

Schlussbericht

zum Verbundvorhaben „CycleTest“

Thema: **Entwicklung eines realitätsnahen Prüfzyklus für Holzzentralheizungen**

Zuwendungsempfänger:

Teilvorhaben 1: Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI)

Teilvorhaben 2: Technologie und Förderzentrum Straubing (TFZ)

Förderkennzeichen:

Teilvorhaben 1: 22039118

Teilvorhaben 2: 22038918

Laufzeit:

01.07.2019 bis 30.09.2022

Datum der Veröffentlichung:

30.03.2023

Gefördert durch:



**Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Inhaltsverzeichnis

I.	Kurzbericht	1
1.	Aufgabenstellung	1
2.	Planung und Ablauf des Vorhabens	1
3.	Resümee der wesentlichen Ergebnisse	2
a)	Arbeitspakete und Meilensteine	2
b)	Zusammenfassung	3
II.	Ausführliche Darstellung der Ergebnisse	5
1.	Erzielte Ergebnisse	5
	Arbeitspaket 1: Management und Projektkoordination (TV1)	5
	Arbeitspaket 2: Entwicklung einer Methodik für die Prüfstandsversuche (TV2)	5
	Arbeitspaket 3: Validierung und Bewertung (TV2)	9
	Arbeitspaket 4: Entwicklung des Zertifizierungsprogramms (TV1)	12
	Arbeitspaket 5: Implementierung der Ergebnisse am Markt (TV1)	14
2.	Verwertung	14
a)	Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen	14
b)	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	14
c)	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	15
d)	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	15
3.	Erkenntnisse von Dritten	16
4.	Veröffentlichungen	16
ANHANG	18	
	Teilvorhaben 1: Koordination und Vorbereitung der Marktumsetzung (DEPI)	18
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	18
2.	Bearbeitete Arbeitspakete	18
	Arbeitspaket 1: Management und Projektkoordination	18
	Arbeitspaket 4: Entwicklung des Zertifizierungsprogramms	18
	Arbeitspaket 5: Implementierung der Ergebnisse am Markt	18
3.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	18
	Teilvorhaben 2: Entwicklung, theoretische und experimentelle Untersuchungen (TFZ)	19
1.	Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens	19
	Arbeitspaket 1: Management und Projektkoordination (Beteiligung TFZ, Koordination DEPI) ...	19
	Die Aktivitäten zu diesem AP werden im Berichtsteil zu Teilvorhaben 1 ausführlich dargestellt.	
	19
	Arbeitspaket 2: Entwicklung einer Methodik für die Prüfstandsversuche (Koordination TFZ)	19
	Arbeitspaket 3: Validierung und Bewertung	19
2.	Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens	19

I. Kurzbericht

1. Aufgabenstellung

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Validierung einer praxisnahen Prüfmethode zur Beurteilung der Effizienz und des Emissionsverhaltens von Holzzentralheizungen im Realbetrieb. Wenn dieses Ziel erreicht wird, sollten auf Grundlage der neuen Prüfmethode Ansätze für ein Zertifizierungsprogramm (Zertifizierungshandbuch und -prozeduren) für automatisch beschickte Pellet- und Hackschnitzelkessel entwickelt werden.

Die Methode basiert auf einem Lastzyklus für eine Prüfstandsmessung, der den Lastverlauf eines Kessels über das Jahr hinweg proportional und praxisnah abbildet. Dadurch wird – anders als bei Anwendung der in der DIN EN 303-5 definierten Methode für die Typenprüfung – eine realitätsnahe Bewertung eines Kessels möglich.

Im zu entwickelnden Prüfhandbuch sollten neben dem definierten Lastzyklus eine einheitliche Mess- und Auswertungsmethodik sowie die zu verwendenden Prüfbrennstoffe festgelegt werden, um die Vergleichbarkeit der Messungen sicherzustellen. In einem zweiten Schritt sollte die neue Prüfmethode in einem Ringversuch durch erfahrene Institute im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit und die Reproduzierbarkeit bewertet und gegebenenfalls angepasst werden. Die neu entwickelte Prüfmethode sollte als Grundlage für ein Zertifizierungsprogramm für Holzzentralheizungen dienen. Das Programm sollte es den Herstellern hochwertiger Holzkessel ermöglichen, die Effizienz und das auch im Benutzungsalltag gegebene Emissionsverhalten ihrer Produkte nachzuweisen. Mit den Ergebnissen solcher Messungen würden Planer, Installateure, Energieagenturen und Fördermittelgeber die Möglichkeit erhalten, verschiedene Kessel realitätsnah zu bewerten und besonders fortschrittliche Technologien zu identifizieren und hervorzuheben. Anlagenherstellern sollte außerdem eine Methode für ihre Werksprüfstände gegeben werden, nach der sie die Bewertung ihrer Anlagen in einer realen Wärmeversorgungssituation prüfen und optimieren könnten, z. B. indem sie die Kesselsteuerung und -regelung an die Betriebsbedingungen eines permanent wechselnden Wärmebedarfs optimal anpassen.

Das Erreichen dieses Methodenentwicklungsziels ist die Voraussetzung dafür, dass ein Zertifizierungsprogramm für automatisch beschickte Pellet- und Hackschnitzelkessel entwickelt werden kann. Durch Anwendung der neuen Methode auf eine Vielzahl von automatisch beschickten Zentralheizungsanlagen sollte zugleich eine ausreichende Datenbasis erarbeitet werden, die den Stand der Technik unter den hier definierten, besonderen Prüfbedingungen charakterisiert.

Generell sollte mit der neuen Methode aber auch der wachsenden Kritik an der geringen Aussagefähigkeit der bisherigen Typenprüfmethode begegnet werden. Es wird erwartet, dass diese Kritik zunehmen wird, weil seit 2020 mit der Ökodesignrichtlinie die vorgegebenen Berechnungsmethoden für den "Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad" sowie für die "Raumheizungs-Jahres-Emissionen" Anwendung finden, wodurch die Wirklichkeit weiter verzerrt wird. Derartigen Hemmnissen sollte das Projekt vorbeugen und gleichzeitig eine international umsetzbare Real-Messmethode als Alternative auch für normative Zwecke anbieten.

2. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Arbeit am Projekt wurde nach Erteilung des Zuwendungsbescheides vom 07.05.2019 am 01.07.2019 begonnen.

Gemäß Vorhabenbeschreibung begann die inhaltliche Arbeit mit der Entwicklung der Methodik für die Prüfstandsversuche (AP 2, TV2). Die Bearbeitung erfolgte durch den zuständigen Projektpartner TFZ in Zusammenarbeit mit dessen Unterauftragnehmer Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH (BEST, im Antrag noch unter dem alten Namen BIOENERGY 2020+ GmbH aufgeführt) in enger Absprache mit dem Projektpartner DEPI. Die Arbeiten an Arbeitspaket 2 wurden wie geplant im Dezember 2020 mit der Fertigstellung eines vorläufigen Prüfstandshandbuchs für einen realitätsnahen Prüfzyklus abgeschlossen.

Die Evaluierung und Anpassung der in AP 2 entwickelten Methodik erfolgte in AP 3 (TV2) ebenfalls durch den Projektpartner TFZ in Zusammenarbeit mit dem Unterauftragnehmer BEST. In den Ringversuch zur Validierung der Methodik waren außerdem das Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ; Leipzig), das Danish Technological Institute (DTI; Aarhus, Dänemark), die Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt Francisco Josephinum (BLT; Wieselburg, Österreich) sowie die Gastechnologisches Institut gGmbH (DBI; Freiberg) eingebunden, die alle über langjährige Erfahrung mit Prüfstandsversuchen an Biomassekesseln verfügen. Entgegen der ursprünglichen Planung wurden somit vier anstatt drei externer Institute in den Ringversuch eingebunden. Aufgrund von Verzögerungen, die im Wesentlichen durch Einschränkungen in Folge der SARS-CoV-2-Pandemie, die Einbindung eines weiteren Ringversuchspartners, notwendig gewordenen Abschlussmessungen bei TFZ und BEST im Rahmen des Ringversuchs sowie zusätzliche Messungen unter Einbindung von Pufferspeichern verursacht wurden, konnte die Arbeit an diesem Arbeitspaket nicht planmäßig im Januar 2022 abgeschlossen werden. Eine detaillierte Darlegung der Gründe für die Verzögerungen findet sich in den Zwischenberichten der Jahre 2021 und 2022 sowie im (abgelehnten) Antrag des TFZ auf Mittelaufstockung und Laufzeitanpassung vom 02.06.2021.

Arbeitspaket 4 (TV1) hat sich aus zwei Teilen zusammengesetzt. Ziel des Hauptteils (geplant für den Zeitraum von November 2021 bis Mai 2022) war die Entwicklung eines auf der neuen Prüfmethodik aufbauenden Zertifizierungsprogrammes. In einem vorgelagerten Teil (März und August 2020) wurden zusammen mit dem Projektpartner TFZ die Anforderungen an Prüfbrennstoffe definiert. Aufgrund der Verzögerungen in AP 3 konnte Projektpartner DEPI nicht planmäßig mit der Entwicklung des Zertifizierungshandbuchs beginnen. Dies wurde der FNR in den Zwischenberichten der Jahre 2021 und 2022 sowie im Antrag des DEPI auf kostenneutrale Laufzeitverlängerung vom 03.06.2021 angezeigt. Gemäß Projektantrag sollte ein projektbegleitender Ausschuss vor dem Beginn der Handbuchentwicklung beurteilen, ob die in AP 2 und AP 3 entwickelte Prüfmethodik dazu geeignet ist, als Basis für ein Zertifizierungsprogramm für automatisch beschickte Holzkessel zu dienen. Der Ausschuss war mit Vertretern von Wissenschaft, Behörden, Schornsteinfeger- und Installateurshandwerk sowie Kesselherstellern besetzt. Auch wenn der Nutzen eines Zertifizierungsprogramms kontrovers diskutiert wurde, waren sich die Ausschussmitglieder in ihrer Sitzung am 28.10.2021 nach der Vorstellung der bisherigen Projektergebnisse weitgehend einig, dass die wissenschaftlichen Ziele der Erarbeitung einer Methode einschließlich deren Validierung erreicht wurden und der Einsatz der Methode in der Entwicklung von Holzkesseln und bei der Bestimmung von Emissionsfaktoren unabhängig von einem möglichen Zertifikat wünschenswert ist. Da der Erfolg eines Zertifizierungsprogramms maßgeblich von der Akzeptanz der möglichen Zertifikatnehmer abhängt, wurde die Fortführung des Projektes (Entwicklung des Zertifizierungsprogramms (AP 2, TV1) und Implementierung am Markt (AP 5, TV1)) am 06.12.2021 mit Vertretern von maßgeblichen deutschen und österreichischen Kesselherstellern im Beisein von Herrn Dr. Schütte diskutiert. Es wurde beschlossen, das Zertifizierungsprogramm zu entwickeln, dieses jedoch nicht im Rahmen des Projektes am Markt zu implementieren. Einem mit dem Projektpartner TFZ abgesprochenen Antrag des DEPI auf Streichung von AP 5 wurde durch die FNR mit Beschluss vom 29.03.2022 stattgegeben. Die Zeit für die Bearbeitung von AP 4 wurde um drei Monate bis zum 30.09.2022 verlängert.

Arbeitspaket 1 (TV1) diente der Koordination der Zusammenarbeit der beiden Teilvorhaben sowie der Information und Einbindung des projektbegleitenden Ausschusses und der Kesselbranche (s.o.). Das Arbeitspaket zog sich über die gesamte Projektlaufzeit.

3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag) ¹⁾	Zielerreichung
AP 1 Management und Projektkoordination (TV1)	07/2019 bis 06/2022	Das Projekt wurde mit durch die FNR genehmigten Änderungen erfolgreich abgeschlossen. Der Abschluss erfolgte durch die unten aufgeführten Verzögerungen (AP 4) zum 30.09.2022.
AP 2 Entwicklung einer Methodik für die Prüfstandsversuche (TV2)	07/2019 bis 12/2020	Die Methodik wurde bereits frühzeitig festgelegt und bis 12/2020 in einem vorläufigen Prüfstandshandbuch für alle externen Partner nachvollziehbar dokumentiert. Danach wurden, wie vorgesehen, die aus der eigenen praktischen Erfahrung im nachfolgenden Umgang mit der Methode sowie die in den Ringversuchen in AP 3 entstandenen Erfahrungen und Rückmeldungen eingearbeitet. Außerdem wurden viele Klarstellungen und Erläuterungen angefügt und bebildert. Das Prüfstandshandbuch wurde im Rahmen mehrerer ausführlicher Online-Besprechungen von TFZ und BEST (z.B. 31.01.2022, 14.02.2022, 21.02.2022 und 07.03.2022) detailliert ausgearbeitet sowie anschließend mit dem DEPI abgestimmt. Die finale Version findet sich im zweiten Abschnitt des Anhangs zu TV2 in diesem Bericht.
AP 3 Validierung und Bewertung (TV2)	10/2020 bis 01/2022	Die erarbeitete Prüfmethode wurde im Rahmen eines aufwändigen Ringversuchs mit vier weiteren externen Partnern (zertifizierte Prüfinstitutionen) validiert. Die einzelnen Ringversuchspartner sowie die beiden Forschungseinrichtungen TFZ und BEST führten mit beiden Kesseln das jeweils vorgesehene Versuchsprogramm, d. h. je eine stationäre Voll- und Teillastmessung gemäß Typenprüfung sowie mindestens einen Lastzyklusversuch, durch. Vom DEPI in Zusammenarbeit mit dem TFZ wurde hierzu homogenisierter Versuchsbrennstoff zur Verfügung gestellt. Die Ringversuche bei den externen Prüfinstituten fanden im Zeitraum vom 15.03.2021 bis 31.08.2021 statt und endeten mit den „Ringschluss-Messungen“ am TFZ und bei BEST. Am TFZ wurden die Ergebnisse anschließend gesammelt und im Hinblick auf

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag) ¹⁾	Zielerreichung
		<p>Reproduzierbarkeit ausgewertet. Alle ausgewerteten Daten bezüglich der Validierung wurden dem projektbegleitenden Ausschuss (siehe AP 1) im Rahmen eines virtuellen Projekttreffens am 28.10.2021 vorgestellt und diskutiert. Die Stellungnahmen der Ausschussmitglieder wurden protokolliert. Auch mit den Ringversuchs-Teilnehmern wurde ein Abschluss-Workshop abgehalten (07.12.2021).</p> <p>Zugleich wurden in einer Reihenuntersuchung an insgesamt elf Zentralheizungen (8 x für Pellets, 2 x für Hackschnitzel, 1 x für Heizöl) eine Datengrundlage für die Beurteilung der realen Emissionen und Nutzungsgrade von automatisch beschickten häuslichen Holzzentralheizungen geschaffen, und es wurde zugleich auch die Frage nach der Wirkung eines Pufferspeichers unter Lastzyklusbedingungen beantwortet. Auf dieser Datenbasis kann eine mögliche Zertifizierung aufbauen.</p>
AP 4 Entwicklung des Zertifizierungsprogramms (TV1)	07/2020 bis 05/2022 ²⁾	<p>Das Ziel der Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms für automatisch beschickte Holzkessel auf Grundlage der durch das TFZ und BEST entwickelten Lastzyklusmethode wurde erreicht.</p> <p>Aufgrund der Verzögerungen in AP 3 und der Diskussion über die Fortführung des Projektes mit dem projektbegleitenden Ausschuss und der FNR wurde AP 4 im Zeitraum März 2022 bis September 2022 bearbeitet (siehe aktualisierter Arbeits- und Finanzplan der Projektpartner vom 18.02.2022 und FNR-Kürzungsbescheid vom 29.03.2022).</p>
AP 5 Implementierung der Ergebnisse am Markt (TV1)	03/2022 bis 10/2022	Nach Absprache mit der FNR und dem Projektpartner TFZ wurde AP 5 ersatzlos gestrichen (siehe Schreiben der FNR mit dem Zeichen 3962-220-391-18 vom 24.01.2022).

¹⁾ Projektstart laut Antrag: 10/2018, Start gemäß Zuwendungsbescheid 07/2019

²⁾ planmäßige Unterbrechung 09/2020-10/2021

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1: Bericht über die Gegenüberstellung der Ergebnisse von Typen- und Zyklusmessung	12/2020	Der Meilenstein wurde erreicht. Die Gegenüberstellung beinhaltet Daten, die an zehn unterschiedlichen Feuerungen erhoben werden. Verglichen werden Ergebnisse von Voll- und Teillastversuchen an den Prüfständen von TFZ und BEST, die Ergebnisse der Lastzyklusversuche mit und ohne Pufferspeicher sowie die Daten, die nach der Formel der Ökodesign-Verordnung ermittelt wurden (basierend auf Daten der nachgestellten Typenprüfung, vgl. separater Anhang). Die beiden Hackschnitzelfeuerungen wurden mit vier unterschiedlichen Hackschnitzel-Qualitäten betrieben, um den Einfluss von Brennstoff-Qualität untersuchen zu können. Die Ergebnisse zum Vergleich der Lastzyklusergebnisse mit den Messungen bei stationärem Betriebszustand sind diesem Bericht im separaten Anhang beigefügt.
M 2: Erstellung eines Berichts zur Erreichung des Teilzieles der Entwicklung einer geeigneten Prüfmethode	10/2021	Der Meilenstein wurde erreicht. Das entwickelte Prüfstandshandbuch und Daten der Ringversuche zur Validierung befinden sich im letzten Abschnitt des separaten Anhangs zu TV2.
M 3: Fertigstellung des Zertifizierungshandbuchs	05/2022	Aufgrund der oben dargestellten Verschiebung von AP 4 wurde das Zertifizierungshandbuch zum Projektende (09/2022) fertiggestellt.

b) Zusammenfassung

Mit Ausnahme der in AP 5 vorgesehenen Implementierung der Ergebnisse am Markt, konnten die im Projekt „CycleTest“ geplanten Arbeiten trotz Verzögerungen im Projektablauf durchgeführt und somit die meisten Ziele des Projektantrags erreicht werden. Schwierigkeiten in der Projektdurchführung ergaben sich aufgrund der

Covid-19-Pandemie sowie durch Ausfälle von Personal und Messtechnik im Teilvorhaben 2 (TFZ und Unterauftragnehmer BEST). Dies wurde der FNR frühzeitig mitgeteilt und das Projekt wurde entsprechend bis zum 30.09.2022 verlängert. In dieser Zeit konnten die noch ausstehenden Arbeiten durchgeführt und das Projekt mit beantragter Ausnahme des AP 5 abgeschlossen werden.

Die entwickelte Prüfmethode wird in Teil II dieses Berichtes (zu AP 2) zusammengefasst: Sie ist in einem ausführlichen gemeinsamen Prüfstandshandbuch von TFZ und BEST dargestellt, deren Schlussversion findet sich im zweiten Abschnitt der Langfassung zum Teilvorhaben 2. Das Prüfstandshandbuch ist betitelt mit „*Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers – Manual for test stands*“. Es wurde ausschließlich in englischer Sprache verfasst und beinhaltet alle Aspekte der Prüfung, d. h. Versuchsaufbau und messtechnische Durchführung mit Fokus auf Pelletkessel ohne Pufferspeicheranbindung, wobei unterschiedliche kesselspezifische hydraulische Anbindungen (mit und ohne hydraulische Weiche) und verschiedene Temperaturniveaus zur Anwendung kommen können. Der prinzipielle Versuchsaufbau folgt zwar den relevanten Normen (EN 304, EN 303-5), jedoch gehen die Anforderungen, die an die Prüfumgebung, Messtechnik, Prüfstandausstattung, Kesselbedienung, Personalbedarf, Brennstoff, Auswertung und prüfinternes Qualitätsmanagement gestellt werden, weit über die genannten Normen hinaus.

Im Rahmen der Methodenvvalidierung (AP 3) erfolgten weitere umfangreiche Messungen, in denen unter anderem die entstandene Prüfmethode in einem Ringversuch erprobt wurde, wobei zwei verschiedene Pelletkessel, die zuerst bei TFZ und BEST gemessen worden waren, von insgesamt vier weiteren anerkannten Prüf- und Messinstituten nach der neuen Messvorschrift untersucht wurden. Dabei bestand das angewandte Versuchsprogramm einheitlich für jedes Messinstitut aus je einer stationären Voll- und Teillastmessung gemäß Typprüfung (DIN EN 303-5) sowie mindestens einem Lastzyklus-Versuch. Außerdem wurde allen beteiligten Instituten hierfür ein einheitlicher homogener Pellet-Versuchsbrennstoff zur Verfügung gestellt.

Die vollständige Datenauswertung der Validierungsergebnisse wird im beigefügten ausführlichen Ergebnisbericht zum TV2 dargestellt. Sie zeigen, dass die Umsetzung der neuen Methode eine große Herausforderung für die Mess- und Prüfstellen bedeutete. Jedoch stellt die Methode, die nach der Validierungsphase noch weiterentwickelt und präzisiert wurde, eine gut reproduzierbare Prüfvorschrift dar, die im Vergleich zur etablierten Kesselprüfmethode nach DIN EN 303-5 (d. h. Vollastmessung und Teillastmessung) kaum höhere Messwertschwankungen produziert als bei einer herkömmlichen Typprüfung, obwohl für die neue Methode noch keine langjährigen Erfahrungen bei den beteiligten Prüfständen vorlagen.

