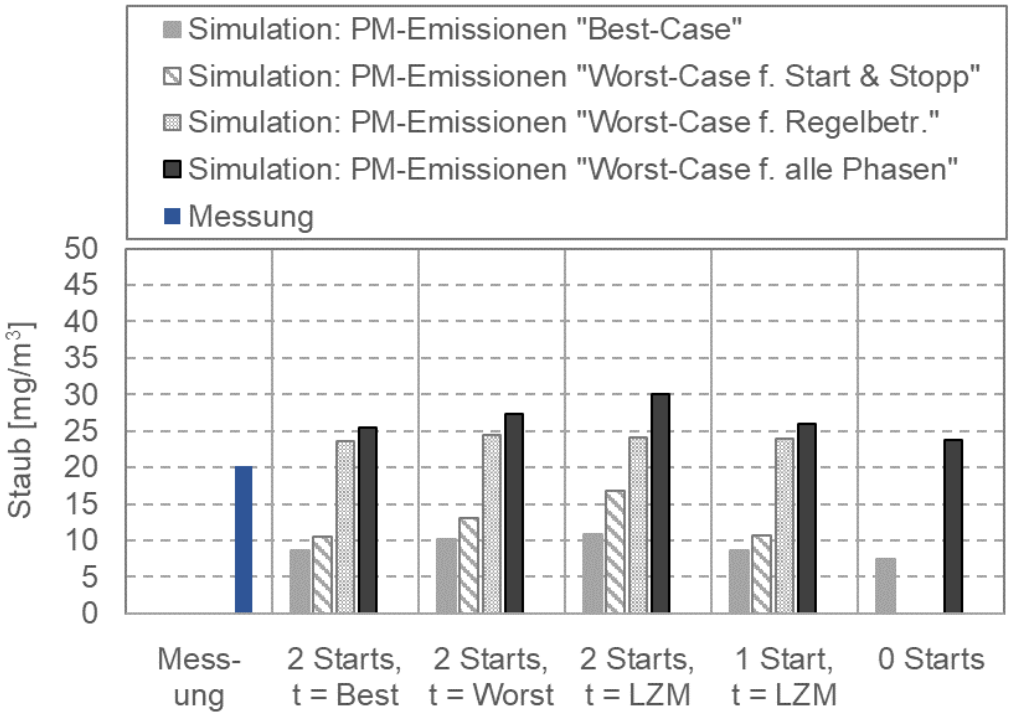


Bild 13 *Ergebnisse für die simulierte mittleren nicht-normierte Staubkonzentration (beinhaltet alle Phasen; Regelbetrieb, Anfahren, Abfahren und Standby) am Standort B für eine 1'320 kW Holzhackschnitzel-Anlage mit zwei industriellen Feuerungen und einer Leistungsaufteilung von 1/3 und 2/3 sowie die mittlere Staubkonzentration der Vierkessel Hackschnitzel Anlage mit Seriengeräte während der Messung (blauer Balken). Die Anzahl Starts bezeichnen die Anzahl Starts pro Tag und Anlage und «t» die verschiedenen Variationen der zeitlichen Anteile der unterschiedlichen Betriebsphasen (Tabelle 18 und Tabelle 19).*

5.3.2.3 Resultate mittlere CO-Konzentration

Die Resultate der Simulationen für die mittlere CO-Konzentration für den gesamten Zeitraum (beinhaltet alle Phasen: Regelbetrieb, An- und Abfahren sowie Standby) für CO am Standort B für eine 1'340 kW Anlage mit zwei industriellen Feuerungen, die mit Holzhackschnitzeln betrieben werden, sind in Bild 14 dargestellt.

Einfluss der CO-Emissionen

Die für die industrielle Zweikesselanlage simulierten mittlere CO-Konzentration ist unter der Annahme der CO-Emissionen des «Best-Case» für die verschiedenen Variationen zwischen 192 mg/m^3 und 347 mg/m^3, was einer Reduktion gegenüber der Messung der Vierkesselanlage mit Seriengeräten von 33 % bis maximal 63 % entspricht.

Unter der Annahme der Staub-Emissionen des «Worst-Case» ist die mittlere CO-Konzentration der Zweikessel Hackschnitzelanlage für alle Variationen zwischen 368 mg/m^3 und 608 mg/m^3, was einer Reduktion von 29 % bis hin zu einer Zunahme von 17 % entspricht. Die für den Regelbetrieb angenommenen CO-Emissionen (250 mg/m^3) entsprechen dem LRV-Grenzwert für Feuerungen > 1MW (250 mg/m$_n^3$ bei 11 % Bezugs-O_2).

