



#### **B. Eng. Florian Herrmann**

absolvierte nach dem Abitur eine kaufmännische Ausbildung und begann im Jahr 2016 ein Studium in der Fachrichtung Energietechnik an der Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Riesa. Für seine Bachelorarbeit zur Feinstaubemissionsanalyse bei Scheitholz- und Pelletfeuerung in Abhängigkeit der Brennstofffeuchtigkeit wurde Herr Herrmann vom Verein zur Förderung der Ingenieurausbildung der Gebäude- und Energietechnik Dresden e.V. im Januar 2020 mit dem 1. Preis ausgezeichnet. Aktuell absolviert er das Masterstudium Energie-, Gebäude- und Umwelttechnik an der HTWK in Leipzig.

**KONTAKT:** [florian.herrmann@stud.htwk-leipzig.de](mailto:florian.herrmann@stud.htwk-leipzig.de) | [florian.herrmann1811@web.de](mailto:florian.herrmann1811@web.de)



#### **Dipl.-Ing. (FH) Matthias Kirsten**

studierte nach seiner Berufsausbildung als Schornsteinfeger und abgeschlossener Meisterprüfung an der Fachhochschule für Bauwesen in Erfurt in der Fachrichtung Heizungs-, Lüftungs- und Sanitärtechnik. Im Institut für postgraduale Bildung GmbH (EIPOS) schloss er seine Ausbildung als Brandschutzplaner und Brandschutzsachverständiger ab. Von der Handwerkskammer Dresden ist er öffentlich bestellter und vereidigter Gutachter für das Schornsteinfegerhandwerk und Schwerpunkt Brandschutz. Als Dozent unterrichtet er seit 25 Jahren an der Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Riesa in den Fachrichtungen Feuerungsanlagen, Umweltschutz, Gastechnik und Brandschutz.

**KONTAKT:** [m.kirsten@red-energiesdienst.de](mailto:m.kirsten@red-energiesdienst.de)



#### **Prof. Dr.-Ing. Marko Stephan**

studierte Energieanlagentechnik an der Technischen Universität Dresden, wo er auf dem Fachgebiet der Sicherheitstechnik von Energieanlagen 1988 zum Dr.-Ing. promoviert wurde. Nach Tätigkeiten im Anlagenbau und in Planungsbüros ist er seit 2007 als Dozent für Versorgungs- und Energietechnik an der Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Riesa beschäftigt und leitet seit 2014 den Studiengang Energie- und Umwelttechnik. Seine Arbeits- und Forschungsschwerpunkte sind Zukunftstechnologien für Energie und Umwelt.

**KONTAKT:** [marko.stephan@ba-sachsen.de](mailto:marko.stephan@ba-sachsen.de)



#### **Dipl.-Ing. (BA) Nico Seiler**

absolvierte nach dem Abitur eine Ausbildung zum Zentralheizungs- und Lüftungsbauer. Anschließend folgte ein erfolgreich abgeschlossenes Studium an der Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Riesa zum Dipl.-Ing. (BA) für Versorgungs- und Gebäudetechnik. Nach einer Tätigkeit als Projektingenieur ist er seit 2006 als Laboringenieur an der Berufsakademie Sachsen, Staatliche Studienakademie Riesa im Studiengang Energie- und Umwelttechnik tätig.

**KONTAKT:** [nico.seiler@ba-sachsen.de](mailto:nico.seiler@ba-sachsen.de)

# Messtechnische Untersuchungen zur Emission von Feinstaub und Kohlenmonoxid aus einer Biomassefeuerungsanlage

Florian Herrmann, Matthias Kirsten, Marko Stephan, Nico Seiler

An einer Biomassefeuerungsanlage zur Verbrennung von Stückholz und Pellets wurden Feinstaub- und CO-Emissionen bei unterschiedlichen Holzfeuchten sowohl in der Aufheizphase als auch bei optimalen Betriebsbedingungen im stabilen Dauerbetrieb gemessen und analysiert. Vor allem bei der Verbrennung von Scheitholz stiegen die Feinstaub- und CO-Emissionen mit zunehmendem Feuchtegehalt des Brennstoffes an. Die höchsten Werte traten dabei in der Aufheizphase des Kessels auf. Bei Pelletfeuerung ist der Anstieg der Emissionswerte mit steigendem Feuchtegehalt des Brennstoffs weniger stark ausgeprägt. Die Untersuchungen zeigen, dass bei Biomassefeuerungsanlagen eine optimale Brennstofflagerung, ausreichende Trocknung des Holzes und die Einhaltung der zulässigen Brennstofffeuchten essentiell sind für eine schadstoffarme Verbrennung mit geringen Feinstaub- und CO-Emissionen.