Zugleich wurden in einer Reihenuntersuchung an insgesamt elf Zentralheizungen (8 x Pellet, 2 x Hackschnitzel, 1 x Heizöl) eine Datengrundlage für die Beurteilung der realen Emissionen und Nutzungsgrade von automatisch beschickten häuslichen Holzzentralheizungen geschaffen, und es wurde auch die Frage nach der Wirkung eines Pufferspeichers unter Lastzyklusbedingungen beantwortet. Alle Daten dieses Vergleichs finden sich im beigefügten ausführlichen Ergebnisbericht im externen Anhang.

Ein Handbuch zur Zertifizierung von automatisch beschickten Holzzentralheizungen nach Lastzyklusmethode (gemäß des in AP 2 und AP 3 entwickelten Prüfstandshandbuchs) unter Berücksichtigung der DIN EN 303-5 wurde in AP 4 ausgearbeitet. Das Zertifizierungsprogramm wurde als Kennzeichnungssystem für Holzzentralheizungen entwickelt, damit potenzielle Nutzer schneller und transparenter die Effizienz und das Emissionsverhalten der verschiedenen Kessel vergleichen können. Dafür wurde als Bewertungsgrundlage die Effizienz-Emissions-Klasse eingeführt, die aus den Ergebnissen der Prüfung gemäß Lastzyklusmethode abgeleitet wird. Diese wird mit weiteren relevanten Informationen auf dem Zertifizierungszeichen aufgeführt.

Die Implementierung der Ergebnisse am Markt wurde auf Antrag der Fördermittelnehmer im Rahmen des Projekts gestrichen.

II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

1. Erzielte Ergebnisse

Die entwickelten Handbücher (Prüfstandshandbuch Lastzyklusmethode und Zertifizierungshandbuch) stellen die wesentlichen Ergebnisse des Projekts „CycleTest“ dar. Sie sind im Anhang an diesen Bericht aufgeführt. Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse kurz zusammengefasst. Für eine ausführlichere Darstellung wird auf die Langfassung in den Anhängen verwiesen.

Arbeitspaket 1: Management und Projektkoordination (TV1)

Hauptaugenmerk des Arbeitspakets war es, im Rahmen des Verbundprojekts die enge Zusammenarbeit unter den Projektpartnern zu koordinieren. Neben zahlreichen kurzen Abstimmungen wurden 22 mehrstündige Besprechungen, Vor-Ort oder wegen Einschränkungen durch die COVID-19-Pandemie virtuell mit den Projektpartnern vom TFZ und den Unterauftragnehmern von BEST abgehalten. Der Zuwendungsgeber wurde in drei ausführlichen Zwischenberichten regelmäßig über den Projektfortschritt informiert.

Kurz nach Projektstart wurde ein Flyer erstellt, um die Kesselhersteller über den Hintergrund und die Ziele des Projektes zu informieren. Der Flyer sollte dazu dienen, frühzeitig mit den potenziellen Zertifikatnehmern ins Gespräch zu kommen.

Am 12.11.2020 wurden die in TV2 entwickelten Ansätze für die Prüfmethode nach Lastzyklusmethode und erste Ergebnisse aus Prüfstandsmessungen mit Vertretern von deutschen und österreichischen Kesselherstellern sowie Verbandsvertretern in einer Webkonferenz diskutiert.

Zur Sicherstellung der praktischen Umsetzbarkeit der Messmethode wurde gemäß Vorhabenbeschreibung und der Vorgaben im Zuwendungsbescheid ein projektbegleitender Ausschuss mit Vertretern verschiedener relevanter Akteursgruppen (Kesselhersteller (zwei Vertreter), Schornsteinfeger (ein Vertreter), Wissenschaft (drei Vertreter), Handwerk (zwei Vertreter) und Behörden (ein Vertreter)) implementiert. Die Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses fand am 28.10.2021 als Webkonferenz statt. Das Votum des projektbegleitenden Ausschusses fiel weitgehend positiv aus.

Ein zusammengefasstes Statement des Projektkonsortiums wird in den nächsten beiden Punkten widergespiegelt:

- Die wissenschaftlichen Ziele der Erarbeitung einer Methode einschließlich deren Validierung wurden erreicht.
- Unabhängig von einem möglichen Zertifikat ist der Einsatz der Methode in der Entwicklung von Holzkesseln und bei der Bestimmung von Emissionsfaktoren wünschenswert.

Bedenken stellten lediglich die marktrelevanten Kesselhersteller in den Raum und sprachen sich gegen die geplante Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms auf Grundlage der entwickelten Prüfmethode und dessen anschließende Bewerbung aus.

Bei einer folgenden Besprechung am 06.12.2021 mit Vertretern von relevanten Kesselherstellern sowie Vertretern der FNR wurde der Kompromiss gefunden, dass AP 4 planmäßig bearbeitet, jedoch AP 5 ersatzlos gestrichen werden soll. Dies wurde im Schreiben des DEPI zur Anhörung zur Fortführung des Verbundverfahrens sowie im aktualisierten Arbeits- und Finanzplan fixiert und von der FNR im Kürzungsbescheid bestätigt. Außerdem wurde die durch das DEPI beantragte Verlängerung der Projektlaufzeit um drei Monate bis zum 30.09.2022 bestätigt.

Der weitere Informationsaustausch mit den potenziellen Zertifikatnehmern, der zur Steigerung der Akzeptanz des Zertifizierungsprogramms führen soll, sollte im Rahmen des fünften Arbeitspakets oder im Anschluss an das Projekt durch das DEPI erfolgen.

Arbeitspaket 2: Entwicklung einer Methodik für die Prüfstandsversuche (TV2)

Die nachfolgenden Ausführungen sind als Zusammenfassung der im Anhang ausführlich dargestellten Ergebnisse aus dem Teilvorhaben 2 aufzufassen.

Die bisherigen Typenprüfungen an Pelletkesseln nach DIN EN 303-5 berücksichtigen nur konstante Zustände eines Teillast- oder eines Nennlastbetriebs unter Verwendung eines Brennstoffs, auf welchen der Pelletkessel optimal eingestellt ist. Dies spiegelt jedoch nicht den realen Betrieb eines Pelletkessels in einem typischen Benutzeralltag wieder, denn es werden weder der Kaltstart noch der Lastwechsel oder der Ausbrand eines Kessels messtechnisch erfasst. Auch kann ein taktender Kessel, d. h. der Ein-Aus-Betrieb, bei einer niedrigen Leistungsanforderung mit der bisherigen Typenprüfmethode nicht beurteilt werden. Somit war es das Ziel des Vorhabens, eine Messmethode zu entwickeln, die die dynamischen Veränderungen am Kessel berücksichtigt und so das reale Ganzjahresverhalten eines Kessels innerhalb eines einzigen Prüftages beschreiben kann.

Basierend auf den Wärmebedarfskurven der VDI 4655:2019 wurde unter Berücksichtigung unterschiedlicher Jahreszeiten, Wetterbedingungen und Wochentage (Bild 1, links) vom Unterauftragnehmer BEST ein

Standardlastprofil mit einer Kesselbetriebsdauer von acht Stunden abgeleitet und in der nachfolgenden Erprobungsphase gemeinsam mit dem TFZ weiter angepasst und optimiert. Durch den Lastzyklus kann die Charakteristik der Wärmeanforderung an einen Biomassekessel während eines Jahres verkürzt an einem einzigen Versuchstag nachgebildet werden. Mit der Vorgabe dieser dynamischen Wärmebedarfskurve (Bild 1, rechts) anstelle einzelner konstanter Laststufen wird die Kesselsteuerung gezwungen, das Betriebsverhalten des Kessels autonom zu regeln.

Abhängig von der Variabilität seiner Kesselsteuerung und seiner thermischen Trägheit agiert jeder automatisch beschickte Biomassekessel unterschiedlich auf den angeforderten Wärmebedarf. Da die Zündphase, der Lastwechsel und der Ausbrand integrale Bestandteile des Kesselbetriebs nach der Lastzyklus-Methode sind, wird bei der dynamischen Messung das reale Verhalten der Feuerungen in der Praxis nahezu ideal und vollständig abgebildet.

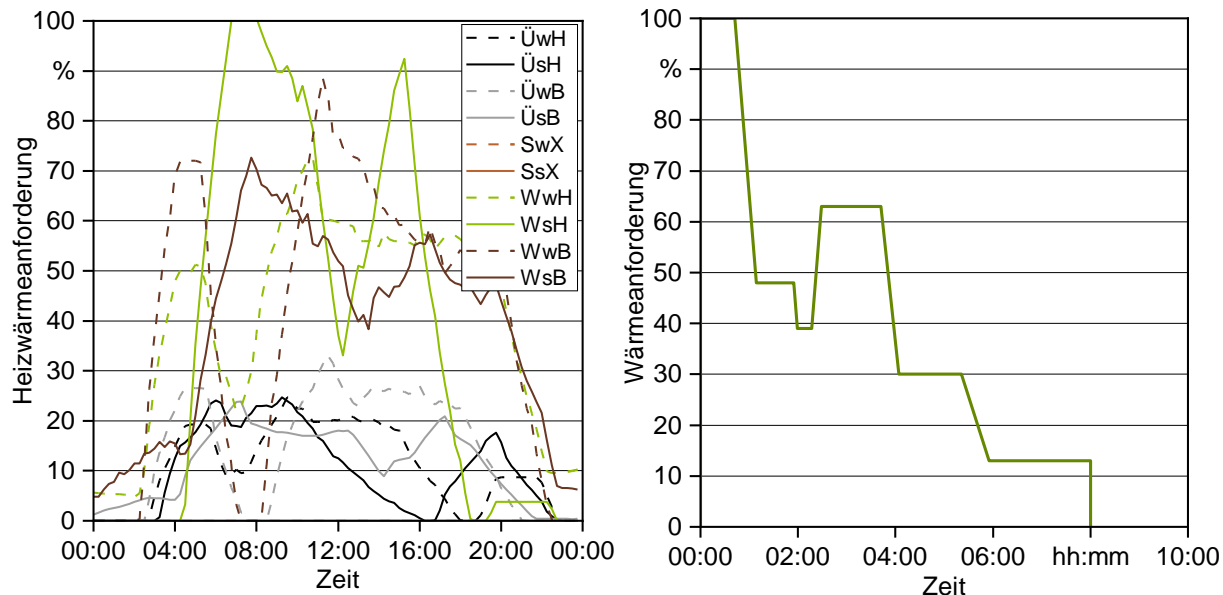


Bild 1: Wärmebedarfskurven nach VDI4655:2019 (links) sowie das daraus proportional abgeleitete Standardlastprofil (rechts). Jahreszeiten: W__ = Winter, Ü__ = Übergang, S__ = Sommer; Wochentag: __w__ = Werktag, __s__ = Sonntag; Wetter: __H = heiter, __B = bewölkt

Wenn alle erforderlichen Phasen berücksichtigt werden, dauert ein Lastzyklus-Versuch weniger als ein Tag (24 Stunden):

- Kalibration der Gasanalysatoren und Einbau der Messtechnik in die Prüfstrecke, Kessel mit ausreichend Brennstoff befüllen: 01:00 bis 02:00 Stunden
- Vor-Temperierung des Kessels: 00:30 Stunden
- Lastprofil („Verbrennungsphase“): 08:00 Stunden
- Abkühl-/Standby-Phase: 12:00 Stunden
- Re-Temperierung des Kessels: 00:30 Stunden

Bei der Definition der Abkühl- bzw. Standby-Phase wurde darauf geachtet, dass es zeitlich möglich ist, alle mit dem Lastzyklus-Versuch verbundenen Tätigkeiten innerhalb der gesetzlichen Arbeitszeit zu erledigen. Die Versuche können somit durchgeführt werden, ohne einzelne Abläufe zu automatisieren (z. B. Timer für Ein- und Abschalten der Umwälzpumpe, Steuerungs-Relais für Ein- und Abschalten der elektrischen Heizung).

Im Vergleich zu den herkömmlichen Messungen im Rahmen einer Typenprüfung stellt die Lastzyklusmethode aber eine fundamentale Änderung der Prüfbedingungen dar; sie ist für feuerungsprüftechnische Einrichtungen eine besondere wissenschaftliche und messtechnische Herausforderung. Das zeigt die nachfolgende Zusammenstellung der mit der Methode vorgegebenen Veränderungen:

Merkmal	Typenprüfungs-Methode	CycleTest-Methode
Kesselleistung	nur stabiler „stationärer“ Lastzustand	realer variabler Lastverlauf des Kesselbetriebs
Kesstemperatur	als stabil angenommen	veränderlich
Abgasvolumenstrom	als konstant angenommen	veränderlich, wird gemessen
Emissionsberechnung	Mittelwert der Konzentration	über Frachten, d.h. Konzentration x Abgasstrom
Messobjekt	Kessel und Verbrennungsregelung	Kessel und Verbrennungsregelung, zusätzlich: Leistungsregelung und Kesselabläufe bzw. -zustände
Kontrollmöglichkeit	Direkter und indirekter Wirkungsgrad (nur Kontrolle der Effizienzbestimmung)	geschlossene Kohlenstoff-Bilanz (zur Kontrolle der Genauigkeit der gemessenen Abgaskonzentrationen, der Massen- und Volumenströme und der Effizienzbestimmung)

Diese Besonderheiten der Prüfbedingungen sind mit speziellen messtechnischen Herausforderungen verbunden:

- Durch die Vorgabe des Standardlastprofils muss der Volumenstrom in der Wärmeleistungsmessstrecke (d. h. im Kreislaufwasser) proportional zur variierenden Wärmebedarfsanforderung variiert werden, wobei die Spreizung konstant zu halten ist. Hierzu muss jedes Prüfinstitut zunächst einen relativ komplizierten Messaufbau mit einem geeigneten Regelkreis entwickeln.
- Die Bestimmung des Abgasvolumenstroms erfordert eine kontinuierliche Messung der Abgasgeschwindigkeit sowie zusätzlich eine kontinuierliche Bestimmung des Feuchtgehalts im Abgas. Beide Messgrößen sind bei konventionellen Prüfungen nicht erforderlich.
- Die Staubprobenahme muss zwingend ununterbrochen und kontinuierlich über den gesamten 8-Stunden-Zyklus erfolgen, unter präziser Einhaltung der Isokinetikanforderung. Hierfür ist eine deutlich über die konventionellen Prüfanforderungen hinausgehende Messgeräteausstattung erforderlich.
- In Lastzyklusmessungen kommt es infolge permanenter Temperaturänderungen zu Dichteänderungen im Kesselwasser. Daher muss der Kessel vor und nach dem Versuch noch einmal auf eine einheitliche Referenztemperatur eingestellt werden, um den Brennstoffverbrauch durch exakte Wiegung feststellen zu können.
- Die Anforderung an eine möglichst geschlossene Kohlenstoffbilanz (d.h. $\pm 5\%$ Toleranz) setzt den Einsatz hochpräziser und sorgfältig kalibrierter Messgeräte voraus.
- Wegen der langen Messdauer ist eine Versuchsbetreuung im Zweischichtbetrieb einzuplanen.

Die Besonderheiten des Messablaufs einer Lastzyklusmessung zeigt Bild 2.

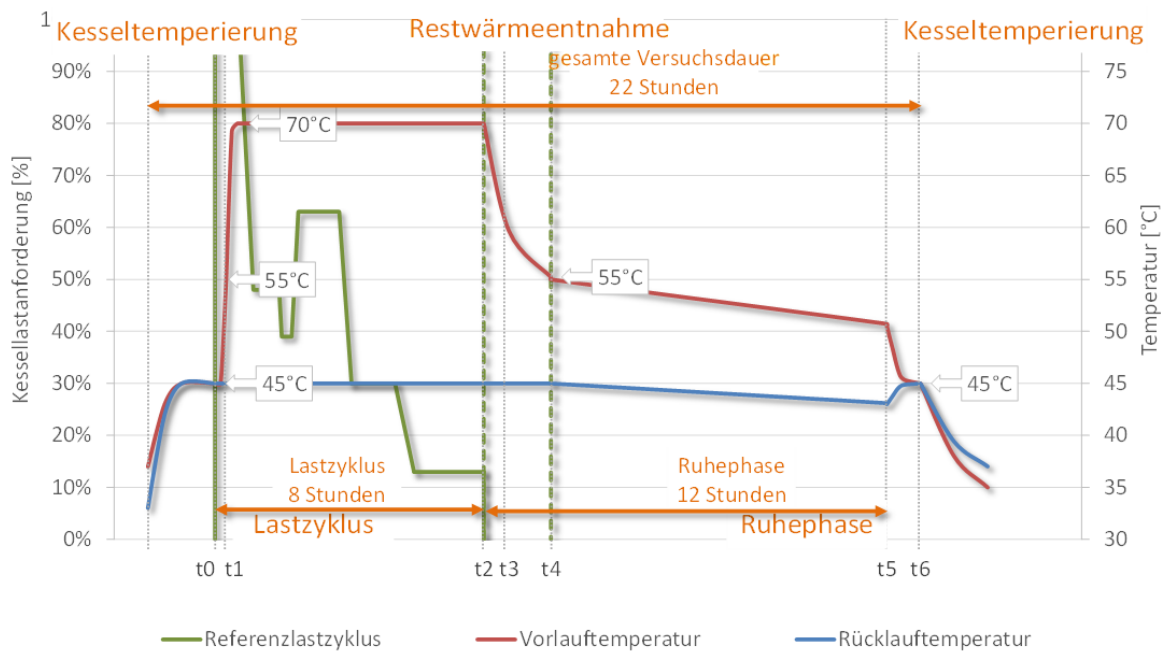


Bild 2: Ablauf einer Lastzyklusmessung an einem automatisch beschickten Holz-Zentralheizungskessel, hier für einen konventionellen Kessel. Bei einem Brennwertkessel werden andere Temperaturniveaus verwendet.

Nachdem im Projekt die vorläufige Lastzyklus-Prüfmethode entwickelt war, erfolgte eine Erprobung der Machbarkeit an diversen Kesseltypen, und es kam zu einer Methodenoptimierung. Außerdem wurden die Anforderungen für den Versuchsaufbau und den Versuchsaufbau im Detail festgelegt. Das beinhaltete u. a. die erforderliche Messtechnik und deren Genauigkeit, Eigenschaften des Prüfbrennstoffes sowie die Entwicklung einer einheitlichen Auswertungsmethode, bei der auch die Qualität der Messdaten anhand unterschiedlicher Kriterien (z. B. Toleranz bei der gemessenen Kohlenstoff-Bilanz) übergeprüft wird. Für eine korrekte Energiebilanz ist es dabei unter anderem wichtig, dass der auf der Plattformwaage stehende Kessel vor dem Start auf eine Referenztemperatur vorgeheizt und nach Abschluss aller Messungen ebenfalls wieder auf die gleiche Referenztemperatur aufgeheizt bzw. abgekühlt wird.

Im Rahmen der Methodenentwicklung wurden von TFZ und Unterauftragnehmer BEST eine Vielzahl von Varianten der Prüfdurchführung erprobt, um letztlich eine ausgereifte Messvorschrift vorstellen zu können. Versuche, die bei BEST stattfanden, zeigten beispielsweise, dass Emissionen beim Betrieb mit Pufferspeicher zwar reduziert werden können, jedoch auch der Nutzungsgrad aufgrund höherer Speicherverluste erkennbar absinkt. Im Rahmen zahlreicher Versuche, die mit einem Pelletkessel durchgeführt wurden, wurden unterschiedliche Parameter variiert. Der Nutzungsgrad betrug zwischen 70 % und 78 % abhängig von Lastzyklus-Varianten, Puffervolumina, Anbindung an Pufferspeicher, Regelung der Wärmeabnahme sowie Dauer der Standby-Phase. Signifikante Änderungen hinsichtlich Nutzungsgrad sind abhängig vom Wärmedämmungsstatus, d. h. von der Effizienzklasse des Pufferspeichers. Das Ladeverhalten von Feuerungen ist abhängig von deren Steuerung bzw. Regler-Logik, und es zeigte sich, dass deren Auswirkungen näher untersucht werden müssen, um vergleichende Aussagen treffen zu können. Daher wurde in AP 3 eine zusätzliche Messserie größtenteils am TFZ durchgeführt, um insbesondere das Speicherladeverhalten unterschiedlicher Feuerungen vergleichen zu können. Hierzu wurden zehn automatisch beschickte Holzheizungskessel einer vollständigen Lastzyklusprüfung jeweils ohne und mit Pufferspeicher unterzogen.

Die Brennstoffverbraucherfassung ist eine der Hauptfehlerquellen bei der Nutzungsgradbestimmung und bei der geforderten Schließung der Kohlenstoffbilanz. Daher wurde festgelegt, dass sie kontinuierlich erfolgen muss, d. h. der Messwert einer Plattformwaage, auf welcher der Kessel bzw. der Brennstoffbehälter jeweils platziert sind, wird laufend aufgezeichnet. Umfangreich geprüfte einfachere Messalternativen, wie die Massenbestimmung von wiederaufgefülltem Brennstoff oder das Zurückwiegen des Restvorrats an Brennstoff, hatten sich in den Erprobungen als nicht ausreichend genau herausgestellt. Sie können allenfalls bei Orientierungsmessungen auf herstellereigenen Prüfständen sinnvoll sein. Zum einen hat sich in den Vorversuchen gezeigt, dass Brennstoffbehälter einiger Feuerungen so konstruiert sind, dass ein gleichmäßiges, wiederholbares Befüllen nicht möglich ist. Zum anderen ist es bei anderen Feuerungen nicht möglich, den nicht verbrannten Brennstoff aus dem Kessel zu entfernen, da Zuführschnecke oder Brennraum nicht zugänglich sind.