Einfluss der durchschnittlichen Dauer eines An- und Abfahrvorganges

Die Ergebnisse der simulierten Zweikesselanlage zeigen, dass längere An- und Abfahrphasen zu höheren mittleren nicht-normierten CO-Emissionen führen. Die verschiedenen Variationen zu unterschiedlichen Dauern eines An- und Abfahrvorganges (192-347 mg/m^3 für 2 Starts pro Tag) haben für den «Best-Case» einen maximalen Effekt von 155 mg/m^3 und für den «Worst-Case» von 240 mg/m^3 (368-608 mg/m^3 für 2 Starts pro Tag). Dies ist jedoch deutlich geringer als die Änderungen aufgrund der für die verschiedenen Betriebsphasen, insbesondere des Regelbetriebs, angenommenen CO-Emissionen (Bandbreite 192 mg/m^3 bis 608 mg/m^3).

Einfluss der Anzahl Starts pro Tag der Gesamt-Anlage

Die Ergebnisse zeigen, dass eine geringere Anzahl Starts der simulierten Zweikesselanlage zu einer geringeren mittleren nicht-normierten CO-konzentration führt. Der Einfluss der angenommenen Anzahl Starts pro Tag der Gesamt-Anlage auf die mittlere CO-Konzentration für den Standort B ist jedoch geringer als die Annahme der Emissionen für die verschiedenen Betriebsphasen. Eine Reduktion von 2 Starts pro Tag auf 0 Starts pro

Tag (Dauerbetrieb) führt unter der Annahme der Emissionen des «Best-Case» zu einer Reduktion der mittleren nicht-normierte CO-Konzentration des gesamten Betrachtungszeitraums um 71 mg/m^3 (-37 %). Für die CO-Emissionen des «Worst-Case» ergibt sich eine Reduktion von um 358 mg/m^3 (-59 %).

Kurz-Zusammenfassung der Resultate und Begründung

Die Simulationen einer Zweikessel Hackschnitzelfeuerung für die mittlere CO-Konzentration zeigen, ähnlich wie für die Simulationen für die mittlere Staubkonzentration, dass die Annahme der CO-Emissionen für die verschiedenen Betriebsphasen einen deutlich grösseren Einfluss haben als die Anzahl Starts pro Tag. Die Gründe dafür sind dieselben wie für die simulierten Staubkonzentrationen (siehe Kapitel 5.3.2.2).