## Keywords

Feinstaubemissionen, Scheitholzkessel, Pelletkessel, Biomassefeuerungsanlage

## Motivation

Zur Deckung des weltweiten Primärenergiebedarfs stellt die Biomasse die wichtigste regenerative Energiequelle dar. Dabei ist Holz die in Deutschland am häufigsten genutzte Form der Biomasse. Holz als Brennstoff weist zahlreiche Vorteile auf. Dementsprechend ist Holz sowohl ein CO<sub>2</sub>-neutraler als auch ein kostengünstiger Rohstoff [1]. Außerdem ist Holz eine einheimische Energiequelle. Die damit verbundenen kurzen Transportwege wirken sich positiv auf die Klimabilanz aus.

Die Energiewende in Deutschland einerseits und große Einsparpotentiale im Bereich der Gebäudetechnik andererseits sind Ursache dafür, dass seit einigen Jahren vermehrt Festbrennstofffeuerungsanlagen zum Einsatz kommen. Durch die steigenden Zulassungszahlen und die technische Weiterentwicklung rückt die emissionstechnische Relevanz von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe zunehmend in den Fokus.

*Particulate matter and CO emissions were measured and analyzed at a biomass combustion plant for the combustion of logs and pellets. The measurements were carried out at different wood moisture levels during both the heat-up phase and under optimal operating conditions in stable continuous operation. Particularly during the combustion of logs, particulate matter and CO emissions rose with increasing moisture content of the fuel. The highest values were recorded during the heating phase of the boiler. During the combustion of pellets, the increase in emission values is less pronounced with increasing moisture content of the fuel. The analyses show that in biomass combustion plants, optimum fuel storage, sufficient drying of the wood and compliance with the permissible fuel moisture content are essential for low-pollution combustion with reduced particulate matter and CO emissions*

Das Umweltbundesamt erhebt jährlich eine Auswertung über die Luftqualität in Deutschland, in der neben den Stickstoffdioxid- und Ozonemissionen, auch die Feinstaubbelastungen analysiert werden. Abbildung 1 [2] zeigt beispielhaft die Entwicklung der Feinstaub-Jahresmittelwerte seit dem Jahr 2000. Die Werte beziehen sich auf PM10 (Particulate Matter), also Staubteilchen, deren aerodynamischer Durchmesser kleiner ist als 10 Mikrometer. Anhand der Abbildung ist zu sehen, dass die Feinstaubbelastung im Vergleich zum Jahr 2000 zwar gesunken ist, in den letzten Jahren aber praktisch stagniert. Als Hauptverursacher für Luftschadstoffe benennt das Umweltbundesamt vor allem den Bereich des Straßenverkehrs sowie sämtliche Verbrennungsprozesse in der Industrie, der Energiewirtschaft und den privaten Haushalten. Zusätzlich trägt zur Feinstaubbelastung noch die Landwirtschaft durch Bildung von sekundären Feinstaubpartikeln bei [2].

Unter Laborbedingungen und mit optimalen Brennstoffen erreichen moderne Festbrennstoffkessel und Einzelfeuerstätten minimale Schadstoffemissionen und erfüllen bzw. unterbieten die normativen Grenzwerte aus der Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-

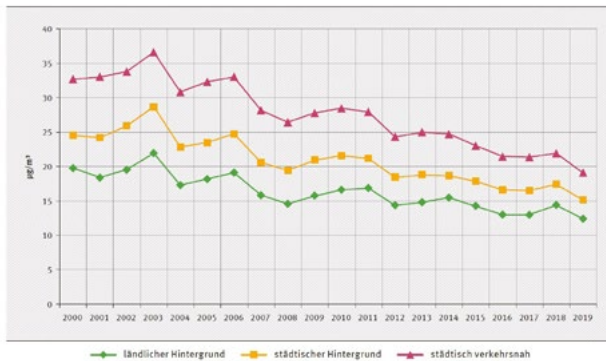


Abb. 1: Entwicklung der PM10-Jahresmittelwerte im Mittel über ausgewählte Messstationen im jeweiligen Belastungsregime, Zeitraum 2000–2019, [2]

Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV, [9]). Aus der täglichen Praxis ist jedoch bekannt, dass diese optimalen Bedingungen nicht selbstverständlich sind, vielmehr kommen häufig Brennstoffe mit geringer Qualität und/oder zu hohem Feuchtegehalt zum Einsatz. Dabei stellt sich die Frage, welchen Einfluss der Feuchtegehalt und nicht optimale Betriebsbedingungen, die beispielsweise in der Anfahrphase eines Kessels auftreten, auf die Emissionen von Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe besitzen. Um einen Beitrag zur Klärung dieser Fragen zu leisten, wurden im Energiekompetenzzentrum der Staatlichen Studienakademie Riesa die Feinstaub- und CO-Emissionen an einer Biomassefeuerungsanlage zur Verbrennung von Stückholz und Pellets bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen und unterschiedlichen Holzfeuchten gemessen, ausgewertet und analysiert. Dabei wurden die Emissionen von Scheitholz und von Pellets bei jeweils drei unterschiedlichen Holzfeuchten sowohl in der Anheizphase als auch bei optimalen Betriebsbedingungen im stabilen Dauerbetrieb gemessen. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die durchgeführten Messungen.

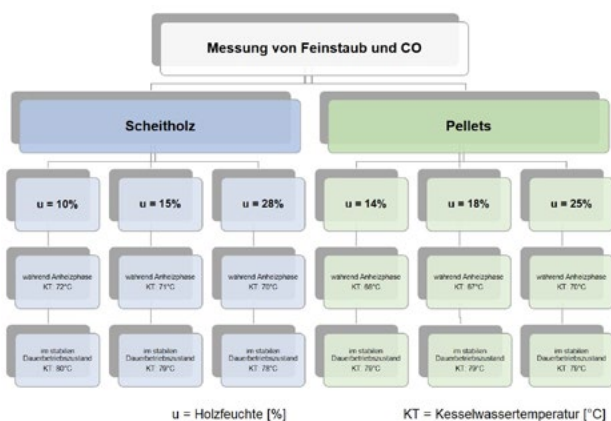


Abb. 2: Überblick über die durchgeführten Emissionsmessungen, nach [3]

### Versuchsanlage und Messtechnik

Für die messtechnischen Untersuchungen stand eine Biomassefeuerungsanlage vom Typ SP Dual 40 des Herstellers Fröling zur Verfügung. Die SP Dual 40 ist ein Kombikessel zur Verbrennung von Stückholz und Pellets (Abbildung 3). Die Stückholzkessel-einheit hat eine Nennleistung von 40 kW und arbeitet nach dem Verbrennungsprinzip des unteren Abbrandes. Der Pelletseinheit wird der Brennstoff automatisch über ein pneumatisches Fördersystem zugeführt, die Nennwärmeleistung beträgt bei Pelletfeuerung 38 kW [4].

Die Kesselanlage kann entweder mit Scheitholz, Pellets oder in Kombination betrieben werden, die Versuche wurden jedoch nur mit Scheitholz oder Pellets gefahren. Damit die Wärmeabfuhr aus dem Kessel durchgängig möglich ist und der Kessel während der gesamten Versuchsdauer bei Nennwärmeleistung betrieben werden kann, sind der Anlage Pufferspeicher mit einem Gesamtvolumen von 27 m<sup>3</sup> als Wärmesenke nachgeschaltet.



Abb. 3: Versuchsanlage zur Verbrennung von Stückholz und Pellets, [3]

Im Rahmen der Versuche wurden für die Brennstoffe Stückholz und Holzpellets Feuchtegehalt, partikelförmige Emissionen (Feinstaub) und Kohlenstoffmonoxidausstoß gemessen. Die verwendeten Messgeräte erfüllen alle die Vorgaben der Richtlinien VDI 4206-2 (02-2015) für Messgeräte zur Ermittlung von partikelförmigen Emissionen und VDI 4206-4 (08-2013) für Messgeräte zur Ermittlung der Feuchte von stückigem Holz.