Im Rahmen der Methodenentwicklungen durchgeführte weitere Kesselerprobungen zeigten außerdem, dass hinsichtlich des Versuchsaufbaus ein differenziertes Vorgehen erforderlich ist und dass hierbei eine gewisse Flexibilität zulässig sein sollte, je nach Kesselausstattung. Für die Steuerung der Wärmeentnahme ist u.a.

relevant, wie der Versuchsaufbau realisiert wird. Mit den angebotenen hydraulischen Anschlussvarianten sind daher nun unterschiedliche Technologien anwendbar:

- Direkter Anschluss an Wärmeabnahme, wenn eine Rücklaufftemperatur von 45 °C möglich ist bzw. es sich bei der Feuerung um eine Brennwert-Technologie handelt.
- Wenn eine höhere Rücklaufftemperatur erforderlich ist und der Kessel mit einer internen Umwälzpumpe ausgestattet ist, erfolgt ein Anschluss über eine hydraulische Weiche.
- Falls eine höhere Rücklaufftemperatur erforderlich ist, der Kessel jedoch über keine Umwälzpumpe verfügt, wird zusätzlich zur hydraulischen Weiche eine externe Umwälzpumpe sowie ein Mischer in den Versuchsaufbau integriert.

Durch die Einbindung einer hydraulischen Weiche werden Wasser-Massenströme entkoppelt und in zwei Kreisläufe aufgeteilt (Primärkreislauf inkl. Kessel innerhalb der Systemgrenzen, Sekundärkreislauf der Wärmeabnahme). Der Massenstrom des Heizungswassers muss so gewählt werden, dass im Volllastbetrieb eine Temperaturspreizung von 25 K erreicht wird. Der Massenstrom folgt dem gleichen prozentualen Verlauf wie das Lastprofil, d. h. dass die Spreizung von 25 K über die komplette Versuchsdauer eingehalten werden soll. Hierfür sind vor allem der Arbeitsbereich der verwendeten Umwälzpumpe sowie die Ansteuerung des Mixers für die Einstellung der Rücklaufftemperatur relevant. Die Erprobungen hatten gezeigt, dass das Regelungsverhalten von Feuerungen abweicht, wenn der eingestellte Massenstrom zu hoch und in der Folge die Temperaturspreizung zu gering ist. Als Referenztemperatur für Temperierung und Rücklauf wurden 45 °C (Heizwert-Technologien) bzw. 25 °C (Brennwert-Technologien) definiert.

Umfangreiche Methodenerprobungen und Anpassungen fanden auch zu der Frage nach dem Umgang mit Brennwert-Feuerungen statt. Es wurden hierzu 24 Lastzyklus-Versuche mit unterschiedlichem Temperaturniveau (Brennwert- bzw. Heizwertbetrieb) und Versuchsaufbau (mit bzw. ohne hydraulische Weiche, mit bzw. ohne Pufferspeicher) durchgeführt. Darauf basierend wurde festgelegt, dass die Lastzyklus-Prüfung von Brennwertkesseln zwar mit einem unveränderten Lastprofil durchgeführt wird, das Temperaturniveau aber um 20 °C abgesenkt sein soll, um einen kondensierenden Betrieb sicher zu ermöglichen. Beim Versuchsaufbau ist außerdem sicherzustellen, dass zu- oder abfließendes Spülwasser oder das entstehende Kondensat die Quantifizierung des Brennstoff-Inputs (d. h. Massebestimmung über Waage) nicht beeinflusst. Brennwertfeuerungen werden ohne hydraulische Weiche an die Wärmeleistungsmessstrecke angeschlossen.

Auch der Einfluss der verwendeten Prüfbrennstoffqualität wurde in mehreren Versuchsreihen untersucht, überwiegend an den beiden Hackschnitzelkesseln, aber auch an einem Pelletkessel. Darauf basierend wurden die geforderten Eigenschaften der Prüfbrennstoffe (zunächst: Holzpellets) vom DEPI definiert. Bei Pellets wurde der Bereich, der von EN ISO 17225-2 und ENplus vorgegeben wird, zusätzlich eingeschränkt. Beispielsweise wurde sowohl eine obere als auch eine untere Grenze für den Aschegehalt und für die Schüttdichte festgelegt, um sicherzustellen, dass mit den Messungen realitätsnahe Ergebnisse erzielt werden. Außerdem wurde ein Grenzwert für den Kaliumgehalt eingeführt. Bei Holzhackschnitzel traf das DEPI ebenfalls nach Durchsicht der Messergebnisse an den beiden Hackgutkesseln spezielle Festlegungen, die sich zum Teil an der ENplus-Klasse A1 orientieren, z. B. beim Asche- und Feinanteilgehalt. Ansonsten sind aber die Grenzen beim Wassergehalt etwas enger gefasst, und es wurde eine Begrenzung für den Stickstoffgehalt im Brennstoff eingeführt.

Die Schlussversion des gemeinsamen Prüfstandshandbuchs von TFZ und BEST findet sich im Anhang des als Langfassung beigefügten Ergebnisberichts zum Teilvorhaben 2. Das Prüfstandshandbuch ist betitelt mit „Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers – Manual for test stands“. Es wurde ausschließlich in englischer Sprache abgefasst und wird separat für den kostenlosen Download über die Webseiten des TFZ verfügbar gemacht. Es beinhaltet Versuchsaufbau und Durchführung mit Fokus auf Pelletkessel ohne Pufferspeicheranbindung und berücksichtigt unterschiedliche kesselspezifisch benötigte hydraulische Anbindungen (mit und ohne hydraulische Weiche) und Temperaturniveaus. Der prinzipielle Aufbau folgt zwar den relevanten Normen (EN 304, EN 303-5), jedoch gehen die Anforderungen, die an die Prüfumgebung, Messtechnik, Versuchsstandausstattung, Kesselbedienung und Personalbedarf, Brennstoff, Auswertung und Qualitätsmanagement gestellt werden, weit über die genannten Normen hinaus.

Das zur Methode bereitgestellte excelbasierte Auswertetool wurde von Unterauftragnehmer BEST entwickelt und im Verlauf der Methodenentwicklung laufend adaptiert und angepasst. Es berücksichtigt nun weitere Messkanäle (z. B. Förderdruck im Kamin, Umgebungstemperatur) und unterschiedliche hydraulische Konfigurationen (direkter Anschluss oder Einbindung über hydraulische Weiche oder Pufferspeicher). Als Qualitätssicherungsmaßnahme wird außerdem die Qualität der Daten mit Hilfe verschiedener Kontrollberechnungen überprüft, um Plausibilitätslücken aufzudecken.

Arbeitspaket 3: Validierung und Bewertung (TV2)

Die nachfolgenden Ausführungen sind als Zusammenfassung der im beigefügten Berichtsanhang ausführlich dargestellten Ergebnisse aus dem Teilvorhaben 2 aufzufassen.

Erfahrungen aus den Ringversuchsmessungen. Die aus AP 2 entstandene Prüfmethode wurde zur Validierung in den o.g. Ringversuchen erprobt, d. h. zwei Pelletkessel wurden von insgesamt sechs Prüf- und Messeinrichtungen (inkl. TFZ und BEST) nach der neuen ausführlich dokumentierten Messvorschrift (siehe AP 2) gemessen, wobei das jeweils vorgesehene Versuchsprogramm aus je einer stationären Voll- und Teillastmessung gemäß Typenprüfung sowie aus mindestens einem Lastzyklus-Versuch bestand. Ein einheitlicher homogenisierter Versuchsbrennstoff wurde vom TFZ zusammen mit den beiden Prüfkesseln allen Beteiligten zur Verfügung gestellt wurde. Die vollständige Datenauswertung der Ergebnisse wird im beigefügten ausführlichen Ergebnisbericht im externen Anhang dargestellt. Es ergaben sich nicht vernachlässigbare Varianzen der einzelnen Werte (Wirkungsgrad, Emissionen), insbesondere was den Betrieb der Brennwertfeuerung betrifft. In den nachfolgenden Datenüberprüfungen und Plausibilitäts-Checks ließen sich die folgenden möglichen Gründe für die beobachteten Abweichungen zwischen den Einzelmessungen identifizieren:

- Regelung des Förderdrucks im Kamin wurde unterschiedlich realisiert,
- unterschiedliche Temperaturbereiche bei der Leistungsbestimmung wurden gewählt (die Europäische Kesselprüfnorm ermöglicht einen breiten Spielraum an möglichen Temperaturen),
- unterschiedliche Positionierung der Temperaturfühler, Dämmungen etc. (mögliche Wärmeverluste),
- falsche Kesseleinstellungen (um das zu vermeiden, wurden Solltemperaturen vorgegeben, dies wurde jedoch nicht von allen beteiligten externen Prüfständen so umgesetzt wie gewünscht),
- unterschiedliche Messtechnik, Kalibrierung, etc.

Daraufhin wurden die Rahmenbedingungen und Anforderungen, die die Lastzyklusmethode an den durchführenden Prüfstand stellt, nochmals überprüft und angepasst. Es war zuvor festgelegt worden, dass die Abweichung des Kesselwasser-Massenstroms max. 2 % betragen darf und die Abweichung zum Lastprofil bei max. 5 % liegen soll. Beide Kriterien bewerten die Wärmeabnahme des Prüfstands und die Regelungen für Pumpe und Mischer. Diese Kriterien wurden von allen teilnehmenden Partnern eingehalten. Das Soll-Temperatur-Kriterium muss über 60 % der Versuchszeit eingehalten werden, um sicherzugehen, dass die Feuerung auf einem entsprechend hohen Temperaturniveau betrieben wird. Das Minimum beträgt für Brennwertfeuerungen 50 °C und für Heizwertfeuerungen 70 °C. Diese Vorgabe wurde bei allen Lastzyklusversuchen (mit beiden Kesseln an allen Prüfständen) erfüllt. Die Kohlenstoffbilanz stellt den Kohlenstoffeintrag über den zugeführten Brennstoff (Masse wird mit Waage bestimmt, Kohlenstoffgehalt des Brennstoffs geht aus der Laboranalyse hervor) dem Kohlenstoff im Abgas gegenüber. Dieser wird durch den Abgasvolumenstrom und die Konzentration an kohlenstoffhaltigen Komponenten (CO₂, CO, OGC) ermittelt. Hier ist eine maximale Abweichung von 5 % vorgesehen. Die Daten aus dem Ringversuch zeigen, dass diese Vorgabe bei den Versuchen, die mit der Heizwertfeuerung durchgeführt wurden, gut eingehalten werden konnte. Lediglich ein Prüfstand konnte den Wert beim Versuch mit dem Heizwertkessel nicht erfüllen. Im nachgehenden Gespräch konnten mögliche Ursachen identifiziert werden: Zum einen wurde das Flügelrad zur Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit vermutlich falsch kalibriert, und zum anderen erfolgte die Probenahme für die Gasanalyse – entgegen der Methodikvorgabe der Anleitung – in der Messstrecke vor der Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit (anstatt danach).

Beim Betrieb der Brennwertfeuerung stellte sich die Einhaltung der Kohlenstoffbilanzanforderung als große Herausforderung heraus. Einflussgrößen sind einerseits kondensierendes Wasser im kühlen Abgas (< 40 °C), welches die Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit beeinflussen kann (Abhängig vom Messprinzip des verwendeten Gerätes). Eine noch größere Fehlerquelle ist jedoch das Spülwasser, das bei Brennwerttechnologien für die Reinigung des Wärmetauschers erforderlich ist. Durch den Spülvorgang und durch Wasser, das in der Leitung nachläuft, wird der Messwert der Massenbestimmung verfälscht, so dass auf einen fehlerhaften Brennstoffverbrauch geschlossen wird. Die Vorgehensweise beim Versuchsablauf mit Brennwertfeuerungen wurde daher im Prüfstandshandbuch entsprechend beschrieben, um solche Abweichungen auszuschließen. Die Ringschluss-Messungen mit der Brennwertfeuerung wurden beim TFZ insgesamt fünfmal durchgeführt. Die Abweichung bei der Kohlenstoffbilanz betrug durchgehend zwischen 1,0 % und 3,9 % und lag damit durchgehend unter dem geforderten Maximalwert von 5 %.

Beim Vergleich der Ergebnisse aus den Lastzyklus-Versuchen, die in den einzelnen Instituten durchgeführt wurden, stellten die Emissionen (CO, OGC, NO_x, Staub) und der jeweils ermittelte Nutzungsgrad die wichtigsten Vergleichsgrößen dar. Analog zu den Versuchen bei stationärer Wärmeanforderung sind Abweichungen bei den Messergebnissen darauf zurückzuführen, dass die vorgegebene Methodik, wie oben beschrieben, nicht immer eingehalten wurde. Falsche Einstellungen am Kessel (z. B. Soll-Temperatur) oder am Prüfstand (z. B. Soll-Förderdruck) führen zu voneinander abweichenden Ergebnissen. Weitere Fehlerquellen, die im Rahmen der Auswertung und in nachgehenden Gesprächen mit den externen Prüfständen identifiziert wurden, waren z. B. falsch oder gar nicht installierte Messgeräte oder eine Temperierung außerhalb der vorgegebenen Toleranzgrenzen. Hier kann festgehalten werden, dass zumindest ein Teil dieser verursachten Fehler nicht aufgetreten wäre, wenn – wie ursprünglich vorgesehen – eine persönliche Vor-Ort-Begleitung durch MitarbeiterInnen von BEST oder TFZ stattgefunden hätte, was allerdings wegen der COVID19-Pandemie unterbleiben musste.

Die Daten der Ringversuche zeigen aber, dass die im Rahmen des Projektes weiterentwickelte Methode grundsätzlich reproduzierbar ist. Um auswertbare Daten zu erhalten, ist es jedoch erforderlich, die Versuche

exakt nach der vorgegebenen Methode durchzuführen. Die Daten zeigen ebenso, dass selbst mit der gut etablierten aktuellen Kesselprüfmethode nach DIN EN 303-5 (d. h. Vollastmessung und Teillastmessung) unerwartete Messwertschwankungen produziert werden, obwohl zu dieser wenig anspruchsvollen Messprozedur langjährige Erfahrungen bei den beteiligten Prüfständen vorliegen. Zugleich war bei den Ringversuchsmessungen bei stationären Betriebszuständen ein Brennstoffeinfluss durchgehend auszuschließen, denn es wurde auch hierfür der einheitliche, an alle Partner gelieferte homogenisierte Versuchsbrennstoff verwendet. Sämtliche Ergebnisse der Validierung finden sich im beigefügten ausführlichen Ergebnisbericht im externen Anhang.

Datengrundlage für den Anlagenvergleich. Versuchsreihen (Lastzyklus mit und ohne Pufferspeicheranbindung, Voll- und Teillastbetrieb) wurden an insgesamt elf unterschiedlichen Feuerungen durchgeführt, um Ergebnisse für die Datenbank zu gewinnen: acht Pelletfeuerungen, zwei Hackgutfeuerungen, ein Ölkessel. Hierbei handelt es sich um eine direkte Gegenüberstellung von Typenprüfung versus Lastzyklusprüfung.

Erwartungsgemäß zeigen die Daten eine Abhängigkeit von der verwendeten Feuerungstechnologie und der Kesselregelung. Das gilt bei den gemessenen Emissionen wie auch beim Nutzungsgrad. Auffällig ist, dass nicht alle Feuerungen, die beim stationären Betrieb im Rahmen der Typenprüfung ein niedriges Emissionsniveau aufweisen, auch beim dynamischen Lastzyklus-Betrieb ein ähnlich positives Ergebnis erzielen.

Bei den acht Pelletkesseln fallen die Kohlenmonoxidemissionen (CO) erwartungsgemäß unter Nennlastbedingungen am geringsten aus, sie liegen zwischen 4 und 74 mg/MJ. Zum Teil deutlich höhere CO-Emissionen wurden während des Teillastbetriebs bei ca. 30 % Kesselleistung ermittelt. Die höchsten CO-Emissionen traten fast immer im Lastzyklus auf. Das liegt vor allem an der Berücksichtigung des Kesselstarts, der Leistungsveränderung, aber auch an den erforderlichen Neustarts während dieser achtstündigen Messung. Diese Ergebnisse spiegeln das reale Kesselverhalten wider.

Die Staubemissionen waren während des stationären Nennlast- und Teillastbetriebs meist gleich hoch und lagen zwischen 1 und 20 mg/MJ. Während der Lastzyklusmessung wurden aber überwiegend erhöhte Staubemissionen festgestellt, auch bei dem Kessel mit integriertem Staubabscheider (vgl. Ergebnisdarstellung im beigefügten ausführlichen Ergebnisbericht des externen Anhangs).

Bei der Beurteilung der Effizienz, d. h. des Wirkungs- bzw. Nutzungsgrads der Kessel während der verschiedenen Prüfmethode, lag diese erwartungsgemäß bei den drei Brennwertfeuerungen in der Nähe von 100 % bzw. im stationären Betrieb sogar bei über 100 %, bezogen auf den unteren Heizwert des Brennstoffs Pellets. Unter Nennlastbedingungen war die Effizienz im Vergleich zu den anderen Versuchsvarianten fast durchweg am höchsten, bei sehr geringen Unterschieden zur Teillastmessung. Im Lastzyklus zeigten aber viele Kessel einen klaren Abfall der Effizienz im Vergleich zur Nenn- und Teillast, hier war die Energieausbeute um 13 bis 16 Prozentpunkte niedriger. Das entspricht Verhältnissen, wie sie auch aus Feldversuchen bekannt geworden sind. Bei der Darstellung der Ergebnisse aller Versuche, die im beigefügten ausführlichen Ergebnisbericht im externen Anhang dargestellt sind, wird zwischen heizwertbezogenen und brennwertbezogenen Emissionswerten bzw. Effizienzen differenziert.

Vergleicht man die Ergebnisse aus der Lastzyklusmethode, die den Anspruch erhebt, den Lastwechselverlauf eines Jahres repräsentativ abzubilden, mit den Berechnungen zu den Jahresemissionen gemäß Ökodesign-Verordnung, so lässt sich keine Korrelation erkennen. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Ökodesign-Berechnungsmethode wichtigen Betriebsphasen wie Kaltstart, allmähliche Lastwechselphasen sowie die Extremschwachlast komplett ausblendet, weil solche Betriebszustände nicht in den üblichen Messprotokollen einer Typenprüfung enthalten sind. Die Ergebnisse zu diesem Vergleich sind ebenfalls im beigefügten ausführlichen Ergebnisbericht im externen Anhang dargestellt.

Mit jeder Feuerung wurde mindestens auch ein zusätzlicher Lastzyklusversuch mit angebundenem Pufferspeicher durchgeführt. Dadurch wird nun auch eine entsprechende Bewertung über dessen Wirkung möglich. Es zeigt sich, dass mit einigen der untersuchten Feuerungen bei einer variablen Wärmeanforderung auch ohne Pufferspeicher ein niedriges Emissionsniveau erzielt werden kann. Die Kesselsteuerungen dieser Anlagen konnten ihre Leistungs- und Verbrennungsregelung flexibel anpassen, so dass jeweils eine rasche Reaktion auf Änderungen erfolgte. Andere Feuerungen hingegen zeigten im dynamischen Lastbetrieb ein eher träges Verhalten, was speziell beim Lastwechsel und beim Ausbrand zu einer erhöhten Freisetzung von unverbrannten Substanzen (CO, OGC) führte. Zu diesen Anlagen gehörten die untersuchten Hackgutfeuerungen und ein Pelletkessel. Für den Betrieb dieser Anlagen wird aber auch von den jeweiligen Herstellern explizit die Anbindung an einen Pufferspeicher empfohlen. Die Daten des Anlagenvergleichs bestätigen diese Notwendigkeit und zeigen dann eine jeweils wesentlich geringere Freisetzung von CO und OGC beim Betrieb mit Puffer. Alle Daten dieses Vergleichs finden sich im beigefügten ausführlichen Ergebnisbericht im externen Anhang.

Arbeitspaket 4: Entwicklung des Zertifizierungsprogramms (TV1)

Die Herausforderung bei der Entwicklung eines Zertifizierungsprogramms besteht in der Aufgabe, die spezifischen Eigenschaften eines Produktes und seine voraussichtliche Weiterentwicklung sowie die Strukturen der betroffenen Branche zu erfassen. Die gewonnenen Erkenntnisse müssen anschließend bei der Entwicklung des auf anerkannten Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme (z.B. gemäß DIN EN ISO 9001) und Zertifizierungsprogramme (z.B. gemäß DIN EN ISO 17065) beruhenden Zertifizierungshandbuchs berücksichtigt werden. Dabei muss der Aufwand für die (potenziellen) Zertifikatnehmer angepasst sein, andererseits muss Missbrauch durch Zertifikatnehmer und nicht-zertifizierte Unternehmen ausgeschlossen und eine wirkungsvolle Umsetzung des Programms zur Erreichung von dessen Zielen sichergestellt werden. Bislang ist es – anders als bei Holzbrennstoffen – für Holzzentralheizungen nicht gelungen, ein entsprechendes Zertifizierungsprogramm am Markt zu etablieren. Daher gibt es noch kein positives Vorbild, das Kesselherstellern und -nutzern den Wert einer Zertifizierung vor Augen führt.