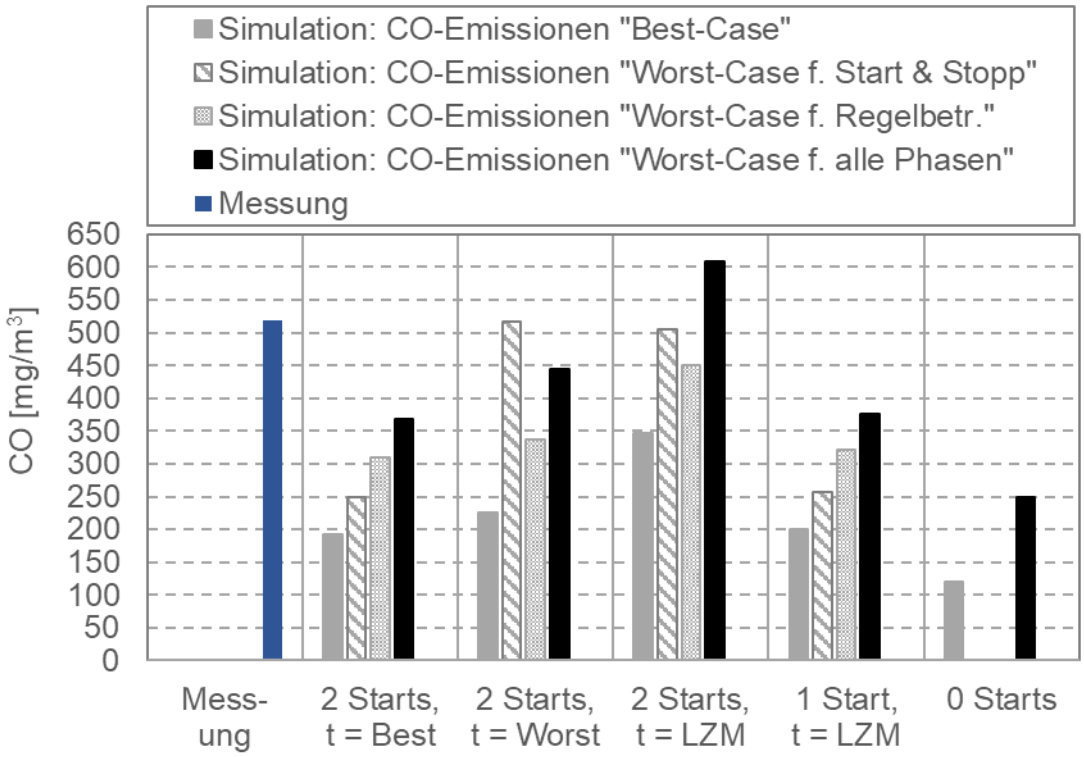


Bild 14 *Ergebnisse für die simulierte mittlere nicht-normierte CO-Konzentration (beinhaltet alle Phasen; Regelbetrieb, Anfahren, Abfahren und Standby) am Standort B für eine 1'320 kW Holzhackschnitzel-Anlage mit zwei industriellen Feuerungen und einer Leistungsaufteilung von 1/3 und 2/3 sowie die mittlere Staubkonzentration der Vierkessel Hackschnitzel Anlage mit Seriengeräte während der Messung (blauer Balken). Die Anzahl Starts bezeichnen die Anzahl Starts pro Tag und Anlage und «t» die verschiedenen Variationen der zeitlichen Anteile der unterschiedlichen Betriebsphasen (Tabelle 18 und Tabelle 19).*

6 Literatur

[1] Nussbaumer , T., F. Schumacher, L. A., and G. J., *Fossilfreie Wärmeversorgung mit Holzkessel-Kaskaden und Speicher (HoKaSpe)*. 2022: verfügbar unter: http://www.holzenergie-symposium.ch.

[2] Zotter, P. and T. Nussbaumer *Aktualisierung Emissionsmodell Holz-feuerungen 2020*. 2023: verfügbar unter: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/luft/externe-studien-berichte/aktualisierung-ef-holz.pdf.download.pdf/aktualisierung-ef-holz.pdf letzter Zugriff: 24.10.2023.

7 Anhang

7.1 Beurteilungsschema – ohne Unterscheidung für verschiedene Startzähler (nicht angewendet)

In diesem Beurteilungsschema (Tabelle 21, als «Vorschlag 1» bezeichnet) gibt es in der Leistungskategorie 70-500 kW keine Unterscheidung zwischen Feuerungen, die alle Starts zählen und Feuerungen, die nur die Anzahl Zündungen zählen. Die Unterscheidung zwischen den verschiedenen Arten, die Starts zu zählen wird dafür im Vorgehen, wenn die max. Anzahl Starts überschritten wird, berücksichtigt (siehe Kapitel 7.1.1). Dieses Beurteilungsschema wurde jedoch **nach der Vernehmlassung durch alle Projektteilnehmenden verworfen**.

Tabelle 20: Beurteilungsschema von Vorschlag 1 ohne Unterscheidung für verschiedene Startzähler.

			Anzahl Starts pro Jahr und Anlage				
Leistung Einzelkessel[#]	**Brennstoff**	**Wassergehalt**	**1-Kessel**		**2-Kessel**	**3-Kessel**	**4-Kessel**
			HZ	GJB	GJB	GJB	GJB
70 kW–500 kW	Pellets & HS	< 35 %	500+20% **600**	1000+20% **1200**	+500* pro Kessel **1700**	+350** pro Kessel **2050**	+350** pro Kessel **2400**
	HS	> 35 %	**500**	**1000**	+500* pro Kessel **1500**	+350** pro Kessel **1850**	+350** pro Kessel **2200**
>500 kW	Pellets & HS	beliebig	**400**	**600**	+400* pro Kessel **1000**	+250** pro Kessel **1250**	+250** pro Kessel **1500**

[#] Wenn bei Mehrkesselanlagen (≥ 2 Kessel) ein Kessel einer höheren Leistungsklassen eingebaut wird, gilt für alle Feuerungen die Anzahl Starts der kleineren Leistungsklasse.

*Die zusätzliche Anzahl Starts für den 2. Kessel einer Zweikesselanlage entspricht der Anzahl Starts für den 1. Kessel derselben Leistungsklasse für die Heizperiode

**Die zusätzliche Anzahl Starts pro weiteren Kessel entspricht 2/3 der Anzahl Starts für einen Kessel derselben Leistungsklasse für die Heizperiode. 350 in der Kategorie 70-500 kW entspricht 500x2/3=333 aufgerundet auf den nächsten 50iger Schritt, 250 in der Kategorie >500 kW entspricht 400 x 2/3 = 267 abgerundet auf den nächsten 50iger Schritt.