Zur Bestimmung des Feuchtegehaltes von Stückholz kam das Messgerät HF550 der Firma Wöhler zum Einsatz. Die Holzfeuchte  $u$  in %, bezogen auf die Trockenmasse des Brennstoffes, wird dabei mittels elektrischer Widerstandsmessung bestimmt. Das Gerät misst im Messbereich zwischen 10% und 40% Holzfeuchte bei einer vom Hersteller angegebenen Messunsicherheit von  $\pm 40\%$  vom Messwert, geprüft nach VDI 4206-4 [5].

Mit der Feuchtwaaage FW550 der Firma Wöhler lässt sich der Feuchtegehalt von Schüttgütern, im vorliegenden Fall von Pellets, mittels einer dielektrischen Massemessung bestimmen. Das Messgerät kann den Feuchtegehalt  $u$  von Brennstoffen, bezogen auf die Trockenmasse im Bereich zwischen 0,1% und 70% erfassen. Die Messunsicherheit beträgt dabei in dem für die Untersuchungen relevanten Feuchtebereich von 5% bis 70% Holzfeuchte  $\pm 40\%$  vom gemessenen Feuchtwert [5]. Die Ermittlung der partikelförmigen Emissionen erfolgte sowohl mit dem Staubmessgerät STM 225 des Herstellers Afriso, bei dem die Partikelmasse im Abgasstrom mit einem optischen Messverfahren nach dem Prinzip der Streulichtmessung bestimmt wird [6], als auch mit einem Messgeräteset des Herstellers MRU auf der Basis eines gravimetrischen Messverfahrens [7]. Dadurch können die Messwerte des optischen Verfahrens mit den Ergebnissen der gravimetrischen Messung verglichen werden, um so die ermittelten Messergebnisse qualitativ besser bewerten zu können.

Relevante Abgasparameter, vor allem CO, wurden mit dem Abgasanalysegerät Spectraplus der Firma MRU und dem Multisensorenmessgerät Multilyzer des Herstellers Afriso gemessen. Beide Messgeräte ermitteln die Abgasparameter mit elektrochemischen Sensoren.

#### Verfahren zur Einstellung der Holzfeuchte

Um die Messungen bei vorgegebenen Werten für die Brennstofffeuchte durchführen zu können, musste ein Verfahren gefunden werden, mit dem die Feuchte von Scheitholz und Pellets an den Proben vor den Emissionsmessungen eingestellt werden kann. In [3] wurden dazu umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, als deren Ergebnis die folgenden Befeuchtungsprozesse für Scheitholz und für Pellets ausgewählt wurden.

#### Scheitholzbefeuchtungsprozess

Zur Einstellung einer gewünschten Holzfeuchte wurden Scheitholzproben in Behältern mit 210 Liter Fassungsvermögen in Wasser gelagert. Damit konnte gewährleistet werden, dass eine größere Menge Brennstoff gleichzeitig befeuchtet wird. Anschließend wurden über einen Zeitraum von zwei Wochen insgesamt acht Holzstücke entnommen und auf ihre Feuchte hin untersucht. Der zeitliche Verlauf der Durchfeuchtung der Holzstücke ist in Abbildung 4 zu sehen.

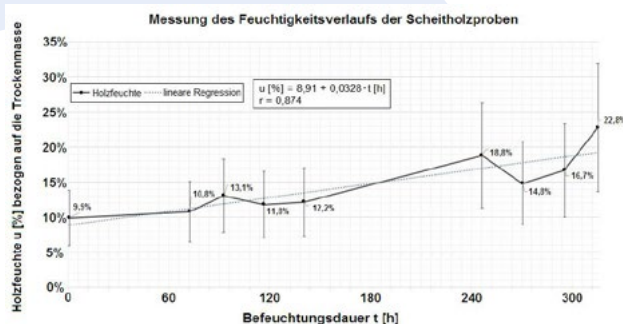


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Durchfeuchtung der Scheitholzproben