Die entwickelte Vorlage für ein Zertifizierungshandbuch enthält Regelungen zu allen relevanten Bestandteilen eines Zertifizierungsprogramms:

- Anforderungen an automatisch beschickte Holzkessel;
- Anforderungen an den Zertifikatnehmer;
- Antragsverfahren;
- Verfahren für die Prüfung des Kessels (Lastzyklus);
- Verfahren für die Prüfung des Qualitätsmanagementsystems;
- Verfahren für den Umgang mit Nicht-Konformitäten
- Verfahren für die Konformitätsbewertung (Evaluierung der Prüfungen);
- Verfahren für die Ermittlung der Effizienz-Emissions-Klasse;
- Verfahren für die Erteilung, die Suspendierung und den Entzug des Zertifikats;
- Verfahren für die Ausweitung eines bestehenden Zertifikats;
- Aufbau des Zertifizierungszeichens als zentrales Kommunikationswerkzeug;
- Anforderungen an die Nutzung des Zertifizierungszeichens;
- Anforderungen an Programmbeteiligte (Systemträger, Zertifizierungsstelle, Prüfstellen);
- Ansätze für eine Entgeltordnung.

Im Folgenden werden einige wesentliche Festlegungen vorgestellt, die den Regelungen im Handbuch zugrunde liegen.

Kennzeichnungssystem: Nach umfassenden Diskussionen mit dem Projektpartner TFZ wurde entschieden, keine Grenzwerte für den Wirkungsgrad des Kessels und die relevanten Emissionen (Kohlenmonoxid (CO), organisch gebundener Kohlenstoff (OGC), Stickoxide (NO_x), Gesamtstaub) zu definieren, sondern ein an dem EU-Energielabel für Elektrogeräte orientiertes Kennzeichnungssystem zu etablieren, mit dem der (potenzielle) Nutzer die Effizienz und das Emissionsverhalten verschiedener Kessel vergleichen kann. Dafür werden die Messergebnisse der Lastzyklusprüfung gewichtet und in der Effizienz-Emissions-Klasse (EEK) zusammengeführt.

Die Effizienz-Emissions-Klasse wird wie folgt aus den Prüfergebnissen für den Nutzungsgrad und den relevanten Emissionen hergeleitet. Eine detaillierte Beschreibung der Herleitung findet sich im Zertifizierungshandbuch.

- Die Prüfergebnisse für den Nutzungsgrad und die vier relevanten Emissionsfaktoren werden jeweils durch Klassifizierung (sechs Klassen) in Einzelklassenwerte überführt.
- Die Einzelklassenwerte werden gemäß der Bedeutung der einzelnen Faktoren gewichtet und gehen in die Effizienz-Emissions-Zahl (EEZ) ein. Die Wichtung erfolgte in Absprache mit dem Projektpartner TFZ und dem Unterauftragnehmer BEST. Der Nutzungsgrad geht zu 40 %, die Gesamtstaub-Emissionen zu 30 %, die CO-Konzentration zu 15 %, die NO_x-Emissionen zu 10 % und die OGC-Emissionen zu 5 % und in die Effizienz-Emissions-Zahl ein.
- Die Effizienz-Emissions-Zahl wird in die Effizienz-Emissions-Klasse überführt:

A:	$1 \leq \text{EEZ} < 1,5$
B:	$1,5 \leq \text{EEZ} < 2,5$
C:	$2,5 \leq \text{EEZ} < 3,5$
D:	$3,5 \leq \text{EEZ} < 4,5$
E:	$4,5 \leq \text{EEZ} < 5,5$
F:	$5,5 \leq \text{EEZ} \leq 6$

Effizienz-Emissions-Zahl und Effizienz-Emissions-Klasse werden zusammen mit den wesentlichen Prüfbedingungen (eingesetzter Brennstoff – Pellets oder Hackschnitzel, Betriebsart – Brennwert oder Heizwert, Prüfung mit oder ohne Pufferspeicher) auf dem Zertifizierungszeichen, dem Zertifikat und der Webseite des Systemträgers aufgeführt. Auf dem Zertifikat und der Webseite werden zusätzlich die ausgewiesenen Einzelklassenwerte genannt.

Einbindung Prüfbericht der Typprüfung gemäß DIN EN 303-5: Die Zulassung von automatisch beschickten Holzkesseln für den deutschen Markt erfolgt nach Bestehen einer Typprüfung gemäß DIN EN 303-5. Die Norm enthält neben Anforderungen an die Effizienz und das Emissionsverhalten des Kessels sicherheitsrelevante Vorgaben an wichtige Bauteile. Im Rahmen der Lastzyklusprüfung spielen solche keine Rolle. Um auch diesen Aspekt durch das Zertifizierungsprogramm abzudecken, ist eine erfolgreiche Typprüfung Voraussetzung für die Zertifizierung.

Zertifizierung von Kesseln einer Baureihe: Um die Kosten für die Zertifizierung von Kesseln einer baugleichen Baureihe gering zu halten und damit die Schwelle für die Zertifizierung von Kesseln bei den Herstellern zu senken, müssen nicht alle Kessel der Baureihe gemäß Lastzyklusmethode geprüft werden – genau so, wie es auch bei der Typprüfung gemäß DIN EN 303-5 der Fall ist. Die entsprechende Regelung ist an jene in DIN EN 303-5, Kapitel 5.1.4 (Typprüfung, Absatz 3) angelehnt. In einer Baureihe müssen, jeweils gemessen an der Nennwärmeleistung, mindestens der größte und kleinste Kessel geprüft werden. Wenn das Verhältnis von 2:1 zwischen den gemessenen Kesseln überschritten wird, müssen entsprechend viele Zwischengrößen geprüft werden, dass dieses Verhältnis zwischen der höheren und niedrigeren Nennwärmeleistung nicht überschritten wird. Die Werte für nicht gemessene Kessel innerhalb einer Baureihe müssen durch Interpolation auf Grundlage der Nennwärmeleistung ermittelt werden.

Einbindung von Anbietern von OEM-Produkten: In der Kesselbranche gibt es das Geschäftsmodell des Handels mit OEM (Original Equipment Manufacturer)-Produkten: Kessel eines Herstellers werden durch ein anderes Unternehmen unter seinem eigenen Namen vertrieben. Die Kessel werden dabei entweder leicht modifiziert (z.B. durch Verwendung einer eigenen Steuerung) oder sie werden unverändert angeboten. Um Anbietern von OEM-Produkten die Zertifizierung ihrer Produkte zu ermöglichen, können sie diese zertifizieren lassen, auch wenn sich der Kesselhersteller gegen eine Zertifizierung entscheidet. Falls ein Kessel bereits durch den Hersteller zertifiziert wurde, kann ein Anbieter von OEM-Produkten diese anhand des Prüfberichts der durch den Hersteller veranlassten Prüfung nach Lastzyklusmethode gemäß Prüfstandshandbuch zertifizieren lassen. Voraussetzung dafür ist, dass an den wesentlichen Komponenten (s.u.) nichts geändert wurde. Dadurch können die Kosten für die Zertifizierung geringgehalten werden, was ein schnelles Wachstum des Zertifizierungsprogramms und damit die Verbreitung der Lastzyklusmethode fördert.

Definition von wesentlichen Komponenten: Erhebliche Änderungen an wesentlichen Komponenten führen dazu, dass ein bereits zertifizierter Kessel neu zertifiziert werden muss, weil die Möglichkeit besteht, dass die Änderung sich auf die Effizienz und das Emissionsverhalten auswirkt. Als wesentliche Komponenten im Sinne des Zertifizierungsprogramms wurden definiert:

- die Feuerraumgeometrie;
- der Kesselkörper;
- der externe Brenner (falls vorhanden);
- die Steuerung (nicht die Bedienoberfläche).

Der Zertifikatnehmer muss Änderungen an wesentlichen Komponenten an die Zertifizierungsstelle melden. Diese entscheidet dann zusammen mit der zuständigen Prüfstelle und ggf. einer unabhängigen, kompetenten dritten Stelle, ob eine Neuzertifizierung notwendig ist.

Prüfung der Datenqualität der Lastzyklusprüfung: Die Zertifizierungsstelle kontrolliert im Rahmen der Konformitätsbewertung die Datenqualität der Lastzyklusprüfung anhand verschiedener Leistungsindikatoren (z.B. Kohlenstoffbilanz), für die im Prüfstandshandbuch (TV2) Grenzwerte festgelegt wurden. Dadurch kann die Zertifizierungsstelle beurteilen, ob die Lastzyklusprüfung ordnungsgemäß durchgeführt wurde.

Fokus auf Serviceleistungen und technische Dokumentation: Bei den Anforderungen an das Qualitätsmanagementsystem des Zertifikatnehmers liegt ein Fokus auf den angebotenen Serviceleistungen (z.B. hinsichtlich des Angebots von Schulungen und technischem Support) sowie den Inhalten der bereitzustellenden Dokumentation (Montageanleitung und Bedienungsanleitung). Dadurch soll ein möglichst effizienter und

emissionsarmer Betrieb von installierten Kesseln sichergestellt werden, die bei der Lastzyklusprüfung gut abgeschnitten haben.

Zertifizierungszeichen: Mit dem Zertifizierungszeichen kann der Zertifikatnehmer den Status des jeweiligen Kessels kommunizieren. Das Zeichen enthält alle Informationen, die der Kunde braucht, um den Kessel mit anderen zertifizierten Kesseln zu vergleichen:

- das Zertifizierungslogo mit der Adresse der Zertifizierungswebseite, auf der weitergehende Informationen zu finden sind;
- den Namen des Zertifikatnehmers;
- den Namen und die Nennleistung des zertifizierten Kessels;
- die Effizienz-Emissions-Klasse sowie die Effizienz-Emissions-Zahl, die dem potentiellen Nutzer eine schnelle Einordnung des Kessels ermöglichen;
- die wesentlichen Prüfbedingungen (eingesetzter Brennstoff – Pellets oder Hackschnitzel, Betriebsart – Brennwert oder Heizwert, Prüfung mit oder ohne Pufferspeicher);
- das Ausstellungsdatum des zugrundeliegenden Zertifikats
- die Zertifizierungs-ID des Kessels.

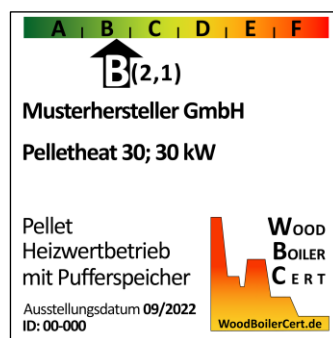


Bild 3: Zertifizierungszeichen (Beispiel)

Arbeitspaket 5: Implementierung der Ergebnisse am Markt (TV1)

Wie unter I.2 beschrieben, wurde dem mit dem Projektpartner TFZ abgesprochenen Antrag des DEPI auf Streichung von AP 5 durch die FNR mit Beschluss vom 29.03.2022 stattgegeben. Die im Rahmen des Arbeitspaketes vorgesehene Verbreitung der wissenschaftlichen Ergebnisse des Projektes (siehe II.4) wurde durch das TFZ alternativ organisiert – mit dem Hinweis auf die Projektförderung durch die FNR.

2. Verwertung

a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen

Es gehen keine Erfindungen oder Schutzrechte aus dem Projekt hervor.

b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Möglichkeit besteht, dass das entwickelte Zertifizierungsprogramm von der Branche nicht angenommen wird und es nicht zu einer Markteinführung kommt. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass dies durch ein umfassendes Informationsmanagement verhindert werden kann. Erfahrungen aus der Einführung des ENplus-Zertifizierungsprogramms für Holzpellets haben gezeigt, dass eine positive Entwicklung zu beobachten ist, sobald das Programm in der Branche bekannt ist und eine kritische Anzahl an Produkten verschiedener Unternehmen zertifiziert wurde. Hierbei dürfte es sich als hilfreich erweisen, dass bereits eine kleinere Anzahl an etablierten Herstellern während der Phase der Methodenentwicklung beteiligt war (z. B. als Ausschussmitglieder oder durch Überlassung von Prüfkesseln) und dabei Vertrauen in die Anwendbarkeit der Methode und in die Aussagefähigkeit der Ergebnisse gewonnen hat.

Darüber hinaus ist geplant, weitere relevante Unternehmen durch persönliche Ansprache sowie durch entsprechende Öffentlichkeitsarbeit zu erreichen. Insofern werden die mittelfristigen wirtschaftlichen Erfolgsaussichten als gut eingeschätzt. Der Mangel an Messergebnissen aus alltagstauglichen Prüfabläufen zur Beurteilung von Anlagenkomponenten wird häufig – beispielsweise in den Evaluierungsergebnissen zum Marktanreizprogramm für Erneuerbare Energien (MAP) bzw. der Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) – beklagt. Die Zertifizierung könnte Abhilfe leisten und dadurch zusätzlich an Bedeutung gewinnen.

Die neue Methodik für die Zyklusmessung und das darauf aufbauende Zertifizierungsprogramm bieten die Chance, dass das Verfahren allgemein anerkannt wird und sich bei der Bewertung der Effizienz sowie des Emissionsverhaltens von Holzkesseln durchsetzt.

c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Durchführbarkeit einer Lastzyklusmessung mit guter Wiederholbarkeit und ausreichender Reproduzierbarkeit wurde im Projekt unter Beweis gestellt. Dabei wurde auch gezeigt, dass externe Forschungspartner und akkreditierte Normprüfstellen die technischen Vorgaben einer Lastprüfung umsetzen können. Dieser Nachweis sowie die Tatsache, dass die Methode in einem ausführlichen Prüfstandshandbuch äußerst detailliert dargestellt und erläutert wird, lassen weitere Anwendungen erwarten. Weil das Prüfstandshandbuch ausschließlich in englischer Sprache verfasst wurde, ist es sehr wahrscheinlich, dass die Anwendung der Methode auch im erweiterten Ausland erfolgt, neben den drei bereits involvierten internationalen Validierungspartnern aus Österreich und Dänemark. Das bedeutet, dass neben dem möglichen Zertifikatgeber DEPI auch ein Aufgreifen der Prüfmethodik im Europäischen Kontext möglich erscheint, z. B. durch ein Zertifizierungsgremium oder ein Normungskomitee. TFZ und BEST, als technische Entwickler der Prüfvorschrift, werden auch nach Projektende an der Verbreitung der Methode und den damit erreichten Messergebnissen mitwirken und die neuen Möglichkeiten in vielerlei Diskussionen und Arbeitsgruppen einbringen, die sich im Rahmen ihrer Mitgliedschaft in diversen Normungs- und Beratungsgremien ergeben.

Auch im nationalen Bereich sind normative Folgeaktivitäten möglich. Zu den hierzulande tätigen Normungskomitees zählt die VDI-Kommission zur Reinhaltung der Luft (KRdL), die für den Fall, dass die Methode keinen Anschlussnutzen hätte, die Erarbeitung einer nationalen VDI-Richtlinie auf Basis des Prüfstandshandbuchs in Erwägung zieht. Mit diesem VDI-Gremium wurde bereits Kontakt aufgenommen.

d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Der Wärmeertrag im Verhältnis zum Brennstoffeinsatz über die gesamte Zyklusdauer kann als Nutzungsgrad interpretiert werden. Dieser Wert stellt eine realistische Alternative zu der aktuellen Berechnungsformel für den „Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad“ gemäß Ökodesign-Richtlinie dar. Da die Sinnfälligkeit dieses rein auf Berechnungen basierenden Vorgehens durch die Ergebnisse des aktuellen Vorhabens stark in Frage gestellt wird, besteht die Erwartung, dass die hier vorgestellte Real-Prüfmethode, die die Verhältnisse realistischer abbildet, ggf. eines Tages als Grundlage für die Definition entsprechender europäischer Anforderungen herangezogen wird. Das Gleiche gilt für die sogenannte „Raumheizungs-Jahres-Emission“ der Ökodesign-Richtlinie, die ebenfalls aus den Voll- und Teillastmesswerten einer regulären Typenprüfung errechnet wird. Diese beiden Parameter der Ökodesign-Richtlinie sind weit davon entfernt, als Emissionsfaktor bzw. Jahresnutzungsgrad aufgefasst zu werden. Sie sind somit ungeeignet für die Bewertung von Anlagenkategorien im Rahmen der luftreinhaltungsbezogenen Meldepflichten der Bundesrepublik Deutschland.

Mit der neuen Methode jedoch könnte der über den gesamten Zyklus gemessene und aggregierte Schadstoffausstoß (Staub, CO, OGC, NO_x) als Emissionsfaktor direkt ermittelt werden, ohne dass dazu aufwändige Feldversuche durchgeführt werden müssten. Entsprechend kann die hierbei verwendete Lastzyklusmethode den Einstieg in eine direkte versuchstechnische Nutzungsgrad- bzw. Emissionsfaktorenbestimmung für Zentralheizungskessel ermöglichen, z. B. im Auftrag einer Behörde wie das Umweltbundesamt. Eine weitere wirtschaftlich bedeutsame Anwendung der neuen Methode könnte die Qualifizierung solcher Heizungsanlagen sein, die in den Genuss einer öffentlichen Unterstützung über staatliche Förderprogramme kommen möchten, weil sie sich in den Messungen als besonders umweltfreundlich erwiesen haben und in der alltagsähnlichen Betriebsweise des Lastzyklus auch eine höhere Energieeffizienz nachweisen können.

Der Aufbau des Prüfstands zur Durchführung einer Lastzyklusmessung wurde eng an dem Prüfstand der Typprüfung orientiert, so dass die Investitionen und Kosten für die Prüfstellen, aber auch der interessierten Kesselhersteller so gering wie möglich ausfallen. Dies ermöglicht zudem die Umsetzung und Durchführung der Lastzyklusmethode auf den betriebseigenen Prüfständen der Kesselhersteller. Eine Optimierung und Weiterentwicklung der Kessel kann somit durchgeführt werden.

Die entwickelte Methode hat unter Beweis gestellt, dass neben Holzzentralheizungen auch andere Kesseltypen, wie Ölkessel realitätsnäher gemessen werden können.

Die entwickelte Methode erhebt den Anspruch, ein realitätsnahes Abbild eines Alltagsbetriebes von automatisch beschickten Kesseln darzustellen. Inwieweit mit ihr auch aussagefähige Prüfergebnisse an chargenweise betriebenen Scheitholz-Zentralheizungen generiert werden können, bleibt derzeit noch offen. Derartige Kessel werden stets mit einem relativ großen Wärmespeicher betrieben, so dass die in der Methode festgelegten Lastschwankungen weniger stark ins Gewicht fallen dürften. Dennoch erscheint eine Lastzyklusmessung mit angeschlossenem Pufferspeicher ebenfalls gut geeignet für die Feststellung von Emissionsfaktoren und von Nutzungsgraden, weil damit die realen Verhältnisse im Feld ebenso nachgestellt werden. Allerdings müssen die Rahmenbedingungen für einen Versuchsablauf mit Scheitholzkesseln noch speziell erarbeitet werden.

Aufgrund der Einschätzung, dass aktuell bei den Kesselherstellern keine nennenswerte Nachfrage besteht, hat das DEPI beschlossen, das entwickelte Zertifizierungsprogramm derzeit nicht an den Markt zu bringen.

An der Sinnhaftigkeit einer solchen Zertifizierung und an ihrem Nutzen für die Holzenergiebranche gibt es aber bei den Projektpartnern keinen Zweifel. Daher wird das DEPI weiterhin für die Einführung des entwickelten o werben.

Wenn sich in der Kesselbranche ein wachsendes Interesse abzeichnet und Unternehmen ihre Bereitschaft zur Zertifizierung ihrer Produkte erklären, wird eine breite Implementierung angestrebt, in Form einer Informationsoffensive bei Verbrauchern, Planern, Installateuren, Energieagenturen und Fördermittelgebern. Ziel wird dann sein, Aufmerksamkeit auf die Lastzyklusmethode und das Zertifizierungsprogramm sowie den technischen Hintergrund zu generieren und die im Vergleich zu aktuellen Typprüfmethode höhere Aussagekraft zu bewerben.

Anhand von Änderungen gesetzlicher Vorschriften und Praxiserfahrungen sowie technologischen Fortschritts muss eine regelmäßige Evaluierung und Anpassung des Zertifizierungssystems stattfinden. Dadurch bleibt eine zeitgemäße Bewertung von Holzzentralheizungen gewährleistet.

Für den wirtschaftlichen Erfolg ist es weiterhin sinnvoll, die Datenbank von nach Lastzyklusmethode geprüften Kesseln zu erweitern und zu pflegen. Neben Daten für Pelletkessel sollten weiterhin Daten für Hackschnitzelkessel gesammelt werden. Auch die Aufnahme von Pelletkaminöfen mit Wassertasche in das Zertifizierungsprogramm ist möglich, da diese mit wenigen Anpassungen für den vorgesehenen Prüfstand geeignet sind.

Die Kohlenstoffbilanzierung (C-Bilanz) hat sich als sehr gut geeigneten Indikator zur Bewertung der Qualität und Glaubwürdigkeit von emissionsbezogenen Messdaten erwiesen.

3. Erkenntnisse von Dritten

Soweit bekannt, sind während der Projektlaufzeit keine verwertbaren Erkenntnisse von Dritten entstanden.

4. Veröffentlichungen

Bereits verfügbare Publikationen und Vorträge zum Projekt:

Feldmeier, S.; Schwarz, M. (2021): Kesselverhalten bei variierender Leistungsanforderung - die CycleTest-Methode. Vortrag auf dem Workshop „24. Arbeitskreis Holzfeuerungen“ des Technologie- und Förderzentrums (TFZ), 9. Juni 2021, Tagungsunterlagen zur Onlineveranstaltung.