<u>Beschreibung zum Vorschlag 1 und Einkessel-Anlagen 70-500 kW sowie >500 kW</u>

- Leistung 70-500 kW
  - Keine Unterscheidung zwischen industriellen Geräten und Seriengeräten aus folgenden Gründen:
    - Einfacher für den Vollzug
    - Wenn industrielle Anlagen eine so hohe Anzahl Starts aufweisen würden wie Seriengeräte, gäbe es mit grosser Wahrscheinlichkeit erhebliche Probleme im Betrieb (Störungen, Verschleiss, etc.) oder Nachbarschaftsklagen, was höchst wahrscheinlich zu Betriebsoptimierungen führen würde.
  - Keine Unterscheidung zw. Pellets und Hackschnitzel mit einem Wassergehalt <35 %
  - Heizbetrieb
    - Pellets und Hackschnitzel mit einem Wassergehalt < 35 %
      - Keine Unterscheidung zw. Pellets und Hackschnitzel, da die statistische Auswertung keine signifikanten Unterschiede gezeigt hat.
      - 600 = 500 plus einer Toleranz von 20%
      - 600 entspricht dem Median von Seriengeräten, die alle Starts zählen (Tabelle 5)
    - Hackschnitzel mit einem Wassergehalt > 35 %
      - 500, ohne eine Toleranz von 20 %
      - Diese Zahl ist kleiner als der Median für alle Seriengeräte (siehe Tabelle 5)
  - Ganzjahresbetrieb
    - Ausgehend von der Anzahl des Heizbetriebs +500 für den Ganzjahresbetrieb
      - Die + 500 entsprechen der Differenz aus HZ und GJB aus Tabelle 5 (Differenz des Medians zw. 575 – 765)
- Leistung >500 kW
  - Einzel-Kessel mit dieser Leistung sind ausschliesslich industrielle Feuerungen, in denen auch problemlos Brennstoffe mit höheren Wassergehalten eingesetzt werden können. Daher wird keine Unterscheidung für die Anzahl Starts pro Jahr zwischen verschiedenen Brennstoffen vorgenommen.

- Aufgrund der grösseren Leistungsklasse wird vermehrt der Einsatz von Hackschnitzeln erwartet und dadurch wird keine Toleranz von 20% dazugezählt.
- Da die Unterschiede zw. Anlagen mit 500-1000 kW und >1 MW Gesamtleistung gering sind, wird zur Vereinfachung auf die Unterscheidung der Anzahl Starts für diese beiden Leistungsklassen verzichtet und nur eine Leistungsklasse >500 kW definiert. Für diese Leistungsklasse soll die Anzahl Starts der statistischen Auswertung für Anlagen 500-1000 kW gelten.
    - Leistung 500-1000 kW
        - Heizbetrieb
            - 400 ist grösser als der Median und kleiner als das Q75
        - Ganzjahresbetrieb
            - 600 entspricht dem gerundeten Q75
    - Leistung > 1 MW
        - Heizbetrieb
            - 300 ist grösser als der Median und kleiner als das Q75
        - Ganzjahresbetrieb
            - Keine Daten aus statistischer Auswertung
            - 500 festgelegt, entspricht Anzahl HZ plus 200 Starts für den GJB

Beschreibung zum Vorschlag 1 und Zweikesselanlagen generell (Leistung 70-500 kW und >500 kW im Ganzjahresbetrieb)

- +Anzahl Starts vom HZ von Kessel 1 der gleichen Leistungskategorie ohne weitere Toleranz von 20 %

Beschreibung zum Vorschlag 1 und Mehrkesselanlagen generell (≥ 3 Kessel, Leistung 70-500 kW und >500 kW im Ganzjahresbetrieb)

- Zusätzliche Anzahl Starts pro weiteren Kessel entspricht 2/3 der Anzahl Starts für einen Kessel derselben Leistungsklasse der Heizperiode.
    - 70-500 kW
        - 350 ist aufgerundet von 500x2/3=333
    - >500 kW
        - 250 ist abgerundet von 400x2/3=266.7

7.1.1 Vorgehen zu Vorschlag 1, wenn die max. Anzahl Starts nicht eingehalten werden kann

- Wenn die maximale Anzahl Starts pro Jahr und Anlage nicht eingehalten werden kann
    - soll der Anlagenbetreiber der Behörde möglich Gründe für das Überschreiten mitteilen.
    - Keine weiteren Auflagen seitens der Behörde gibt es, wenn
        1. es nachvollziehbare Gründe für das Überschreiten gibt (z.B. 1. Betriebsjahr mit Einregulierungsphase; Defekt an wichtiger Anlagenkomponente, der nicht sofort erkannt wurde, etc.) gibt und,
        2. davon ausgegangen werden kann, dass im darauffolgenden Jahr die Vorgabe wieder eingehalten werden kann.
        3. Nach Abschluss des darauffolgenden Jahres, muss die Anzahl Anfahrvorgängen pro Jahr den Behörden zur Kontrolle übermittelt werden.