Die Durchfeuchtung des Holzes ist zunächst ein Prozess, der mathematisch durch eine Sättigungsfunktion beschrieben werden kann. Da die Messwerte jedoch nur einen kleinen Ausschnitt aus dem gesamten Funktionsverlauf abdecken und die Messunsicherheiten mit  $\pm 40\%$  vom Messwert vergleichsweise groß sind [5], können die gemessenen Werte in guter Näherung durch eine Lineare Regression ausgeglichen werden (Abbildung 4). Für den Feuchtigkeitsverlauf  $u(t)$  der Scheitholzproben ergibt sich als Ergebnis der Regressionsanalyse in guter Näherung (Korrelationskoeffizient  $r = 0,874$ ) die lineare Funktion

$$u \text{ [%]} = 8,91 + 0,0328 \times t \text{ [h]} \quad (1)$$

Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass die Befeuchtung von Holz von vielen Parametern beeinflusst wird. So fördern beispielsweise Störstellen und Asteinschlüsse die Geschwindigkeit, mit der Wasser den Brennstoff durchdringt. Ein homogener Befeuchtungsprozess ist daher nicht zu erwarten. Trotzdem können mit der gefundenen Trendfunktion (1) Feuchtigkeitsbereiche für Scheitholzproben eingestellt werden, die für einen praxisnahen Betrieb der Anlage repräsentativ sind. Für die Messreihen mit dem Brennstoff Scheitholz wurden bei den Prüflingen Holzfeuchten von 10%, 15% und 28% eingestellt.

#### Pelletsbefeuchtungsprozess

Im Gegensatz zum Befeuchtungsprozess des Scheitholzes, konnte die Befeuchtung der Pellets wesentlich schneller und einfacher realisiert werden. Das liegt vor allem daran, dass Pellets aufgrund ihrer Struktur und des Herstellungsprozesses in hohem Maß Wasser binden können. Die Festigkeit und Stabilität der Presslinge wird im Wesentlichen dadurch erreicht, dass das Pressgut nach der Pelletierung schnell abgekühlt und somit eine Aushärtung des zuvor thermisch aktivierten Lignins gewährleistet wird. Diese Formstabilität ist jedoch beeinträchtigt, sobald die Pellets mit Wasser in Berührung kommen [8].

Aus diesem Grund wurde für den Befeuchtungsprozess eine Drucksprühflasche gewählt, die den Pellets das Wasser gleichmäßig und vor allem in geringen Mengen zuführt, so dass der Feuchtegehalt der Pellets optimal und dosiert eingestellt werden kann. Dabei war zu beobachten, dass Pellets ab ca. 18 % Feuchtegehalt ihre Konsistenz verändern und mit steigendem Feuchtegehalt ein Zerfall der Presslinge stattfindet (Abbildung 5). Abbildung 5 zeigt Pellets der drei unterschiedlichen Feuchteniveaus von ca. 14%, 18% und 25%, die im Rahmen der Versuchsreihe eingestellt wurden.



Abb. 5: Pellets mit unterschiedlichen Feuchtegehalten (v.l.n.r.: 14%; 18%; 25%), [3]

### Ergebnisse für die Emissionsmessungen am Scheitholzkessel

Die gemessenen Feinstaub- und Kohlenstoffmonoxidemissionen am Scheitholzkessel sind in Abhängigkeit von der Brennstofffeuchte in Abb. 6 für den Anfahrzustand (Bereich nicht optimaler Systemtemperaturen) zu sehen. Abb. 7 zeigt im Vergleich dazu die Messergebnisse im optimalen Betriebsbereich, während sich der Kessel im Dauerbetrieb befindet.

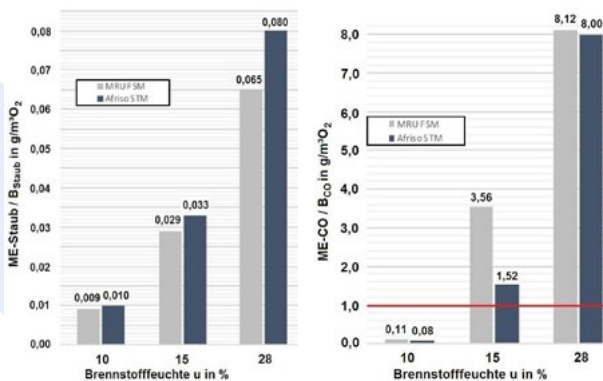


Abb. 6: Ergebnisse der Emissionsmessungen für Feinstaub (links) und CO (rechts) während der Anheizphase mit Scheitholz als Brennstoff, nach [3]