Schwarz, M.; Feldmeier, S.; Hartmann, H. (2022): Kesselverhalten bei variierender Leistungsanforderung - die CycleTest-Methode. Vortrag auf der Europäischen Pelletskonferenz in Wels/Österreich, am 6. April 2022.

Feldmeier, S.; Schön, C.; Hartmann, H.; Schwarz, M.; Roßmann, P. (2022): Real-Life performance of automatically stoked biomass boilers - validation of a standard load-cycle test method through round robin. In: P.-F. Chevet, N. Scarlat und A. Grassi (Hg.): Setting the course for a biobased economy. Papers of the 30th European Biomass Conference. Extracted from the Proceedings of the International Conference held online, 9-12 May. Florence, Italy: ETA-Florence Renewable Energies; Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), S. 539–543.

Feldmeier, S.; Schön, C.; Schwarz, M.; Hartmann, H.; Roßmann, P. (2022): Kesselverhalten bei variierender Leistungsanforderung und mit Wärmespeichern - Vorläufige Ergebnisse. Vortrag auf dem Workshop „25. Arbeitskreis Holzfeuerungen“ des Technologie- und Förderzentrums (TFZ), 18. Mai 2022, Tagungsunterlagen zur Onlineveranstaltung.

Feldmeier, S.; Schön, C.; Hartmann, H. (2022): Reale Emissionen aus Pelletkesseln – Die Lastzyklus-Methode. Schule und Beratung (11-12), 35-38, ISSN: 0941-360X

Noch vorgesehene Publikationen bzw. geplanter Wissenstransfer:

- Es erfolgt eine Veröffentlichung der Arbeiten im TV2 in der Schriftenreihe „Berichte aus dem TFZ“. Hierzu wurde der fachliche Endbericht (siehe Anhang) bereits in dem entsprechenden Layout der Schriftenreihe erstellt. Der Bericht wird über einen breiten Verteiler in den Umlauf gebracht. Unter den Empfängern finden sich auch die für die Umsetzung der Ergebnisse wichtigen Industrievertreter und Wissenschaftspartner. Der Bericht wird voraussichtlich den folgenden Titel tragen: „Bestimmung der Realemissionen und des Nutzungsgrads von kleinen automatisch beschickten Holz-Zentralheizungskesseln mittels Standardlastzyklusprüfung – Methodenentwicklung und Ergebnisse einer Serienprüfung“.
- Die Schlussversion des ausführlichen gemeinsamen Prüfstandshandbuchs von TFZ und BEST wird unter dem Titel „Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers – Manual for test stands“ für den kostenlosen Internetdownload über die Webseiten des TFZ verfügbar gemacht. Es ist ausschließlich in englischer Sprache abgefasst, damit keine Barrieren für ein internationales Aufgreifen der dargelegten Prüfgrundlagen bestehen.

- Central European Biomass Conference (CEBC) in Graz, Januar 2023: Angenommener Posterbeitrag: *Real-life performance of automatically stoked biomass boilers – comparison of type test results and real-life operation in combination with a buffer tank.*
- Die Aufbereitung ausgewählter Ergebnisse als peer-reviewte open-access Publikationen in der internationalen Fachpresse (z. B. Biomass Conversion and Biorefinery) ist in Planung.
- Die Ergebnisse fließen außerdem in das allgemeine Beratungsangebot des TFZ mit ein, z. B. über die TFZ-Abteilung „Wissenstransfer“ oder über die Dauerausstellung „Wärmegewinnung aus Biomasse“ und die zugehörigen Veranstaltungen.
- Die Ergebnisse der Messungen an der Vielzahl von Holzheizkesseln wurden vom Umweltbundesamt (UBA) angefragt, damit sie in die Festlegung von Emissionsfaktoren zur Berechnung der holzbezogenen Emissionsfrachten mit einfließen können und so zur Erfüllung der luftreinhaltungsbezogenen Meldepflichten der Bundesrepublik Deutschland beizutragen können.
- Die Ergebnisse zu Teilvorhaben 2 werden nach Abschluss des Projekts auf der TFZ-Webseite in geeigneter Form veröffentlicht bzw. werden vorhandene freigegebene Publikationen dort auf der Projektseite zum kostenlosen Download verfügbar gemacht.

ANHANG

- Detaillierter Abschlussbericht zum Projekt „Cycletest“

Teilvorhaben 1: Koordination und Vorbereitung der Marktumsetzung (DEPI)

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziele des Teilvorhaben 1 war es die Gesamtkoordination des Projekts im Rahmen des Arbeitspakets 1 zu übernehmen.

Mit Erreichen der Ziele aus Teilvorhaben 2 konnte mit der Entwicklung einer Vorlage eines Zertifizierungshandbuchs für automatisch beschickte Holzzentralheizungen im Teilvorhaben 1 durchgeführt werden. Die Ausarbeitungen und Prozeduren des Zertifizierungsprogramms beruhen auf der in Teilvorhaben 2 entwickelten Lastzyklusmethode zur Ermittlung von realitätsnahen Daten zur Effizienz und zum Emissionsverhalten. Potenzielle Kunden von automatisch beschickten Holzzentralheizungen sollen somit transparent zwischen den verschiedenen Anlagen vergleichen können. Diese Vergleichbarkeit wird durch ein Kennzeichnungssystem im Rahmen des Zertifizierungsprogramms visuell auf einem Zertifizierungszeichen und auf der Webseite des Systemträgers veranschaulicht.

In der zu entwickelnden Vorlage des Zertifizierungshandbuchs sollten folgende Regelungen zu allen relevanten Bestandteilen enthalten sein:

- Anforderungen an automatisch beschickte Holzkessel;
- Anforderungen an den Zertifikatnehmer;
- Antragsverfahren;
- Verfahren für die Prüfung des Kessels (Lastzyklus);
- Verfahren für die Prüfung des Qualitätsmanagementsystems;
- Verfahren für den Umgang mit Nicht-Konformitäten
- Verfahren für die Konformitätsbewertung (Evaluierung der Prüfungen);
- Verfahren für die Ermittlung der Effizienz-Emissions-Klasse;
- Verfahren für die Erteilung, die Suspendierung und den Entzug des Zertifikats;
- Verfahren für die Ausweitung eines bestehenden Zertifikats;
- Aufbau des Zertifizierungszeichens als zentralem Kommunikationswerkzeug;
- Anforderungen an die Nutzung des Zertifizierungszeichens;
- Anforderungen an Programmbeteiligte (Systemträger, Zertifizierungsstelle, Prüfstellen);
- Ansätze für eine Entgeltordnung.

2. Bearbeitete Arbeitspakete

Arbeitspaket 1: Management und Projektkoordination

Die Aktivitäten zu diesem AP werden im Abschnitt II dieses Berichts ausführlich dargestellt.

Arbeitspaket 4: Entwicklung des Zertifizierungsprogramms

Die Aktivitäten zu diesem AP werden im Abschnitt II dieses Berichts ausführlich zusammengefasst, die daraus resultierende Vorlage für ein Handbuch für die Zertifizierung von automatisch beschickten Holzzentralheizungen findet sich im Anhang.

Arbeitspaket 5: Implementierung der Ergebnisse am Markt

Das Arbeitspaket wurde in Absprache mit dem Projektpartner TFZ und der FNR gestrichen. Eine detaillierte Darstellung findet sich in Abschnitt I.2 (Planung und Ablauf des Vorhabens).

3. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die erarbeitete Vorlage für ein Handbuch für die Zertifizierung von automatisch beschickten Holzzentralheizungen findet sich im Anhang dargestellt. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse findet sich in Abschnitt II.

Teilvorhaben 2: Entwicklung, theoretische und experimentelle Untersuchungen (TFZ)

1. Ziel und Gegenstand des Teilvorhabens

Ziel des Teilvorhaben 2 war die Entwicklung und Validierung einer praxisnahen Prüfmethode zur Beurteilung der Effizienz und des Emissionsverhaltens von Holzzentralheizungen im Realbetrieb. Die Methode basiert auf einem Lastzyklus für eine Prüfstandsmessung, der den Lastverlauf eines Kessels über das Jahr hinweg proportional und praxisnah abbildet. Dadurch wird, anders als bei Anwendung der in der DIN EN 303-5 definierten Methode für die Typenprüfung, eine realitätsnahe Bewertung eines Kessels ermöglicht.

In dem zu entwickelnden Prüfhandbuch sollten neben dem definierten Lastzyklus eine einheitliche Mess- und Auswertungsmethodik sowie die zu verwendenden Prüfbrennstoffe festgelegt werden, um die Vergleichbarkeit der Messungen sicherzustellen. In einem zweiten Schritt sollte die neue Prüfmethode in einem Ringversuch durch erfahrene Institute im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit und die Reproduzierbarkeit bewertet und gegebenenfalls angepasst werden. Die neu entwickelte Prüfmethode sollte als Grundlage für ein Zertifizierungsprogramm für Holzzentralheizungen dienen. Das Programm sollte es den Herstellern hochwertiger Holzkessel ermöglichen, die Effizienz und das auch im Realbetrieb gegebene Emissionsverhalten ihrer Produkte nachzuweisen. Mit den Ergebnissen solcher Messungen würden Planer, Installateure, Energieagenturen und Fördermittelgeber die Möglichkeit erhalten, verschiedene Kessel realitätsnah zu bewerten und besonders fortschrittliche Technologien zu identifizieren und hervorzuheben. Anlagenherstellern sollte außerdem eine Methode für ihre Werksprüfstände gegeben werden, nach der sie die Bewertung ihrer Anlagen in einer realen Wärmeversorgungssituation prüfen und optimieren könnten, z. B. indem sie die Kesselsteuerung und -regelung an die Betriebsbedingungen eines permanent wechselnden Wärmebedarfs anpassen.

Das Erreichen dieses Methodenentwicklungsziels ist die Voraussetzung dafür, dass ein Zertifizierungsprogramm für automatisch beschickte Pellet- und Hackschnitzelkessel entwickelt werden kann (siehe Teilvorhaben 1). Durch Messungen an einer Vielzahl von automatisch beschickten Zentralheizungsanlagen sollte zugleich eine ausreichende Datenbasis erarbeitet werden, die den Stand der Technik unter den hier definierten, besonderen Prüfbedingungen charakterisiert.

Generell sollte mit der neuen Methode auch der wachsenden Kritik an der geringen Aussagefähigkeit der bisherigen Typenprüfmethode begegnet werden. Es wird erwartet, dass diese Kritik zunehmen wird, weil seit 2020 mit der Ökodesign-Richtlinie die vorgegebenen Berechnungsmethoden für den "Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad" sowie für die "Raumheizungs-Jahres-Emissionen" Anwendung finden, wodurch die Wirklichkeit weiter verzerrt wird. Derartigen Hemmnissen soll das Projekt vorbeugen und gleichzeitig eine international umsetzbare Real-Messmethode als Alternative auch für normative Zwecke anbieten.

Arbeitspaket 1: Management und Projektkoordination (Beteiligung TFZ, Koordination DEPI)

Die Aktivitäten zu diesem AP werden im Berichtsteil zu Teilvorhaben 1 ausführlich dargestellt.

Arbeitspaket 2: Entwicklung einer Methodik für die Prüfstandsversuche (Koordination TFZ)

Die Aktivitäten zu diesem AP werden im Abschnitt II dieses Berichts ausführlich zusammengefasst und im Anhang mit vollständigen Ergebnissen dargestellt. Im gleichen Anhang (letzter Abschnitt) findet sich ebenfalls das erarbeitete Prüfstandshandbuch in englischer Sprache.

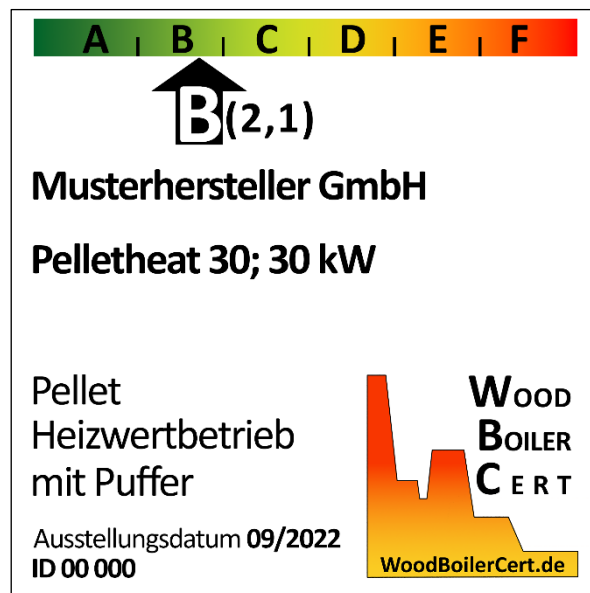
Arbeitspaket 3: Validierung und Bewertung

Die Aktivitäten zu diesem AP werden im Abschnitt II dieses Berichts ausführlich zusammengefasst und im Anhang mit vollständigen Ergebnissen dargestellt.

2. Wesentliche Ergebnisse des Teilvorhabens

Die vollständigen Ergebnisse und das erarbeitete Prüfstandshandbuch werden im Anhang dargestellt. Eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse findet sich auch in Abschnitt II dieses Berichts.

WoodBoilerCert



Handbuch für die Zertifizierung von automatisch beschickten Holzzentralheizungen

Version 1.0

September 2022

Herausgeber: Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI)

Neustädtische Kirchstraße 8
10117 Berlin

Tel.: 030 6881599-55

Fax: 030 6881599-77

E-Mail: info@depi.de

Internet: www.depi.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit den Mitteln des *Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft* unter dem Förderkennzeichen 22039118 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

Inhalt

1	Hintergrund	5
2	Normative Verweise	6
3	Begriffsdefinitionen	7
4	Abkürzungsverzeichnis	10
5	Anforderungen	11
5.1	<i>Anforderungen an automatisch beschickte Holzzentralheizungen</i>	11
5.1.1	Prüfung gemäß DIN EN 303-5	11
5.1.2	Prüfung gemäß Lastzyklusmethode	11
5.2	<i>Anforderungen an Zertifikatnehmer</i>	11
5.2.1	Montageanleitung für Fachpersonal	11
5.2.2	Bedienungsanleitung für Verbraucher	12
5.2.3	Dienstleistungen	13
5.2.4	Darstellung der Effizienz-Emissions-Klasse	13
5.2.5	Dokumentation	14
5.2.6	Meldepflichten	14
6	Zertifizierungsverfahren	15
6.1	<i>Allgemeine Anforderungen</i>	15
6.2	<i>Kesselprüfung nach Lastzyklusmethode</i>	16
6.3	<i>Zertifizierungsantrag</i>	17
6.4	<i>Dokumentenprüfung</i>	19
6.5	<i>Konformitätsbewertung</i>	19
6.6	<i>Ausweisung der Effizienz-Emissions-Klasse</i>	21
6.7	<i>Zertifikat</i>	22
6.8	<i>Aufnahme weiterer Kessel in eine Reihe bereits zertifizierter Kessel einer Baureihe</i>	23
6.9	<i>Neuzertifizierung</i>	24
6.10	<i>Rezertifizierung</i>	26
7	Zertifizierungslogo, Zertifizierungszeichen und Zeichennutzung	28
7.1	<i>Zertifizierungslogo</i>	28
7.2	<i>Zertifizierungszeichen</i>	29
8	Systembeteiligte – Aufgaben und Anforderungen	31
8.1	<i>Systemträger</i>	31
8.1.1	Aufgaben	31
8.1.2	Anforderungen	32
8.2	<i>Zertifizierungsstelle</i>	32
8.2.1	Aufgaben	32
8.2.2	Anforderungen	33
8.3	<i>Prüfstellen</i>	34
8.3.1	Aufgaben	34
8.3.2	Anforderungen	34
9	Entgeltordnung – beim Antragsteller/Zertifikatnehmer anfallende Kosten	35
9.1	<i>Prüfkosten</i>	35

9.2	Zertifizierungspauschale	35
9.3	Lizenzgebühr	35
Anhang A	36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zertifizierungslogo	28
Abbildung 2: Zertifizierungszeichen (Beispiel)	29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Elemente des Zertifizierungszeichens	30
Tabelle 2: Bewertungsmatrix für die Bestimmung der Effizienz-Emissions-Zahl, heizwertbezogen	36

1 Hintergrund

Moderne Pellet- und Hackschnitzelfeuerungen sind ausgereifte Produkte, die auf einen hochwertigen, homogenen Brennstoff angewiesen sind. Holz als CO₂-neutraler Brennstoff aus heimischer Produktion liefert beste Voraussetzungen für die Energiewende am Wärmemarkt.

Die aktuell angewandten Verfahren zur Bewertung von Effizienz und Emissionen von Holzfeuerungen stützen sich auf Messergebnisse im stationären Betrieb. Gerade im häuslichen Bereich sinkt der Wärmebedarf durch immer strengere gesetzliche Vorgaben an die Wärmedämmung stetig. Dies verringert folglich die Auslastung der Heizungssysteme und fordert eine modulare Betriebsweise, welche bisherige Prüfmethode nicht berücksichtigen. Auf dem Prüfstand kann das Heizsystem die Leistungsfähigkeit bei realistischem Zyklusbetrieb nicht unter Beweis stellen.

In Zusammenarbeit mit dem Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ) und der Bioenergy and Sustainable Technologies GmbH (BEST) wurde in einem Förderprojekt des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) unter der Projektträgerschaft der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) ein Prüfstandshandbuch sowie Ansätze für das darauf aufbauende Zertifizierungshandbuch entwickelt.

Im Ergebnis sollen die Effizienz und Emissionen von automatisch beschickten Holzzentralheizungen realitätsnaher abgebildet werden, als es im stationären Messverfahren der Typprüfung nach DIN EN 303-5 der Fall ist. Dazu wurde die sogenannte Lastzyklusmethode erarbeitet, die mehrere Betriebspunkte dynamisch in einem Messintervall untersucht und so den tatsächlichen Betrieb einer Feuerung genauer widerspiegeln kann. Durch das neuartige Messverfahren können praxisnahe Werte für Effizienz und Emissionen ermittelt werden, die es differenziert mit den bekannten Grenzwerten der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen (1. BImSchV) oder der Ökodesign-Verordnung (EU) 2015/1189 zu bewerten gilt.

Das Zertifizierungshandbuch legt die Anforderungen an die zu zertifizierenden Kessel sowie ihrer Hersteller fest und beschreibt detailliert den Ablauf der Zertifizierung. Mithilfe der für jeden zertifizierten Kessel ausgewiesenen Effizienz-Emissions-Klasse können potenzielle Nutzer schnell eine Kaufentscheidung treffen, da sie auf praxisnahen Prüfergebnissen sowie deren energetischer und ökologischer Bewertung aufbaut.

2 Normative Verweise

Bei aktuellerer Version von Normen, Handbüchern oder Verordnungen wird weiterhin die hier zitierte als relevant herangezogen, solange nicht gegen geltendes Recht verstoßen wird. Die aktuellere Fassung wird bei der nächsten Überarbeitung des Handbuchs für die Zertifizierung von automatisch beschickten Holzzentralheizungen eingepflegt.

- DIN EN ISO/IEC 17025 (2005): Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien DIN EN ISO/IEC 17065 (2013): Konformitätsbewertung – Anforderungen an Stellen, die Produkte, Prozesse und Dienstleistungen zertifizieren
- DIN EN 303-5 (2021): Heizkessel – Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung
- Prüfstandshandbuch TFZ („Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers – Manual for test stands“)
- Verordnung (EU) 2015/1189 („Ökodesign-Verordnung für Festbrennstoffkessel“)

ANMERKUNG: Es gilt auch die DIN EN 303-5 (Heizkessel – Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung, 2012), sofern der entsprechende Kessel unter Einhaltung der Vorgaben dieser Norm geprüft wurde und ein gültiger Prüfbericht vorliegt.

3 Begriffsdefinitionen

2:1-Regel	Analog zur DIN EN 303-5 Kapitel 5.1.4 Typprüfung Absatz 3. Die Regel beinhaltet den größten und kleinsten Kessel, bezogen auf die Nennwärmeleistung, einer gleichen definierten Baureihe und entsprechend viele Zwischengrößen bis ein Verhältnis von 2:1 zwischen der höheren und der niedrigeren Leistungsgröße nicht überschritten wird.
Administrativer Ansprechpartner	Kontakt des Antragstellers (bei Erstzertifizierung) bzw. des Zertifikatnehmers (bei Neu- oder Rezertifizierung) für diverse Verwaltungsaufgaben im Rahmen des Zertifizierungsprozesses.
Anbieter von OEM-Produkten	Händler, der Kessel einer anderen Firma unter seinem Namen verkauft.
Ausweitung einer Reihe von zertifizierten Kesseln einer Baureihe	Aufnahme eines oder mehrerer Kessel außerhalb des Leistungsbereichs der bereits zertifizierten Baureihe.
Baureihe	Mehrere Kessel eines Herstellers, die in großer Stückzahl in gleichartiger Weise gefertigt wurden. Eine Baureihe muss eindeutig durch Namensgebung erkennbar sein. Häufig unterscheiden sich die Kessel in der ausgeführten Nennwärmeleistung.
Bauteile	Im Sinne dieses Dokuments alle heizenergetisch relevanten Komponenten eines Kessels.
Beschwerde	Mitteilung über ein Fehlverhalten einer Prüfstelle, der Zertifizierungsstelle oder des Systemträgers durch einen Zertifikatnehmer.
Datenqualität	Zu bewertende Hilfsindikatoren bei der Durchführung der Lastzyklusprüfung.
DEPI	Kurzbezeichnung für die Deutsches Pelletinstitut GmbH, ein Tochterunternehmen des Deutschen Energieholz- und Pellet-Verbands e. V. (DEPV).
Dynamische Zertifikatslaufzeit	Die Laufzeit der zertifizierten Kessel einer Baureihe kann durch nachträgliche Ausweitung und Verdichtung der Baureihe untereinander variieren.
Effizienz-Emissions-Klasse	Klassifizierte Darstellung der Effizienz-Emissions-Zahl (EEZ) mit einer Bewertung von A bis F.
Effizienz-Emissions-Zahl	Gewichteter Kennwert zur Bestimmung der Effizienz-Emissions-Klasse (EEK) auf Grundlage der Messwerte der Lastzyklusmethode für Effizienz (η), Kohlenstoffmonoxid (CO), flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen (OGC), Feinstaub (PM) und Stickstoffoxide (NO _x).