    - Wenn es keine nachvollziehbaren Gründe gibt, soll der Anlagenbetreiber
        1. der Behörde melden, ob der eingesetzte Feuerungstyp nur die Anzahl Zündungen oder alle Starts (also auch Warm-Starts ohne Zündung) zählt.
        2. die Brennstoffqualität (Wassergehalt und Stückigkeit) von einer repräsentativen Anzahl Proben überprüfen lassen.
        3. Keine weiteren Auflagen bis zur nächsten regulären LRV-Messung gibt es wenn,
            a. es sich um einen Feuerungstyp handelt, der alle Starts zählt und die Brennstoffqualität den Vorgaben/Empfehlungen entspricht (bei Seriengeräten Wassergehalt < 35 % und Feingutanteil <10 %).
                i. Wenn die Anzahl Starts nach Abschluss des darauffolgenden Jahres wieder überschritten wird, wird der Anlagenbetreiber dann von der Behörde hingewiesen, dass eine Betriebsoptimierung durchzuführen ist.

4. Der Anlagenbetreiber wird von der Behörde hingewiesen, dass eine Betriebsoptimierung ohne weiters Zuwarten durchzuführen ist, wenn
    a. es sich um einen Feuerungstyp handelt, der nur die Anzahl Zündungen zählt oder
    b. die Brennstoffqualität nicht den Vorgaben/Empfehlungen entspricht (bei Seriengeräten Wassergehalt < 35 % und Feingutanteil <10 %).

- Die Betriebsoptimierung
    - sieht vor, dass in einem ersten Schritt der Anlagenbetreiber die nötigen Schritte zur Reduktion der Anzahl Starts einleitet (Kontrolle von Kesselanlage und Abgasreinigung, Prüfen der Brennstoffqualität, Optimierung des Speicher-Lademanagements Optimierungen der Wärmebezüger, usw.).
    - Sollte sich nach der Betriebsoptimierung, die in angemessener Zeit jedoch spätestens bis nach der nächsten Heizperiode abgeschlossen sein sollte, nach einem weiteren Betriebsjahr keine Verbesserung zeigen, ist QM-Holzheizwerke oder QS-Support einzuschalten.
- In Klagefällen wird von der Behörde angeordnet, dass die Brennstoffqualität beurteilt werden muss und eine Betriebsoptimierung durchzuführen ist.