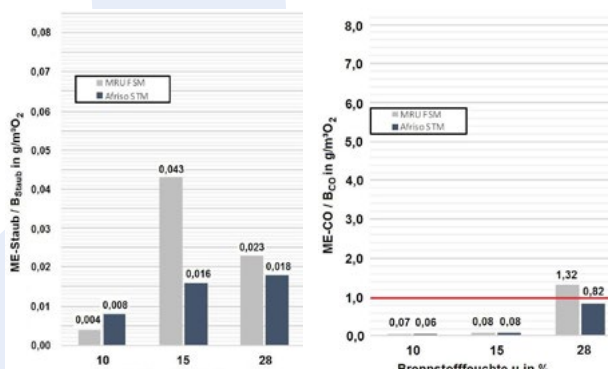


Abb. 7: Ergebnisse der Emissionsmessungen für Feinstaub (links) und CO (rechts) während des Dauerbetriebes mit Scheitholz als Brennstoff, nach [3]

Beide Abbildungen zeigen, dass im Bereich niedrigerer Kesseltemperaturen, also während der Anheizphase, die Emissionen von Feinstaub im Schnitt wesentlich höher sind als während des optimalen Dauerbetriebszustandes der Feuerungsanlage. Dabei steigen die Feinstaubemissionen mit zunehmendem Feuchtegehalt des Brennstoffes an. Bemerkenswert ist, dass selbst während ungünstiger Anheizbedingungen und mit Einsatz von sehr feuchtem Brennstoff, der geltende Grenzwert für Staubemissionen von 0,10 g/m<sup>3</sup> für Scheitholz gemäß der 1. BImSchV sicher eingehalten wird [9].

Gleiches kann für die Emissionen an Kohlenstoffmonoxid jedoch nicht festgestellt werden. Hier wird der Grenzwert für CO-Emissionen von 1,0 g/m<sup>3</sup> gemäß der 1. BImSchV nicht bei allen Feuerungsbedingungen eingehalten [9]. Eine sichere Unterschreitung des Kohlenstoffmonoxid-Grenzwertes ist de facto nur bei sehr geringen Brennstofffeuchten

von maximal 10 % und/oder im optimalen Betriebsbereich gewährleistet. Jedoch ist auch während des Dauerbetriebes eine Überschreitung des Grenzwertes möglich, wenn Brennstoff mit einem zu hohen Feuchtegehalt eingesetzt wird.

### Ergebnisse für die Emissionsmessungen am Pelletkessel

In Abb. 8 sind die gemessenen Feinstaub- und CO-Emissionen in Abhängigkeit von der Pelletfeuchte im Bereich nicht optimaler Systemtemperaturen, also im Anfahrzustand des Kessels zu sehen. Im Vergleich dazu zeigt Abb. 9 die Messergebnisse für den optimalen Betriebsbereich des Kessels (Dauerbetrieb).

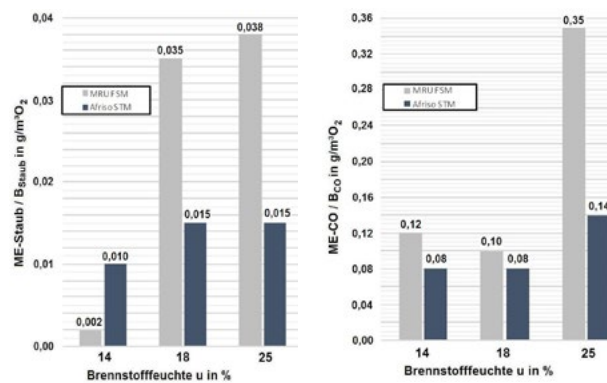


Abb. 8: Ergebnisse der Emissionsmessungen für Feinstaub (links) und CO (rechts) während der Anheizphase am Pelletkessel, nach [3]