Einspruch	Widerspruch gegen eine oder mehrere Entscheidungen der Zertifizierungsstelle oder des Systemträgers.
Einzelklassenwert	Bewertung der einzelnen Messgrößen (η , CO, OGC, PM, NO _x) zwischen 1 und 6.
Handbuch	Dokument für die Kesselzertifizierung, das die Rechte und Pflichten aller Teilnehmer des Zertifizierungsprogramms definiert.
Installateur	Dienstleister, der den Einbau von Kesseln anbietet und durchführt.
Konformitätsbewertung	Kontrolle über die ordnungsgemäße Ausführung der nötigen Schritte der Zertifizierung gemäß WoodBoilerCert.
Lastzyklus	Standardlastprofil, das eine variierende Wärmeanfrage repräsentiert („load cycle“).
Lastzyklusmethode	Prüfung von Feuerungen mit Lastzyklus gemäß Prüfstandshandbuch.
Leistung	Leistungen im Dokument beziehen sich auf die thermische Nennwärmeleistung.
Neuzertifizierung	Irreguläre Zertifizierung bei Änderung wesentlicher Komponenten.
OEM-Produkt	Original Equipment Manufacturer (OEM, zu Deutsch: Originalgerätehersteller) stellt Produkte oder Komponenten her, die er unter eigenem Namen am Markt verkauft.
Prüfstandshandbuch	Handbuch zur Durchführung der Lastzyklusmethode vom Technologie- und Förderzentrum Straubing (TFZ; „Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers – Manual for test stands“), kurz: Prüfstandshandbuch
Prüfstelle	Durch den Systemträger für die Durchführung von Prüfungen gemäß Lastzyklusmethode zugelassene und gelistete Prüflabore für Geräte und Ausrüstungen.
Rezertifizierung	Verlängerung der Zertifizierung nach Ablauf der regulären Zertifizierungsperiode.
Systembeteiligte	Stellen, die in die Organisation des Zertifizierungsprogramms eingebunden sind und/oder im Rahmen des Programms Prüfungen und Evaluierungen durchführen (Systemträger, Zertifizierungsstelle und Prüfstellen).
Systemträger	Eigentümer und Organisator des Zertifizierungsprogramms.
Typprüfung	Nachweis der Sicherheit eines Kessels sowie Angabe von Effizienz und Emissionen (Kohlenmonoxid, organisch gebundener Kohlenstoff, Stickstoffdioxid, Staub) gemäß DIN EN 303-5.

Verdichtung einer Reihe von zertifizierten Kesseln einer Baureihe	Hinzufügen eines oder mehrerer Kessel innerhalb des bisherigen Leistungsbereichs der bereits zertifizierten Kessel einer Baureihe.
Wesentliche Komponenten	Komponenten (Feuerraumgeometrie, Kesselkörper (ausgenommen Kessel nach 2:1-Regel), externer Brenner und Steuerungssoftware), deren Änderung die Effizienz und das Emissionsverhalten beeinflussen kann.
WoodBoilerCert	Zertifizierungsprogramm nach Lastzyklusmethode („load cycle test method“).
Zertifikatnehmer	Unternehmen (Kesselhersteller oder Anbieter von OEM-Produkten), das ein Zertifikat für einen Kessel hält.
Zertifizierung	Verfahren dieses Handbuchs.
Zertifizierungslogo	Markenrechtlich geschütztes Logo des WoodBoilerCert-Zertifizierungsprogramms.
Zertifizierungsperiode	Reguläre Laufzeit des Zertifikats von acht Jahren.
Zertifizierungsstelle	Stelle, die im Rahmen des Programms Dokumentenprüfungen und Konformitätsbewertungen durchführt.
Zertifizierungszeichen	Markenrechtlich geschütztes Zeichen des WoodBoilerCert-Zertifizierungsprogramms mit dem Zertifikatnehmer den Zertifizierungsstatus eines Produktes kommunizieren können.
Zwischenhändler	Ein Unternehmen des Handels, das Kessel verschiedener Hersteller beschafft und an gewerbliche Kunden weiterverkauft.

4 Abkürzungsverzeichnis

CO	Kohlenstoffmonoxid
DEPI	Deutsches Pelletinstitut GmbH, Tochterunternehmen des Deutschen Energieholz- und Pellet-Verbands e. V. (DEPV)
EEK	Effizienz-Emissions-Klasse
EEZ	Effizienz-Emissions-Zahl
EKW	Einzelklassenwerte
NAE,N	Nominal annual efficiency (Nominaler Jahresnutzungsgrad) bezogen auf den Heizwert (Net Calorific Value)
NAEF	Nominal annual emission factors (Nominaler Jahresemissionsfaktor) bezogen auf den Heizwert
NO_x	Gesamtheit der Stickoxide
OEM	Original Equipment Manufacturer
OGC	Gesamtheit von organisch gebundenem Kohlenstoff
PM	Feinstaub

5 Anforderungen

5.1 Anforderungen an automatisch beschickte Holzzentralheizungen

5.1.1 Prüfung gemäß DIN EN 303-5

- 5.1.1.1 Für die Zertifizierung gemäß WoodBoilerCert muss die erfolgreich absolvierte Prüfung nach DIN EN 303-5 in Form eines Prüfberichts nachgewiesen werden. Es müssen alle sicherheitsrelevanten Vorgaben der DIN EN 303-5 auch bei der Lastzyklusmethode eingehalten werden.

ANMERKUNG: Liegt der Nachweis einer Prüfung gemäß DIN EN 303-5 (Oktober 2012) vor, muss keine Prüfung gemäß DIN EN 303-5 (September 2021) durchgeführt werden.

- 5.1.1.2 Die Prüfung gemäß DIN EN 303-5 muss durch eine dafür offiziell zugelassene Stelle mit einer Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 durchgeführt worden sein.

5.1.2 Prüfung gemäß Lastzyklusmethode

- 5.1.2.1 Für die Zertifizierung gemäß WoodBoilerCert muss die erfolgreich absolvierte Prüfung nach Lastzyklusmethode in Form des Prüfberichts nachgewiesen werden.

- 5.1.2.2 Kessel der gleichen Baureihe sind ausreichend nach der 2:1-Regel zu prüfen.

ANMERKUNG: Die Anforderungen an die Aufnahme weiterer Kessel einer bereits zertifizierten Baureihe sind in Kapitel 6.8 beschrieben.

ANMERKUNG: Es ist empfehlenswert, die Kessel mit denselben Leistungsschritten der DIN EN 303-5 für die Prüfung nach Lastzyklusmethode zu wählen.

- 5.1.2.3 Die Prüfung muss durch eine durch den Systemträger gelistete Prüfstelle durchgeführt werden. Die Anforderungen an die Prüfstelle sind in Abschnitt 8.3 definiert.
- 5.1.2.4 Die Anforderungen an die Datenqualität gemäß Kapitel 7.3 des Prüfstandshandbuchs müssen eingehalten werden.
- 5.1.2.5 Der Prüfbericht nach Lastzyklusmethode muss die in Kapitel 8 des Prüfstandshandbuchs definierten Mindestanforderungen erfüllen und der Zertifizierungsstelle vorgelegt werden.

5.2 Anforderungen an Zertifikatnehmer

5.2.1 Montageanleitung für Fachpersonal

- 5.2.1.1 In der Montageanleitung des zu zertifizierenden Kessels muss enthalten sein:

- a) alle Voraussetzungen zur fachgerechten Montage mit umfänglicher Darstellung und Erklärungen;

- b) alle Informationen, sodass der Kessel sicher, bestimmungsgemäß, effizient und emissionsarm betrieben werden kann;
- c) Sicherheitshinweise und technische Daten gemäß DIN EN 303-5 folglich Kapitel 8.2;
- d) alle Informationen zur Inbetriebnahme, Problembehandlung, Außerbetriebnahme, Demontage und Entsorgung sowie Ersatzteilliste;
- e) alle Vorbereitungen, die am Aufstellort des Kessels nötig sind (Montage- und Anschlussarbeiten müssen Schritt für Schritt beschrieben werden);
- f) Hinweise für die Kompatibilität mit der Abgasanlage und, wenn notwendig, die Kombination mit einem Pufferspeicher;
- g) Hinweis, dass Montage und Inbetriebnahme nur durch Fachpersonal durchgeführt werden dürfen.

5.2.1.2 Die Montageanleitung muss auf der Webseite des Herstellers und auch nach Produktionseinstellung des Kessels für einen Zeitraum von zehn Jahren frei zugänglich sein.

5.2.2 Bedienungsanleitung für Verbraucher

5.2.2.1 Dem Kessel ist eine einfach verständliche Kurzbedienungsanleitung beizufügen. Darin ist der einzusetzende Brennstoff klar und eindeutig definiert. Weiterhin sind Handlungsanweisungen für fehlerhafte Betriebszustände sowie Hinweise zur Reinigung, Lageranbindung, händische Befüllung und Ascheentsorgung anzugeben.

5.2.2.2 In der ausführlichen Bedienungsanleitung muss enthalten sein:

- a) die technischen Daten des Kessels;
- b) Hinweis, dass Inbetriebnahme und Einstellung des Kessels nur durch Fachpersonal zu erfolgen hat;
- c) klare und eindeutige Informationen des einzusetzenden Brennstoffs;
- d) Hinweis, dass eine baurechtliche Abnahme sowie im Rahmen der Feuerstättenschau die Überprüfung des ordnungsgemäßen technischen Zustands der Feuerstätte und des Einsatzes geeigneter Brennstoffe durch den Schornsteinfeger zu erfolgen hat;
- e) alle Einstellungsmodi für den Nutzer, auch für die Heizkreisregelung, wenn vorhanden;
- f) alle notwendigen Schritte für die Reinigung des Geräts, der Emissionsminderungseinrichtungen und des Aschebehälters;
- g) Hinweis, dass die Wartung des Geräts und der Emissionsminderungseinheiten nur durch Fachpersonal zu erfolgen hat;
- h) Ersatzteilliste.

5.2.2.3 Die Bedienungsanleitung und die Kurzbedienungsanleitung müssen auf der Webseite des Herstellers und auch nach Produktionseinstellung des Kessels für einen Zeitraum von zehn Jahren frei zugänglich sein.

5.2.3 Dienstleistungen

5.2.3.1 Der Zertifikatnehmer muss entweder selbst oder über einen Servicepartner

- a) technische Schulungen für Installateure und Verkäufer anbieten;
- b) eine Beratung zur Installation der Abgasanlage anbieten;
- c) die Erstinbetriebnahme der Feuerung anbieten, wobei, wahlweise auch im Rahmen einer Installateursschulung, die Parameter für eine effiziente, emissionsarme Verbrennung sowie Steuerung der Anlage vorgestellt werden;
- d) einen zu üblichen Kundendienstzeiten verfügbaren Wartungsdienst anbieten;
- e) die jährliche Überprüfung und Wartung der Anlage anbieten;
- f) für mindestens zehn Jahre nach dem Inverkehrbringen der Anlage gleichwertige Ersatzteile zur Verfügung stellen.

5.2.4 Darstellung der Effizienz-Emissions-Klasse

5.2.4.1 Die Angabe von Einzelklassenwerten ist nur zusammen mit der Effizienz-Emissions-Klasse (EEK) zulässig. Es müssen alle Einzelwerte (η , CO, PM, OGC, NO_x) angegeben werden.

ANMERKUNG: Die Ermittlung der Einzelklassenwerte und der Effizienz-Emissions-Klasse sind in 6.6 beschrieben.

5.2.4.2 Die Angabe der Effizienz-Emissions-Klasse, der Effizienz-Emissions-Zahl (EEZ) und aller Einzelklassenwerte muss, wie auf dem aktuellen Zertifikat (siehe 6.6) aufgeführt, erfolgen.

ANMERKUNG: Die Ermittlung der Effizienz-Emissions-Zahl ist in 6.6 beschrieben.

5.2.4.3 Wenn die Effizienz-Emissions-Klasse (EEK) durch den Zertifikatnehmer ausgewiesen wird, muss die auf dem aktuellen Zertifikat aufgeführte Klasse angegeben werden. Außerdem muss aufgeführt werden:

- a) der verwendete Brennstoff (Pellets, Hackschnitzel);
- b) die Betriebsart des Kessels (Heizwert oder Brennwert);
- c) die Information, ob der Kessel mit oder ohne Pufferspeicher geprüft wurde;
- d) ein Verweis auf die Zertifizierungswebseite.

5.2.5 Dokumentation

- 5.2.5.1 Alle technischen Änderungen inkl. der Regelungssoftware müssen durch den Zertifikatnehmer dokumentiert werden. Dabei muss eine klare Zuordnung zum individuell produzierten und verkauften Kessel in Form einer Liste mit Seriennummern erfolgen.
- 5.2.5.2 Jeder Wechsel von Zulieferern muss durch den Zertifikatnehmer dokumentiert werden. Dabei muss eine klare Zuordnung von heizenergetisch relevanten Komponenten zum individuellen produzierten und verkauften Kessel erfolgen.

5.2.6 Meldepflichten

- 5.2.6.1 Der Zertifikatnehmer ist dazu verpflichtet wesentlichen Änderungen unverzüglich dem Systemträger/der Zertifizierungsstelle zu melden:
- a) Umfirmierung;
 - b) Änderung der Geschäftsadresse und der Kontaktdaten;
 - c) Änderung von Ansprechpartnern;
 - d) Ergebnisse einer erneuten Typprüfung am Kessel, wenn eine solche gemäß DIN EN 303-5 wegen Änderungen an Sicherheitseinrichtungen und sicherheitsrelevanten Komponenten durchgeführt wurde (Prüfbericht muss zur Verfügung gestellt werden);
 - e) Änderungen an wesentlichen Komponenten des Kessels (siehe 6.1.6);
 - f) Integration weiterer Kessel in die Zertifizierung einer Baureihe bzw. Hinzufügen von weiteren Kesseln zu einer Baureihe;
 - g) Änderung der technischen Dokumentation.
- 5.2.6.2 Auf Anfrage sind dem Systemträger/der Zertifizierungsstelle für statistische Zwecke geforderte Informationen bereitzustellen.
- 5.2.6.3 Auf Anfrage sind dem Systemträger/der Zertifizierungsstelle die Bauzeichnung eines Kessels sowie der Quellcode der Regelungssoftware unter Zusicherung von Vertraulichkeit bereitzustellen, wenn Zweifel an Angaben oder an Selbsterklärungen des Kesselherstellers bzw. des Anbieters von OEM-Produkten bestehen.
- 5.2.6.4 Auf Anfrage sind dem Systemträger/der Zertifizierungsstelle die Produktionszahlen inkl. baugleicher Kessel von Anbietern von OEM-Produkten bereitzustellen.

6 Zertifizierungsverfahren

6.1 Allgemeine Anforderungen

- 6.1.1 Gegenstand der Zertifizierung ist immer ein einzelner automatisch beschickter Holzkessel.

ANMERKUNG: Im Falle, dass mehrere Kessel einer Baureihe zeitgleich zertifiziert werden sollen, können nicht einzelne Kessel von der Zertifizierung ausgenommen werden. Wenn zusätzliche Kessel in eine Reihe bereits zertifizierter Kessel einer Baureihe aufgenommen werden, muss dies vorab an den Systemträger/die Zertifizierungsstelle gemeldet werden (siehe 5.2.6). Das Verfahren zur Aufnahme des Kessels in die Reihe zertifizierter Kessel ist in 6.8 beschrieben.

- 6.1.2 Die Antragstellung für die Zertifizierung eines Kessels oder einer Baureihe kann durch den Kesselhersteller oder durch den Anbieter eines OEM-Produkts erfolgen.

- 6.1.3 Voraussetzungen für die Zertifizierung eines Kessels sind:

- a) der Nachweis einer erfolgreich absolvierten Prüfung nach Lastzyklusmethode gemäß Prüfstandshandbuch (siehe 5.1.2);
- b) der Nachweis einer erfolgreich absolvierten Typprüfung gemäß DIN EN 303-5 (siehe 5.1.1);
- c) die Erfüllung der unter 5.2 definierten Anforderungen an den Hersteller bzw. Anbieter von OEM-Produkten;
- d) die Beachtung der in diesem Dokument definierten Regelungen;
- e) die Zahlung der anfallenden Gebühren an den Systemträger (siehe 9).

ANMERKUNG: Bei einer Zertifizierung einer Baureihe ist es ausreichend die Kessel entsprechend der unter 5.1.2.2 definierten 2:1 Regel zu prüfen.

- 6.1.4 Für jeden zertifizierten Kessel wird die Effizienz-Emissions-Klasse (siehe 6.6) ermittelt und ausgewiesen, durch die die im Rahmen der Lastzyklusmessung ermittelten Messwerte in aggregierter Form dargestellt werden können, um einen Vergleich von verschiedenen Kesseln zu ermöglichen.

- 6.1.5 Die Dauer einer Zertifizierungsperiode beträgt acht Jahre. Wenn vor Ablauf der Zertifizierungsperiode zusätzliche Kessel in eine Reihe bereits zertifizierter Kessel einer Baureihe aufgenommen werden sollen oder wesentliche Komponenten eines Kessels modifiziert werden, muss umgehend eine Neuzertifizierung gemäß 6.9 bzw. 6.8 erfolgen.

- 6.1.6 Wesentliche Komponenten im Sinne dieses Dokumentes sind

- a) die Feuerraumgeometrie, wenn diese nicht zur Steigerung der Nennwärmeleistung entsprechend angepasst wurde;
- b) der Kesselkörper, wenn dieser nicht zur Steigerung der Nennwärmeleistung entsprechend angepasst wurde;

- c) der externe Brenner, falls vorhanden und
- d) die Steuerung, wenn diese neu aufgebaut wird.

ANMERKUNG: Bei der Bedienoberfläche des Kessels handelt es sich nicht um eine wesentliche Komponente.

- 6.1.7 Wenn ein Anbieter von OEM-Produkten einen Kessel oder eine Kesselbaureihe, die bereits durch den Kesselhersteller zertifiziert wurde, separat zertifizieren lassen will, ist weder eine separate Typprüfung gemäß DIN EN 303-5 noch eine separate Prüfung nach Lastzyklusmethode gemäß Prüfstandshandbuch notwendig, wenn keine Änderungen an wesentlichen Komponenten vorgenommen wurden.

6.2 Kesselprüfung nach Lastzyklusmethode

- 6.2.1 Die Prüfung nach Lastzyklusmethode und die Auswertung der Prüfung erfolgen gemäß Prüfstandshandbuch (siehe „Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers – Manual for test stands“).
- 6.2.2 Die Durchführung der Prüfung nach Lastzyklusmethode muss durch eine gelistete Prüfstelle (siehe 8.3) erfolgen.
- 6.2.3 Die Bereitstellung von Prüfbrennstoffen gemäß den Anforderungen des Prüfstandshandbuchs erfolgt durch den Systemträger.
- 6.2.4 Die Prüfung muss an einem Serienkessel durchgeführt werden. Veränderungen wie z. B. Wärmedämmung, die über die Wärmedämmung des Serienkessels hinausgeht, sind unzulässig.
- 6.2.5 Ein Pufferspeicher kann nur im Rahmen der Prüfung verwendet werden, wenn in der Bedienungsanleitung der Pufferspeicherbetrieb gefordert wird. Die Einbindung des Pufferspeichers erfolgt gemäß den Vorgaben des Prüfstandshandbuchs.
- 6.2.6 Bei der Prüfung sind die vom Hersteller serienmäßig mitgelieferten bzw. empfohlenen Einbauten zu verwenden.
- 6.2.7 Im Falle der Zertifizierung der Kessel einer Baureihe ist gemäß 5.1.2 festzulegen, an welchen Kesseln eine Lastzyklusmessung durchzuführen ist.
- 6.2.8 Wenn durch die Prüfstelle ein Prüfbericht ausgestellt wurde, ist eine erneute Prüfung ohne Änderung wesentlicher Komponenten (inkl. Steuerung) nicht zulässig, wenn diese nicht durch die Zertifizierungsstelle angeordnet wurde.
- 6.2.9 Der durch die zuständige Prüfstelle verfasste Prüfbericht muss folgende Informationen umfassen:
- a) alle in Abschnitt 8 des Prüfstandshandbuchs definierten Inhalte;

- b) im Falle der Zertifizierung mehrerer Kessel einer Baureihe: alle einbezogenen Modelle inkl. Nennleistung sowie die geprüften Kessel.