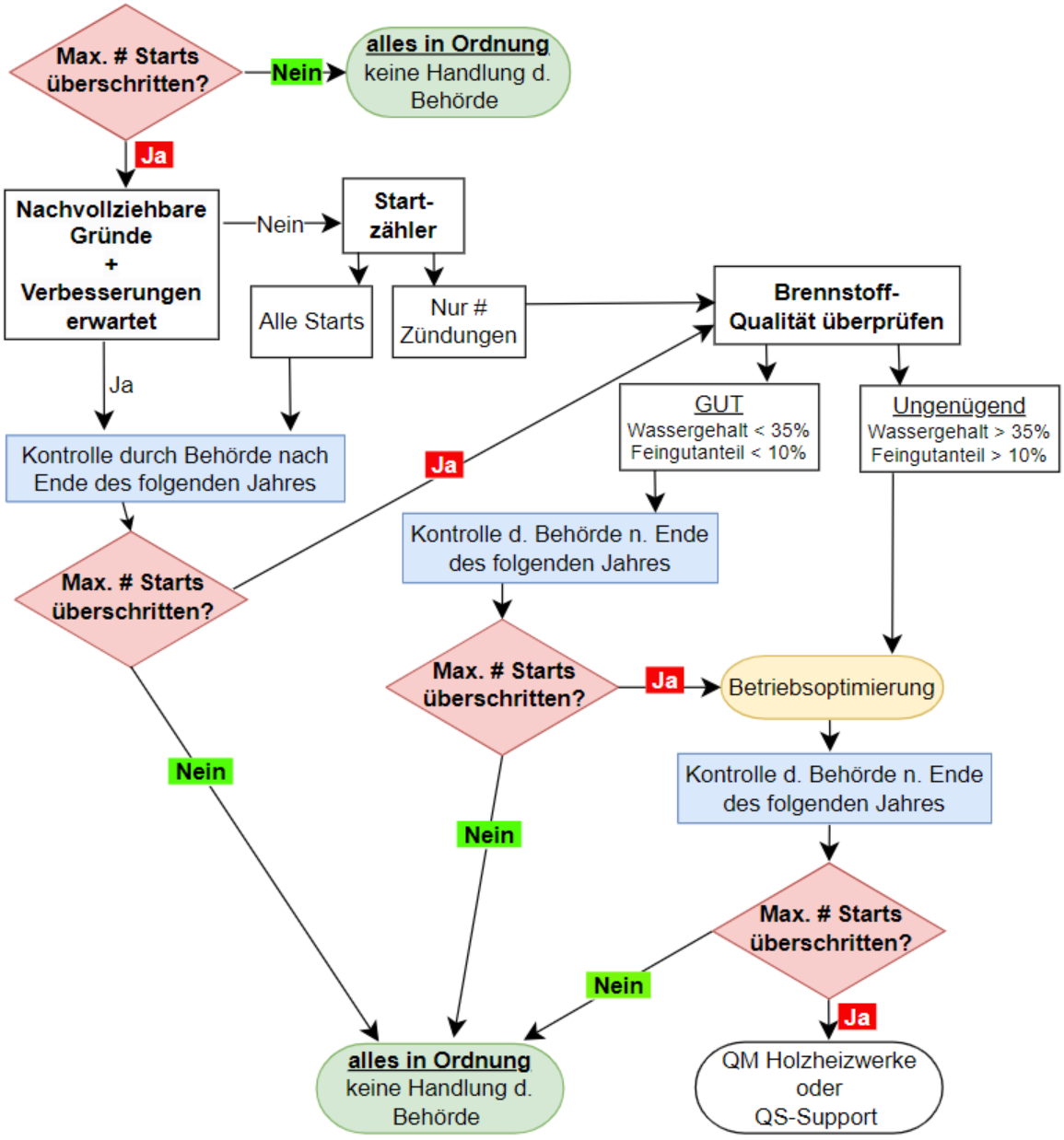


Bild 15 Flussdiagramm zum Vorgehen von Vorschlag 1, wenn die maximal zulässige Anzahl Starts überschritten wird.

7.2 Beurteilungskriterium aus Projekt Teil 1

7.2.1 Übersicht und Bewertung der verschiedenen Beurteilungskriterien

In diesem Kapitel werden die Beurteilungskriterien aus Sicht von Verenum AG bezüglich der Umsetzbarkeit und der Auswirkung der Emissionen bewertet. Um die Diskussion über die Beurteilungskriterien und die Einschätzungen bzw. Bewertungen aller Beteiligten transparent zu ermöglichen, können in den nachfolgenden Kapiteln Stellungnahmen zu den Beurteilungskriterien abgegeben werden.

Tabelle 21 Beurteilungskriterien und Bewertung. Legende: ++ sehr einfach umsetzbar / starke Reduktion der Emissionen, + einfach umsetzbar / Reduktion der Emissionen

Kriterium	Bewertung der Umsetzbarkeit	Auswirkung auf Emissionen	Vorteile/Begründung	Nachteile/Einschränkungen
Festlegung Anzahl Starts pro Kessel	++	+	• Durch eine Vorschrift zur maximal erlaubten Anzahl Starts pro Kessel kann sichergestellt werden, dass im Bedarfsfall eine Betriebsoptimierung umgesetzt wird. • Einfach umsetz- und kontrollierbar.	• Genaue Anzahl Starts muss festgelegt & kontrolliert werden • Zählung aller Einschaltungen, auch jene wegen einer periodischen Entaschung, muss gewährleistet sein. • Datengrundlage zur Festlegung der Anzahl Starts ist noch zu gering
Vorschriften zur Brennstoffqualität	+	++	• Eine hohe Brennstoffqualität wirkt sich positiv auf den Anlagenbetrieb aus und reduziert die Emissionen während aller Betriebsphasen. • Könnten vom Vollzug und den Kesselherstellern relativ einfach festgeschrieben werden. o Aus diesem Grund wird die Umsetzbarkeit mit «+ (einfach)» bewertet	• Preis und Verfügbarkeit von «Qualitätshackschnitzel» o Im Moment ist die Verfügbarkeit von grossen Mengen «Qualitätshackschnitzel» nicht gegeben. • Strenge Vorgaben können Seriengeräte, die mit Holzhackschnitzel betrieben werden, aus ökonomischen Gründen verhindern. • Ist Garantie vom Betreiber, dass nur Brennstoff mit guter Qualität eingesetzt wird, ausreichend? • Wie sollen Vorgaben kontrolliert werden? o Wie, wer und wann (Zeitintervall) wird kontrolliert • Braucht es Rückstellproben? Wie viele? Wer nimmt diese und wo müssen sie genommen und gelagert werden?
Betriebsoptimierung	+	+	• Kann die Anzahl Starts reduzieren und den Anlagenbetrieb generell verbessern. • Anlagenbetrieb/Einstellungen können auf den jeweiligen Brennstoff optimiert werden • Know-How ist vorhanden o Hersteller, QM Holzheizwerke, QSH • Müsste automatisch durch Betreiber ausgelöst werden, wenn erlaubte Anzahl Starts überschritten wird. ➔ Geringere Emissionen ➔ Geringere Wartungs-, Betriebs- & Brennstoffkosten	• Ist mit personellem Aufwand und Mehrkosten verbunden • Teilweise sind nicht alle notwendigen Parameter verfügbar oder die Datenaufzeichnung nicht vorhanden. • Effekt ist erst nach längerer Zeit sichtbar (in der Regel frühestens nach 1 Jahr) • Wie soll der Nachweis für die Durchführung erbracht werden? Ist QMmini Phase 2 oder QMstandard Meilenstein 5 ausreichend?