Anhand der Abbildungen 8 und 9 ist zu sehen, dass sowohl Feinstaub- als auch CO-Emissionen im Bereich niedriger Kesseltemperaturen, also in der Anfahrphase, tendenziell höher sind als im optimalen Betriebsbereich der Anlage. Die Feinstaub- und Kohlenmonoxidemissionen steigen mit zunehmendem Feuchtegehalt des Brennstoffes an, jedoch fallen die relativen Unterschiede im Vergleich zu den Emissionswerten bei Scheitholzfeuerung geringer aus. Die in der BImSchV [9] vorgegebenen Emissionsgrenzwerte von 0,06 g/m<sup>3</sup> für Feinstaub und von 0,8 g/m<sup>3</sup> für Kohlenstoffmonoxid werden bei Pelletfeuerung sowohl in der Anfahrphase als auch im Dauerbetrieb sicher eingehalten.

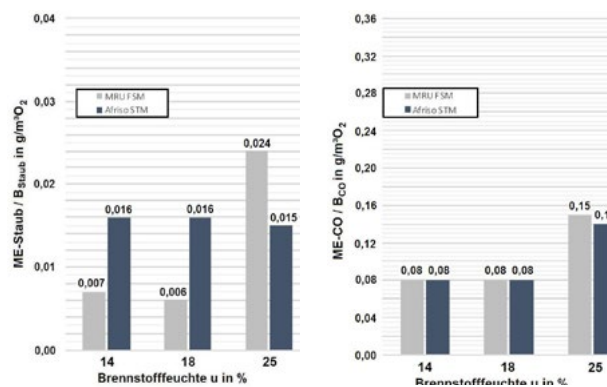


Abb. 9: Ergebnisse der Emissionsmessungen für Feinstaub (links) und CO (rechts) während des Dauerbetriebes am Pelletkessel, nach [3]

### Schlussfolgerungen und Ausblick

Als Fazit der Untersuchungen kann zusammengefasst werden, dass die Feinstaub- und CO-Emissionen an der untersuchten Feuerungsanlage für Pellets und Scheitholz im relevanten Maß vom Feuchtegehalt der eingesetzten Brennstoffe abhängen. Bei Einsatz von zu feuchtem Brennstoff sinkt nicht nur der Heizwert des Brennstoffes und damit der Wirkungsgrad des Feuerungsprozesses. Gleichzeitig ist auch ein signifikanter Anstieg der Emissionsbelastungen sowohl für Feinstaub als auch für Kohlenstoffmonoxid zu verzeichnen [3].

Für den praktischen Einsatz beim Endkunden bedeutet das, dass sowohl unter nicht optimalen Betriebsbedingungen als auch bei Verwendung von zu kurz oder falsch gelagertem Brennstoff mit hohem Feuchtegehalt die Emissionen von Feinstaub und Kohlenstoffmonoxid über die in der 1. BImSchV festgelegten Grenzwerte steigen können. Das zeigt, dass Endkunden und Verbraucher sensibilisiert werden müssen für die sachgemäße Lagerung von Scheitholz und Pellets, um Emissionen zu verringern und so einen Beitrag zur Erfüllung der Klimaschutzziele zu leisten.

### Literaturverzeichnis

- [1] Sven Geitmann: Erneuerbare Energien, Mit neuer Energie in die Zukunft, Hydrogeit Verlag Oberkrämer 2010.
- [2] Andrea Minkos et al.: Luftqualität 2019 - Vorläufige Auswertung, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau 2020.
- [3] Florian Herrmann: Messtechnische Untersuchungen zur Emission von Feinstaub an einem Scheitholz- und Pellets-Kombikessel bei unterschiedlichen Brennstoffqualitäten und -feuchten, Bachelorarbeit Staatliche Studienakademie Riesa 2019.
- [4] Fröling GmbH, Montageanleitung Kombikessel SP Dual, Grieskirchen 2012.
- [5] Bedienungsanleitung Holzfeuchtemessgerät Wöhler HF 550, Bad Wünnenberg 2016.
- [6] Betriebsanleitung Staubmessgerät AFRISO-EURO-INDEX GmbH STM 225 Set, Güglingen 2018.
- [7] Bedienungsanleitung Feinstaubmessung FSM, MRU GmbH, Neckarsulm- Obereisesheim 2019.
- [8] S. Döring: Pellets als Energieträger; Springer Verlag 2011.
- [9] Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen – 1. BImSchV) 2010.