6.3 Zertifizierungsantrag

- 6.3.1 Die Antragstellung erfolgt durch den Kesselhersteller oder den Anbieter eines OEM-Produkts.
- 6.3.2 Der bei der Zertifizierungsstelle einzureichende Antrag muss folgende Angaben zum Antragsteller (bei Erstzertifizierung) bzw. zum Zertifikatnehmer (bei Neu- oder Rezertifizierung) enthalten:
 - a) Firmenname und Rechtsform;
 - b) Kontaktdaten (Geschäftsanschrift wie im Handelsregister dokumentiert, Webseite);
 - c) Geschäftsführer (Name);
 - d) Administrativer Ansprechpartner (Name, Telefon, E-Mail);
 - e) Umsatzsteuer Identifikationsnummer (USt-ID);
 - f) Handelsregisternummer.
- 6.3.3 Der Antrag muss folgende Angaben zu dem zu zertifizierenden Kessel/ den zu zertifizierenden Kesseln enthalten:
 - a) die Bezeichnung von Anlagentyp, Nennleistung, Seriennummer und Baureihe;
 - b) die Information, ob es sich um ein Heiz- oder Brennwertgerät handelt;
 - c) die zugelassenen Brennstoffe;
 - d) Typprüfung gemäß DIN EN 303-5: Prüfstelle und Datum des Prüfberichts;
 - e) bei Zertifizierung über den Anbieter eines OEM-Produkts: Name und Kontaktdaten des Kesselherstellers.
- 6.3.4 Der Antrag muss folgende Angaben zur Prüfung nach Lastzyklusmethode zu enthalten:
 - a) Prüfstelle und Datum des Prüfberichts;
 - b) eine verbindliche Bestätigung, dass es sich beim geprüften Gerät um ein Seriengerät gehandelt hat;
 - c) die Angabe, ob die Prüfung mit oder ohne Pufferspeicher durchgeführt wurde;
 - d) die Angabe, ob die Prüfung mit Pellets oder Hackschnitzeln (inkl. Wassergehaltsbereich gemäß Prüfstandshandbuch) durchgeführt wurde.
- 6.3.5 Dem Antrag sind folgende technische Dokumente beizufügen:

- a) eine Montageanleitung (siehe 5.2.1); bei der Zertifizierung mehrerer Kessel einer Baureihe müssen die Anleitungen für alle betroffenen Kessel eingereicht werden;
 - b) eine kurze und eine ausführliche Bedienungsanleitung (siehe 5.2.2); bei der Zertifizierung mehrerer Kessel einer Baureihe müssen die Anleitungen für alle betroffenen Kessel eingereicht werden;
 - c) der Prüfbericht einer gemäß Prüfstandshandbuch durchgeführten Lastzyklusprüfung (siehe 6.2). Falls ein Anbieter eines (unveränderten) OEM-Produkts Antragsteller ist und der betreffende Kessel bereits über den Kesselhersteller (Zertifikatnehmer) zertifiziert wurde, kann der Anbieter des OEM-Produkts den Prüfbericht der durch den Kesselhersteller in Auftrag gegebenen Lastzyklusprüfung einreichen;
 - d) bei Erstzertifizierung der Prüfbericht einer gemäß DIN EN 303-5 erfolgten Typprüfung (siehe 5.1.1). Falls ein Anbieter eines (unveränderten) OEM-Produkts Antragsteller ist und der betreffende Kessel bereits über den Kesselhersteller (Zertifikatnehmer) zertifiziert wurde, kann der Anbieter des OEM-Produkts den Prüfbericht der durch den Kesselhersteller in Auftrag gegebenen Typprüfung einreichen.
- 6.3.6 Der Antragsteller muss im Falle einer Erstzertifizierung eine Erklärung abgeben, dass er die unter 5.2.3.1 aufgeführten Dienstleistungen anbietet. Falls er externe Dienstleister mit den entsprechenden Aktivitäten beauftragt, müssen die Verträge der Zertifizierungsstelle vorgelegt werden. Im Falle einer Neu- oder Rezertifizierung müssen Nachweise für das Dienstleistungsangebot (z. B. Programme, Rechnungen, Protokolle) eingereicht werden.
- 6.3.7 Der Antragsteller muss im Falle einer Erstzertifizierung eine Erklärung abgeben, dass er die unter 5.2.5 aufgeführten geforderte Dokumentation anlegt und pflegt. Im Falle einer Neu- oder Rezertifizierung müssen die entsprechenden Dokumente eingereicht werden.
- 6.3.8 Der Antragsteller muss dem Systemträger Informations- und Werbematerialien überlassen bzw. zugänglich machen, in denen das Zertifizierungszeichen aufgeführt und/oder die Effizienz-Emissions-Klasse dargestellt wird.
- 6.3.9 Der Systemträger prüft, ob der Antrag und die eingereichten Dokumente vollständig sind und für die Durchführung des Zertifizierungsverfahrens ausreichen. Im Falle eines Antrags auf Bauserienzertifizierung müssen die geforderten Dokumente bzw. Informationen für alle betroffenen Kessel vorliegen. Falls Dokumente bzw. Informationen fehlen oder fehlerhaft sind, fordert der Systemträger deren Bereitstellung oder Korrektur vom Antragsteller ein.
- 6.3.10 Die Zertifizierungsstelle leitet alle relevanten Informationen und Dokumente an den Systemträger weiter.

6.4 Dokumentenprüfung

- 6.4.1 Bei positiver Antragsprüfung prüft die Zertifizierungsstelle im Rahmen der Dokumentenprüfung, ob
- a) der Kessel bzw. die Kesselbaureihe laut dem Bericht der Typprüfung gemäß DIN EN 303-5 zugelassen ist;
 - b) die eingereichten Dokumente die unter 5.2.1 (Montageanleitung) und 5.2.2 (Bedienungsanleitungen) definierten Anforderungen erfüllen;
 - c) der Antragsteller die unter 5.2.3.1 geforderten Dienstleistungen anbietet;
 - d) die unter 5.2.5 geforderte Dokumentation angelegt wurde und gepflegt wird (im Falle einer Neu- oder Rezertifizierung);
 - e) die Darstellung der Effizienz-Emissions-Klasse durch den Zertifikatnehmer den unter 5.2.4.1 definierten Anforderungen entspricht (im Falle einer Neu- oder Rezertifizierung);
 - f) die Nutzung des Zertifizierungszeichens durch den Zertifikatnehmer den unter 7.2 definierten Anforderungen entspricht (im Falle einer Neu- oder Rezertifizierung).
- 6.4.2 Die Zertifizierungsstelle verfasst für jeden zu zertifizierenden Kessel einen separaten Prüfbericht, in dem folgende Informationen enthalten sind:
- a) Firmenname, Rechtsform und Geschäftsanschrift des Antragstellers (bei Erstzertifizierung) bzw. des Zertifikatnehmers (bei Neu- oder Rezertifizierung);
 - b) Informationen zum Kessel:
 - Anlagentyp, Nennleistung, Seriennummer und Baureihe;
 - Heiz- oder Brennwertgerät;
 - Brennstoff;
 - Lastzyklusprüfung mit oder ohne Pufferspeicheranbindung.
 - c) Ergebnisse der Dokumentenprüfung gemäß 6.4.1;
 - d) Abweichungen;
 - e) Identifizierungsnummer des Prüfberichts;
 - f) Datum der Prüfung und Name des Prüfers.

6.5 Konformitätsbewertung

- 6.5.1 Die Konformitätsprüfung wird durch Mitarbeiter der Zertifizierungsstelle durchgeführt, die weder in die Prüfung des Antrags (siehe 6.3) noch in die Dokumentenprüfung (siehe 6.4.1) involviert waren. Geprüft werden

- a) der Prüfbericht der Dokumentenprüfung (siehe 6.4.2);
 - b) die Einhaltung der in Kapitel 7.3 des Prüfstandshandbuchs für die Lastzyklusmessung definierten Anforderungen an die Datenqualität.
- 6.5.2 Bei Nichteinhaltung der Anforderungen an die Datenqualität (siehe 5.1.2.4) ist eine Wiederholung der Prüfstandsmessung gemäß 5.1.2 vor der Ausstellung eines neuen Zertifikats notwendig.
- 6.5.3 Bei Nichteinhaltung der Anforderungen an den Antragsteller/Zertifikatnehmer vereinbart die Zertifizierungsstelle mit diesem Korrekturmaßnahmen und eine Frist für deren Umsetzung. Bei ungenügender Umsetzung der Korrekturmaßnahmen durch den Zertifikatnehmer kann das Zertifikat suspendiert werden.
- 6.5.4 Die Zertifizierungsstelle fällt eine Zertifizierungsentscheidung separat für jeden zu zertifizierenden Kessel und erstellt jeweils einen Konformitätsbericht mit den folgenden Inhalten:
- a) Name und Rechtsform des Unternehmens, über das die Zertifizierung läuft (Hersteller des Originalkessels bzw. Anbieter von OEM-Produkten);
 - b) Kontaktdaten des Unternehmens, über das die Zertifizierung läuft (Hersteller des Originalkessels bzw. Anbieter von OEM-Produkten): Geschäftsanschrift wie im Gewerbe-register dokumentiert und Webseite;
 - c) administrativer Ansprechpartner (Name, Telefon, E-Mail);
 - d) Bezeichnung von Anlagentyp und Baureihe, Seriennummer inkl. Nennleistung;
 - e) im Rahmen der Lastzyklusprüfung eingesetzter Brennstoff (Pellets oder Hackschnitzel);
 - f) Messgrößen der Lastzyklusprüfung;
 - g) OEM-Produkte – bei Zertifizierung durch den Anbieter von OEM-Produkten: Name des Herstellers des Originalkessels und des entsprechenden Kesselnamens, Nennleistung, Seriennummer);
 - h) Vorliegen einer Betätigung, dass es sich beim geprüften Kessel um einen Serienkessel handelt;
 - i) Angabe, ob die Prüfung mit oder ohne Pufferspeicher durchgeführt wurde;
 - j) Angabe, ob die Prüfung im Heizwert- oder Brennwertbetrieb durchgeführt wurde;
 - k) Name der Zertifizierungsstelle;
 - l) Name der Prüfstelle;
 - m) Datum und Identifizierungsnummer des Prüfberichts der Kesselprüfung;
 - n) Ergebnis des Prüfberichts der Kesselprüfung;
 - o) Datum und Identifizierungsnummer des Prüfberichts der Dokumentenprüfung;

- p) Ergebnis des Prüfberichts der Dokumentenprüfung;
 - q) Vorliegen des Nachweises einer erfolgreichen Typprüfung gemäß DIN EN 303-5: Prüf-
stelle und Datum sowie Ergebnis des Prüfberichts (bei Erstzertifizierung);
 - r) Ergebnis der Evaluierung durch die Zertifizierungsstelle;
 - s) Abweichungen (inkl. Ursachen, Korrekturmaßnahmen und Fristen zur Behebung);
 - t) Zertifizierungsentscheidung.
- 6.5.5 Nach Behebung von Abweichungen hinsichtlich der Anforderungen an die Datenqua-
lität (siehe 6.5.2) und/oder Abweichungen hinsichtlich der Anforderungen an Antrag-
steller/Zertifikatnehmer (siehe 6.5.3) wird durch die Zertifizierungsstelle ein neuer
Konformitätsbericht ausgestellt.

6.6 Ausweisung der Effizienz-Emissions-Klasse

- 6.6.1 Die Ergebnisse der Lastzyklusprüfung werden über mehrere Schritte (siehe 6.6.2 bis
6.6.4) in die Effizienz-Emissions-Klasse (EEK) überführt, die für jeden Kessel separat
ausgewiesen wird.
- 6.6.2 Aus den im Prüfbericht (siehe 6.2.9) ausgewiesenen auf dem Prüfstand ermittelten
Prüfergebnissen leitet die Zertifizierungsstelle gemäß Anhang A, Tabelle 2 die Einzel-
klassenwerten (EKW) für Effizienz und die relevanten Emissionen ab.
- 6.6.3 Die Berechnung der Effizienz-Emissions-Zahl (EEZ) erfolgt über die Gewichtung der
Einzelklassenwerte für Effizienz und die relevanten Emissionen gemäß Formel (1).

$$\begin{aligned}
 EEZ = & 0,4 \cdot (EKW \eta_{NAE,N}) + \\
 & 0,15 \cdot (EKW CO_{NAEF}) + \\
 & 0,1 \cdot (EKW NO_{xNAEF}) + \\
 & 0,05 \cdot (EKW OGC_{NAEF}) + \\
 & 0,3 \cdot (EKW PM_{NAEF})
 \end{aligned} \tag{1}$$

- 6.6.4 Effizienz-Emissions-Zahl (EEZ) wird eindeutig einer Effizienz-Emissions-Klasse mit ei-
ner Bewertung zwischen A und F zugeordnet:

A:	$1 \leq EEZ < 1,5$
B:	$1,5 \leq EEZ < 2,5$
C:	$2,5 \leq EEZ < 3,5$
D:	$3,5 \leq EEZ < 4,5$
E:	$4,5 \leq EEZ < 5,5$
F:	$5,5 \leq EEZ \leq 6$

6.6.5 Die Effizienz-Emissions-Klasse und Effizienz-Emissions-Zahl (mit einer Nachkommastelle) werden sowohl im Zertifikat als auch auf dem Zertifizierungszeichen ausgewiesen. Außerdem erfolgt die Veröffentlichung auf der Zertifizierungswebseite. Auf dem Zertifikat und der Webseite werden zusätzlich die ausgewiesenen Einzelklassenwerte genannt.

6.7 Zertifikat

6.7.1 Im Fall einer positiven Zertifizierungsentscheidung (siehe 6.5) wird durch die Zertifizierungsstelle für jeden Kessel ein separates Zertifikat ausgestellt.

6.7.2 Die reguläre Laufzeit eines Zertifikats (Zertifizierungsperiode) beträgt acht Jahre.

6.7.3 Das Zertifikat enthält die folgenden Angaben bzw. Elemente:

- a) Name und Rechtsform des Zertifikatnehmers;
- b) Geschäftsanschrift des Zertifikatnehmers wie im Gewerberegister dokumentiert;
- c) Geltungsbereich des Zertifikats:
 - zertifiziertes Kesselmodell (inkl. Anlagentyp, Nennleistung, Baureihe, Seriennummer) bzw. zertifizierte Baureihe mit den entsprechenden Informationen;
 - Brennstoff, mit dem der Kessel (bzw. die Kessel der Baureihe) im Rahmen der Lastzyklusprüfung betrieben wurde (Pellets/Hackschnitzel);
 - Betriebsart des geprüften Kessels (bzw. der Baureihe) – Heiz- oder Brennwertkessel;
 - Angabe, ob die Prüfung mit oder ohne Pufferspeicher erfolgt ist;
 - Verweis auf die in diesem Dokument definierten Zertifizierungsanforderungen.
- d) Information, ob der Kessel eine Lastzyklusprüfung gemäß 5.1.2 durchlaufen hat oder Teil einer Baureihenprüfung ist und deswegen für diesen Kessel nur interpolierte Messwerte vorliegen;
- e) Zertifizierungszeichen mit Zertifizierungs-ID des Kessels (wird durch den Systemträger zur Verfügung gestellt);
- f) Effizienz-Emissions-Klasse;
- g) Effizienz-Emissions-Zahl (mit einer Nachkommastelle);
- h) das Datum, an dem die Zertifizierung erteilt wurde;
- i) reguläre Laufzeit der Zertifizierung.

ANMERKUNG: Bei einer zertifizierten Baureihe sind die Werte für e) und f) als interpolierte Werte zwischen Messwerten kenntlich zu machen (Schriftart kursiv und erläuternde Fußnote).

6.7.4 Änderungen der Angaben auf dem Zertifikat erfordern die Ausstellung eines neuen Zertifikats.

6.7.5 Das Zertifikat wird dem Zertifikatnehmer übermittelt und ist auf der Webseite des Systemträgers einsehbar.

6.8 Aufnahme weiterer Kessel in eine Reihe bereits zertifizierter Kessel einer Baureihe

6.8.1 Bei der Aufnahme zusätzlicher Kessel in eine zertifizierte Baureihe wird unterschieden zwischen

- a) Verdichtung einer Baureihe – in diesem Fall muss der neu aufzunehmende Kessel keine Prüfung nach Lastzyklusmethode gemäß 5.1.2 durchlaufen;
- b) Ausweitung des Leistungsbereichs einer Baureihe – in diesem Fall muss der zusätzliche Kessel eine Prüfung nach Lastzyklusmethode gemäß 5.1.2 durchlaufen.

6.8.2 Der Zertifikatnehmer muss die Aufnahme eines weiteren Kessels in eine Reihe bereits zertifizierter Kessel einer Baureihe beantragen. Dafür muss bei der Zertifizierungsstelle ein Antrag eingereicht werden, in dem folgende Informationen aufgeführt sind:

- a) Name und Rechtsform des Zertifikatnehmers;
- b) Geschäftsanschrift des Zertifikatnehmers wie im Gewerberegister dokumentiert;
- c) Bezeichnung und Nennleistung des Kessels inkl. Seriennummer und Baureihe;
- d) Erklärung, dass für mindestens zehn Jahre nach dem Inverkehrbringen der Anlage gleichwertige Ersatzteile zur Verfügung stehen.

6.8.3 Zusammen mit dem Antrag müssen folgende Dokumente bei der Zertifizierungsstelle eingereicht werden:

- a) Montageanleitung für den Kessel (siehe 5.2.1);
- b) Bedienungsanleitungen für den Kessel (siehe 5.2.2);
- c) Prüfbericht einer gemäß neuer DIN EN 303-5 erfolgten Typprüfung am betreffenden Kessel;
- d) Prüfbericht einer Lastzyklusprüfung am betreffenden Kessel, wenn diese gemäß 5.1.2 notwendig ist.

6.8.4 Die Zertifizierungsstelle prüft die eingereichten unter 6.4.1 a) bis c) aufgeführten Dokumente mit Bezug zum neu einzugliedernden Kessel und verfasst einen Prüfbericht analog zu 6.4.2.

- 6.8.5 Die Zertifizierungsstelle bewertet die Konformität der Dokumentenprüfung (siehe 6.4) sowie der Lastzyklusprüfung (siehe 6.2) und verfasst einen Konformitätsbericht analog zu 6.5.4.
- 6.8.6 Bei Vorlage einer positiven Zertifizierungsentscheidung durch die Zertifizierungsstelle wird durch den Systemträger ein neues Zertifikat gemäß 6.7 für den betreffenden Kessel ausgestellt.
- 6.8.7 Bei Zertifizierung von Kesseln einer Baureihe werden die Werte für Kessel zwischen den nach Lastzyklusmethode geprüften Kesseln interpoliert.
- 6.8.8 Bei der Verdichtung einer Baureihe von zertifizierten Kesseln einer Baureihe müssen die für die Aufnahme beantragten Kessel keine Prüfung nach Lastzyklusmethode gemäß Prüfstandshandbuch durchlaufen. Es sind entsprechend die Anforderungen nach 5.1.2.2 zu beachten.
- 6.8.9 Bei der Ausweitung einer Reihe von zertifizierten Kesseln einer Baureihe muss der Zertifikatnehmer dem Zertifikatgeber die neuen Kessel der identischen Baureihe, die in die Reihe zertifizierter Kessel einer Baureihe aufgenommen werden sollen, mitteilen.
- 6.8.10 Die Zertifikatslaufzeit der zertifizierten Kessel einer Baureihe kann durch nachträgliche Ausweitung der Baureihe untereinander variieren (dynamische Zertifikatslaufzeit). Es ist also möglich, dass Zertifikate einzelner Kessel aufgrund von Überschreitung der regulären Laufzeit von acht Jahren eines Zertifikats (Zertifizierungsperiode, siehe auch 6.7.2) rezertifiziert werden müssen sowie andere Kessel aufgrund der nachträglichen Aufnahme in eine Baureihe (entsprechend Kapitel 6.8) noch ein gültiges Zertifikat aufweisen und somit erst zu einem späteren Zeitpunkt rezertifiziert werden müssen.
- 6.8.11 Bereits ausgestellte Zertifikate einzelner nicht wiederholt gemessener Kessel behalten ihre Gültigkeit entsprechend der definierten Laufzeit (Zertifizierungsperiode, siehe auch 6.7.2).

6.9 Neuzertifizierung

- 6.9.1 Der Zertifikatnehmer muss Änderungen an wesentlichen Komponenten (siehe 6.1.6) gemäß 5.2.6.1 unverzüglich an die Zertifizierungsstelle melden. Die schriftliche Meldung muss detaillierte Informationen zu betroffenen wesentlichen Komponenten sowie den vorgenommenen Änderungen enthalten.
- 6.9.2 Der Zertifikatnehmer muss der Zertifizierungsstelle unverzüglich melden, wenn aufgrund von Änderungen an Sicherheitseinrichtungen und sicherheitsrelevanten Komponenten eine erneute Kesselprüfung gemäß DIN EN 303-5 an einem zertifizierten

Kessel durchgeführt werden musste. Der Prüfbericht der Prüfung muss der Zertifizierungsstelle zur Verfügung gestellt werden.