Tabelle 22 Fortsetzung: Legende: + einfach umsetzbar / Reduktion der Emissionen, - schwierig umsetzbar, (+) Reduktion möglich aber nicht gesichert, (-) Erhöhung der Emissionen zu erwarten, Emissionen bleiben aber < EGW

Kriterium	Bewertung der Umsetzbarkeit	Auswirkung auf Emissionen	Vorteile/Begründung	Nachteile/Einschränkungen
Festlegung Anzahl Starts pro Anlage	+	+	Es sind keine zusätzlichen Vorteile zum Kriterium «Anzahl Starts pro Kessel» vorhanden.	• Es gelten dieselben Einschränkungen, wie für das Kriterium «Anzahl Starts pro Kessel». Soll die Anzahl Starts pro Anlage auch abhängig von Anzahl Kesseln einer Kaskade sein?
Aufhebung Kriterium Anzahl Starts	+	(-)	• Messungen zeigen, dass die QSH Vorgaben (80% der Zeit < EGW) erfüllt werden für die o Emissionen der Gesamtanlage mit einer hohen Anzahl Starts (6 & 7 Starts pro Tag und Anlage). o Beurteilung der Einzelkessel, auch mit fiktiven Erhöhung Anzahl Starts auf 4-6 pro Tag und Kessel. • Gesamt-Emissionsfracht wird grösser, die über die gesamte Periode gemittelten Konzentrationen der einzelnen Kessel bleiben jedoch < EGW. o Weniger Aufwand für den Vollzug/Kontrolle	• Motivation/Notwendigkeit von Betreibern eine Betriebsoptimierung durchzuführen fällt weg. • Anzahl Starts werden nicht auf ein mögliches Minimum reduziert. • Gesamt-Emissionsfracht eines Kessels wird grösser o Bei einer Erhöhung der Anzahl Starts von 2-4 auf 4-6 um bis zu einem Faktor 2.
Beurteilung Emissionen der einzelnen Kessel	-	+	• Beurteilung der An- und Abfahrphasen ist mit LZM möglich. Damit kann abgeschätzt werden, ob es potenziell zu Geruchsbeeinträchtigungen der Nachbarschaft kommt. • Durch LZM werden oftmals auch mögliche Massnahmen zur Betriebsoptimierung erkannt.	• LRV Messungen nicht ausreichend • LZM sind aufwändig und es gibt im Moment nur wenige Institutionen, die sie durchführen können • Effekt auf Emissionen abhängig, ob nachfolgend Verbesserungen vorgenommen werden. • Schwierig umsetzbar für eine grosse Anzahl Anlagen
Beurteilung Emissionen der Gesamtanlage	-	(+)	• Es sind keine Vorteile vorhanden.	• Es gelten dieselben Einschränkungen, wie für das Kriterium «Beurteilung Emissionen der einzelnen Kessel». • Die Beurteilungsmethode von QSH zur Abschätzung von potenziellen Geruchs- und Russemissionen ist nicht anwendbar.

7.2.2 Zusammenfassung der Stellungnahmen zu Beurteilungskriterien aus Teil 1

- Hier wird eine Zusammenfassung der Stellungnahmen aller Projektteilnehmer zu den möglichen Beurteilungskriterien aufgelistet, die von Verenum im Zwischenbericht zum Teil 1 des Projekt vorgeschlagen wurden.Alle Projektbeteiligten sind der Meinung, dass das Beurteilungskriterium einer maximalen Anzahl an Anfahrvorgängen pro Jahr weiterhin bestehen bleiben soll, da diese Zahl ein geeignetes Instrument ist für das Durchführen von Betriebsoptimierungen.
- Alle Projektbeteiligten sind sich einig, dass die bisherige Anzahl von 500 Starts pro Jahr und Anlage von Mehrkesselanlagen nicht eingehalten werden kann und angepasst werden soll.
- Bei möglichen Unterscheidungen zwischen verschiedenen Kesseltypen, Leistungsklassen und Brennstoffen waren die Rückmeldungen divergent. Manche wünschen sich mehrere Abstufungen, andere möchten das Beurteilungsschema so einfach wie möglich halten für einen einfachen Vollzug (siehe Tabelle 23).

Tabelle 22: Auswertung der Stellungnahmen gruppiert nach den für die Anzahl Anfahrphasen pro Jahr wichtigsten Themen.

Frage/Punkt	Antwort		
	JA	NEIN	K.A.*
Kriterium Anzahl Anfahrvorgänge beibehalten	BE, GR, LU, ZH, HF-CH[#]	-	AG
Erhöhung bisheriger Anzahl Anfahrvorgänge für Mehrkesselanlagen (500 pro Jahr)	BE, GR, LU, ZH, HF-CH		AG
Festlegen der Anzahl Anfahrvorgänge auf Anzahl pro Jahr und Kessel	HF-CH		AG, BE
Festlegen der Anzahl Anfahrvorgänge auf Anzahl pro Jahr und Anlage	GR, LU, ZH		AG, BE
Abstufung/Unterscheidung Anzahl Starts nach Brennstoff (Pellets/Hackschnitzel)	GR, LU	BE, ZH, HF-CH	AG
Abstufung/Unterscheidung Anzahl Starts nach Brennstofffeuchte	BE, GR, LU, ZH, HF-CH		AG
Abstufung/Unterscheidung Anzahl Starts nach Leistung	GR, LU	BE, ZH, HF-CH	AG
Abstufung/Unterscheidung Anzahl Starts nach Bauart Kessel (Vorschubrost vs. Seriengeräte)	GR, LU	ZH, HF-CH	AG, BE
Abstufung/Unterscheidung Anzahl Starts nach Betriebsweise (Winter- vs. Ganzjahresbetrieb)	GR, LU, ZH, HF-CH		AG, BE
Genaue und Einheitliche Definition "Was ein Start ist"	BE, GR, ZH		AG, LU, HF-CH
Korrektes Zählen (alle Starts inkl. Entaschung) und Ausweisen der Anfahrvorgänge	BE, ZH		AG, GR, LU, HF-CH
Differenzierung verschiedener Starts für die Festlegung des Kriteriums "Anzahl Starts"	BE		AG, GR, LU, ZH, HF-CH

[#]HF-CH…Verband Holzfeuerungen Schweiz *K.A. … Keine Angabe

Drei Rückmeldungen enthielten zudem eine Tabelle mit konkreten Zahlen für eine max. Anzahl Anfahrvorgänge pro Jahr. Diese sind als Diskussionsgrundlagen nachfolgend in Kapitel 4.5 aufgelistet.

7.2.2.1 Weitere Themen in den Stellungnahmen

Zusätzlich zu den Rückmeldungen zu den im Zwischenbericht aufgelisteten Beurteilungskriterien, gab es auch Rückmeldungen zu weiteren Themen, die hier nachfolgend aufgelistet sind.

- GR: Bei Kaskadenanlagen sollte, wenn möglich, jeder Kessel in einem eigenen Kamin geführt werden
- BE, GR: Das Intervall zum Ausgleich der Jahres-Betriebsstunden der verschiedenen Kessel sollte auf mind. 7 Tage ausgedehnt werden
- Holzfeuerungen Schweiz
    - Es ist zu prüfen, ob die Anzahl Start/Stopps im Widerspruch mit der QM-Auslegung stehen. Grade auch in Bezug auf eine reduzierte Speichergrösse.
    - Die Branche schlägt vor, dass die vereinfachte Emissionsmessung (CO und Staub) bis 500 kW_{FWL} ausgeweitet wird.
- Welche Kesselleistung soll massgebend sein für das Festlegen der Grenzwerte?
    - BE und LU: Bei Anlagen ≤ 3, soll die Leistung der Einzelkessel und bei Anlagen mit >3 Kesseln die Gesamtleistung massgebend sein.
    - Holzfeuerungen Schweiz:
        - Emissionsbegrenzungen sollten auf die Einzelanlage bezogen werden.
        - Wenn die Summe der Leistungen der Einzelkessel jedoch nicht nur 1 Emissionsklasse, sondern 2 Emissionsklassen höher wäre (Überspringen 1 Emissionsklasse), dann gilt nicht der Grenzwert der Emissionsklasse, welche sich aus der Summer der Leistung der Einzelkessel ergibt, sondern der Emissionsgrenzwert der nächst höheren Emissionsklasse.