- 6.9.3 Die Zertifizierungsstelle entscheidet nach Rücksprache mit der Prüfstelle, die die Prüfung nach Lastzyklusmethode gemäß 6.2 durchgeführt hat (und ggf. nach Einbeziehung von unabhängigen, kompetenten dritten Stellen), ob eine erneute Prüfung gemäß Prüfstandshandbuch durchgeführt werden muss.
- 6.9.4 Wenn die Zertifizierungsstelle entscheidet, dass keine Prüfung gemäß Prüfstandshandbuch durchgeführt werden muss, behält das bereits ausgestellte Zertifikat seine Gültigkeit für den Rest der regulären Laufzeit.
- 6.9.5 Wenn die Zertifizierungsstelle entscheidet, dass eine erneute Prüfung gemäß Prüfstandshandbuch (siehe 6.2) durchgeführt werden muss, muss das in 6.9.6 bis 6.9.10 festgelegte Verfahren durchgeführt werden. Die Zertifizierungsstelle setzt dem Zertifikatnehmer eine Frist für die Einreichung des Nachweises über eine Prüfung nach Lastzyklusmethode gemäß Prüfstandshandbuch.
- 6.9.6 Der Zertifikatnehmer muss bei der Zertifizierungsstelle einen Antrag auf Neuzertifizierung einreichen, in dem folgende Informationen aufgeführt sind:
- a) Name und Rechtsform des Zertifikatnehmers;
 - b) Geschäftsanschrift des Zertifikatnehmers wie im Gewerberegister dokumentiert;
 - c) Bezeichnung des Kessels inkl. Seriennummer und Baureihe;
 - d) Informationen zur betroffenen wesentlichen Komponenten sowie den vorgenommenen Änderungen bzw. zu der Änderung an Sicherheitseinrichtungen und sicherheitsrelevanten Komponenten;
 - e) Informationen zu Änderungen der Montageanleitung (siehe 5.2.1) und/oder der Bedienungsanleitung (siehe 5.2.2);
 - f) ggf. eine Erklärung, dass an den anderen wesentlichen Komponenten keine Änderungen vorgenommen wurden und alle anderen Angaben aus dem ursprünglichen Antrag aktuell sind.
- 6.9.7 Der Zertifikatnehmer muss zusammen mit dem Antrag den Prüfbericht einer gemäß Prüfstandshandbuch durchgeführten Lastzyklusprüfung (siehe 6.2) bei der Zertifizierungsstelle einreichen.
- 6.9.8 Die Zertifizierungsstelle führt die folgenden Prüfungen durch und verfasst einen Prüfbericht analog zu 6.4.2:
- a) Prüfung, ob die geplanten Änderungen an der Montageanleitung und/oder der Bedienungsanleitung (siehe 6.9.6 e)) ausreichen;
 - b) Prüfung, ob die unter 6.9.6 d) geforderte Erklärung vorliegt.

6.9.9 Die Zertifizierungsstelle bewertet die Konformität des Prüfberichts der Prüfung gemäß Prüfstandshandbuch (siehe 6.9.7) sowie die Prüfung der eingereichten Erklärungen (siehe 6.9.8) und erstellt einen Konformitätsbericht analog zu 6.5.4.

6.9.10 Bei Vorlage einer positiven Zertifizierungsentscheidung stellt die Zertifizierungsstelle ein neues Zertifikat gemäß 6.7 aus.

6.10 Rezertifizierung

6.10.1 Vor Ablauf der achtjährigen Zertifizierungsperiode müssen im Rahmen des Rezertifizierungsprozesses die unter 6.2 und 6.4.1 aufgeführten Prüfungen durchgeführt werden. Die dafür notwendigen Nachweise und Informationen müssen rechtzeitig durch den Zertifikatnehmer zur Verfügung gestellt werden.

6.10.2 Die Konformitätsbewertung durch die Zertifizierungsstelle erfolgt gemäß 6.5.

6.10.3 Bei Vorlage einer positiven Zertifizierungsentscheidung durch die Zertifizierungsstelle wird durch den Systemträger ein neues Zertifikat gemäß 6.7 ausgestellt.

6.10.4 Für nachträglich geprüfte Kessel im Rahmen der Ausweitung einer Baureihe (dynamische Zertifikatslaufzeit) gilt das Ausstellungsdatum auf dem Zertifikat bzw. Zertifizierungszeichens zur Bestimmung des Ablaufs der Zertifizierungsperiode.

ANMERKUNG: Es ist also bei einer zertifizierten Baureihe möglich, dass Zertifikate einzelner Kessel aufgrund von Überschreitung der regulären Laufzeit von acht Jahren eines Zertifikats (Zertifizierungsperiode, siehe auch 6.7.2) rezertifiziert werden müssen sowie andere Kessel aufgrund der nachträglichen Aufnahme in eine Baureihe (entsprechend Kapitel 6.8) noch ein gültiges Zertifikat aufweisen und somit erst zu einem späteren Zeitpunkt rezertifiziert werden müssen.

6.11 Erlöschen, Suspendierung und Entzug des Zertifikats

6.11.1 Die Zertifizierung endet, wenn der Zertifikatnehmer bei Ablauf der Zertifizierungsperiode auf eine Rezertifizierung (siehe 6.10) verzichtet oder das Vertragsverhältnis mit dem Systemträger zum ersten Januar des Folgejahres beendet.

6.11.2 Im Falle, dass die Aktivitäten des Zertifikatnehmers auf eine andere Firma übergehen, muss ein neues Zertifikat auf Basis der bereits erfolgten Prüfungen beantragt werden. Die Laufzeit wird aus dem ursprünglichen Zertifikat übernommen.

6.11.3 Die Zertifizierungsstelle kann das Zertifikat mit Angabe einer Frist suspendieren, wenn der Zertifikatnehmer

- a) eine Änderung von wesentlichen Komponenten nicht gemeldet hat (siehe 5.2.6.1 d)) oder der Aufforderung zu einer Neuzertifizierung (siehe 6.9.4) durch die Zertifizierungsstelle nicht fristgerecht nachgekommen ist;
- b) einen neuen Kessel in die Baureihe aufgenommen hat, ohne dies der Zertifizierungsstelle zu melden;

- c) bei Nichtbehebung von Abweichungen (siehe 6.5.2, 6.5.3);
- d) seiner Pflicht zur Zahlung von Zertifizierungsgebühren nicht nachkommt.

6.11.4 Wird die Ursache für die Suspendierung nicht innerhalb der gesetzten Frist beseitigt, kann die Zertifizierungsstelle das Zertifikat entziehen.

6.11.5 Die Nutzung des Zertifizierungszeichens ohne gültiges Zertifikat ist unzulässig. Davon ausgenommen ist die Nutzung von Werbemitteln, die zum Zeitpunkt des Erlöschens, der Suspendierung oder des Entzugs des Zertifikats bereits produziert waren.

6.11.6 Wenn das Unternehmen nach dem Entzug oder der Beendigung der Zertifizierung erneut zertifiziert werden möchte, ist eine Erstzertifizierung erforderlich.

7 Zertifizierungslogo, Zertifizierungszeichen und Zeichennutzung

7.1 Zertifizierungslogo

- 7.1.1 Das Logo des Zertifizierungsprogramms WoodBoilerCert (siehe Abbildung 1) ist Eigentum des Systemträgers. Es dient der Kommunikation der Inhalte und der Verbreitung des Zertifizierungsprogramms.
- 7.1.2 Ein Zertifikatnehmer kann das Zertifizierungslogo nutzen, um zu kommunizieren, dass er zertifizierte Produkte anbietet. Es darf nicht der Eindruck erweckt werden, dass nicht-zertifizierte Kessel zertifiziert sind. Für die Bewerbung eines bestimmten zertifizierten Produktes ist das Zertifizierungszeichen (siehe 7.2) zu verwenden.
- 7.1.3 Die Nutzung des Zertifizierungslogos durch den Zertifikatnehmer ist nach Erlöschen, Suspendierung oder Entzug des Zertifikats nicht gestattet. Davon ausgenommen ist die Nutzung von Werbemitteln, die zum Zeitpunkt des Erlöschens der Suspendierung oder des Entzugs des Zertifikats bereits produziert waren.

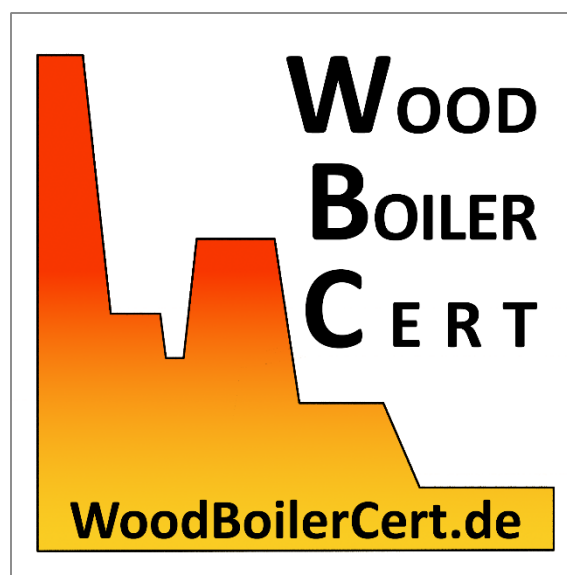


Abbildung 1: Zertifizierungslogo

- 7.1.4 Das Zertifizierungslogo darf ausschließlich mit Genehmigung des Systemträgers genutzt werden. Davon ausgenommen ist die Nutzung zu Werbe- und Informationszwecken (z.B. durch Bioenergieverbände/Verbände für Erneuerbare Energien, Forschungs- und Bildungseinrichtungen, Regierungsorganisationen, Verbraucherorganisationen usw.).
- 7.1.5 Das Zertifizierungslogo muss in der Form verwendet werden, wie es durch den Systemträger zur Verfügung gestellt wird. Eine Modifikation des Zeichens ist nicht

erlaubt. Die Darstellung darf nur in den Originalfarben oder monochrom schwarz-weiß erfolgen.

7.2 Zertifizierungszeichen

7.2.1 Das Zertifizierungszeichen (siehe Abbildung 2) dient den Zertifikatnehmern zur Kommunikation des Zertifizierungsstatus ihrer Kessel gegenüber Zwischenhändlern, Installateuren und Endkunden und setzt sich aus den in Tabelle 1 aufgeführten Komponenten zusammen. Es wird durch den Systemträger vergeben.

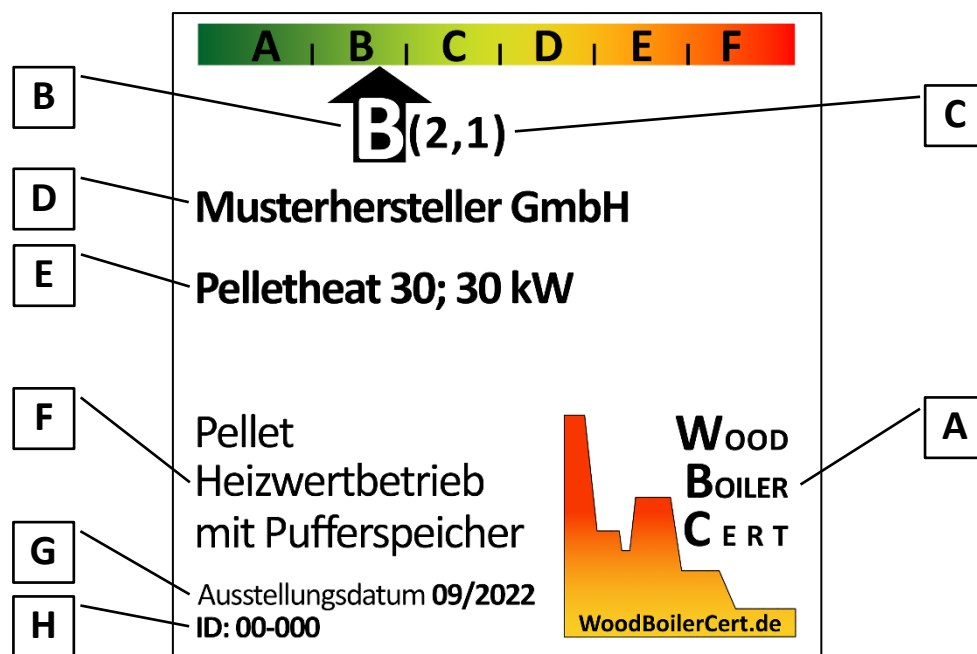


Abbildung 2: Zertifizierungszeichen (Beispiel)

Tabelle 1: Elemente des Zertifizierungszeichens

	Element des Zertifizierungszeichens	Erläuterung
A	Logo des Zertifizierungsprogramms	siehe 7.1
B	Effizienz-Emissions-Klasse mit Einordnung	Siehe 6.6, über eine Markierung erfolgt die Einordnung des zertifizierten Kessels in das definierte Spektrum, das durch eine Farbskala dargestellt wird.
C	Effizienz-Emissions-Zahl	Siehe 6.6
D	Name des Zertifikatnehmers	Firmenname und Rechtsform wie im Handelsregister dokumentiert
E	Bezeichnung des zertifizierten Kessels	Anlagentyp und Nennleistung
F	Informationen zu den Prüfbedingungen	Informationen zu Prüfbrennstoff und Betriebsart sowie die Angabe, ob der Kessel mit oder ohne Pufferspeicher geprüft wurde.
G	Ausstellungsdatum des Zertifikats	Angabe von Monat und Jahr, in denen das Zertifikat ausgestellt wurde.
H	Zertifizierungs-ID	Die ID („WBC-ID“) wird durch den Systemträger vergeben und setzt sich aus folgenden Komponenten (mit Bindestrich dazwischen) zusammen: <ul style="list-style-type: none"> - einer spezifischen fortlaufenden Nummer (zwei Stellen) für den Zertifikatnehmer; - einer spezifischen fortlaufenden Nummer (drei Stellen) für den zertifizierten Kessel.

- 7.2.2 Das Zertifizierungszeichen darf ausschließlich durch den Systemträger, die Zertifizierungsstelle sowie den Zertifikatnehmer genutzt werden. Eine Ausnahme ist in 7.2.6 aufgeführt.
- 7.2.3 Interpolierte Werte von nicht gemessenen Kesseln einer zertifizierten Baureihe werden eindeutig (kursive Schrift der Werte und erläuternde Fußnote) gekennzeichnet.
- 7.2.4 Das Zertifizierungszeichen muss in der Form verwendet werden, wie es durch den Systemträger zur Verfügung gestellt wird. Eine Modifikation des Zeichens ist nicht erlaubt. Die Darstellung darf nur in den Originalfarben oder monochrom schwarz-weiß erfolgen.

- 7.2.5 Die Nutzung des Zertifizierungszeichens durch Zertifikatnehmer ist ausschließlich mit Bezug zu zertifizierten Produkten und dem Geltungsbereich eines gültigen Zertifikats erlaubt. Es muss der Eindruck vermieden werden, dass andere Produkte als der zertifizierte Kessel zertifiziert sind.
- 7.2.6 Ein Zertifikatnehmer kann einem Zwischenhändler oder Installateur die Nutzung seines Zertifizierungszeichens zur Bewerbung eines zertifizierten Kesselmodells gestatten. Es darf nicht der Eindruck erweckt werden, dass nicht-zertifizierte Produkte zertifiziert sind.
- 7.2.7 Die Nutzung des Zertifizierungszeichens durch den Zertifikatnehmer ist nach Erlöschen, Suspendierung oder Entzug des Zertifikats nicht gestattet. Davon ausgenommen ist die Nutzung von Werbemitteln, die zum Zeitpunkt des Erlöschens der Suspendierung oder des Entzugs des Zertifikats bereits produziert waren.
- 7.2.8 Jegliche Nutzung des Zertifizierungszeichens ohne Erlaubnis des Systemträgers wird als Markenmissbrauch gewertet und kann durch diesen juristisch verfolgt werden.

8 Systembeteiligte – Aufgaben und Anforderungen

8.1 Systemträger

8.1.1 Aufgaben

8.1.1.1 Der Systemträger hat im Rahmen des Zertifizierungsprogramms folgende Aufgaben:

- a) Weiterentwicklung des Programms;
- b) Organisation des Programms;
- c) Zulassung der Zertifizierungsstelle (siehe 8.2.2.1);
- d) Zulassung von Prüfstellen (siehe 8.3.2.4);
- e) Vergabe von Zertifizierungs-IDs und deren Bereitstellung an die Zertifizierungsstelle;
- f) Erstellung und Vergabe von Zertifizierungszeichen (siehe 7.2) und deren Bereitstellung an die Zertifizierungsstelle und den Zertifikatnehmer;
- g) Erteilung von Genehmigungen zur Nutzung des Zertifizierungslogos (siehe 7.1.4);
- h) Markenschutz und Bekämpfung von Markenmissbrauch (siehe 7.2.8);
- i) Betrieb der Zertifizierungswebseite mit Informationen über zertifizierte Kessel (inkl. aller Einzelklassenwerte, Effizienz-Emissions-Zahl und Effizienz-Emissions-Klasse) sowie der Herleitung der ausgewiesenen Informationen;
- j) Statistische Auswertungen;
- k) Bewerbung des Programms;

- l) Bearbeitung von Beschwerden und Reklamationen hinsichtlich der eigenen Tätigkeiten.

8.1.2 Anforderungen

- 8.1.2.1 Der Systemträger muss seine Organisationsstruktur inkl. der Aufgaben, Zuständigkeiten und Befugnisse der Geschäftsleitung und relevanter Mitarbeiter dokumentieren.
- 8.1.2.2 Der Systemträger muss ausreichend Personal beschäftigen oder anderweitigen Zugriff auf Personal haben, um seine Tätigkeiten in Zusammenhang mit dem Zertifizierungsprogramm ordnungsgemäß durchführen zu können. Er muss sicherstellen, dass sämtliches Personal über die jeweils relevanten und angemessenen Kenntnisse und Kompetenzen verfügt.
- 8.1.2.3 Der Systemträger muss sicherstellen, dass wirtschaftliche, finanzielle oder andere Zwänge die Unabhängigkeit seiner Arbeit nicht beeinflussen.
- 8.1.2.4 Der Systemträger muss allen Antragstellern Zugang zum Programm gewähren, deren Aktivitäten in den Geltungsbereich des Zertifizierungsprogramms fallen. Der Zugang zum Zertifizierungsverfahren wird nicht von der Mitgliedschaft in bestimmten Organisationen oder Verbänden abhängig gemacht.
- 8.1.2.5 Der Systemträger ist für den sorgsam Umgang mit allen Informationen verantwortlich, die er im Rahmen der Organisation des Programms sammelt. Mit Ausnahme von Informationen, die der (potenzielle) Zertifikatnehmer öffentlich zur Verfügung stellt oder im Rahmen der Organisation des Zertifizierungsprogramms anderen Systembeteiligten zur Verfügung stellt, werden alle Informationen als geschützte Informationen betrachtet und müssen vertraulich behandelt werden.
- 8.1.2.6 Der Systemträger muss ein Verfahren für die zeitnahe Bearbeitung von Beschwerden und Einsprüchen hinsichtlich seiner unter 8.1.1.1 aufgeführten Aufgaben entwickeln, implementieren und pflegen.
- 8.1.2.7 Alle relevanten Entscheidungen und Vorgänge müssen dokumentiert werden.

8.2 Zertifizierungsstelle

8.2.1 Aufgaben

- 8.2.1.1 Die Zertifizierungsstelle hat im Rahmen des Zertifizierungsprogramms folgende Aufgaben:
 - a) Prüfung der Anträge von potenziellen Zertifikatnehmern;
 - b) Dokumentenprüfung (siehe 6.4);

- c) Evaluierung von Prüfberichten und Verfassen von Konformitätsberichten (inkl. Nachverfolgung von Abweichungen und Fällen der Zertifizierungsentscheidung) (siehe 6.5);
- d) Übergabe des Zertifikats inklusive Zertifizierungszeichens;
- e) Ausstellung, Suspendierung und Entzug von Zertifikaten (siehe 6.7, 6.11);
- f) Beurteilung, ob im Falle von Änderungen an wesentlichen Komponenten oder im Falle einer Neuprüfung bei Änderungen an Sicherheitseinrichtungen und sicherheitsrelevanten Komponenten gemäß DIN EN 303-5 eine Neuzertifizierung nötig ist oder nicht (siehe 6.8);
- g) Bearbeitung von Beschwerden und Reklamationen hinsichtlich der eigenen Tätigkeiten;
- h) führt in regelmäßigen Abständen Ringversuche der Prüfstellen durch.

8.2.2 Anforderungen

- 8.2.2.1 Die Zertifizierungsstelle wird durch den Systemträger bestimmt.
- 8.2.2.2 Die Zertifizierungsstelle muss ihre Organisationsstruktur inkl. der Aufgaben, Zuständigkeiten und Befugnisse der Geschäftsleitung und relevanter Mitarbeiter dokumentieren.
- 8.2.2.3 Die Zertifizierungsstelle muss ausreichend Personal beschäftigen oder anderweitigen Zugriff auf Personal haben, um ihre Tätigkeiten in Zusammenhang mit dem Zertifizierungsprogramm ordnungsgemäß durchführen zu können. Sie muss sicherstellen, dass sämtliches Personal über die jeweils relevanten und angemessenen Kenntnisse und Kompetenzen verfügt.
- 8.2.2.4 Die Konformitätsprüfung wird durch Mitarbeiter der Zertifizierungsstelle durchgeführt, die weder in die Prüfung des Antrags (siehe 6.3) noch in die Dokumentenprüfung (siehe 6.4.1) involviert waren.
- 8.2.2.5 Die Zertifizierungsstelle muss sicherstellen, dass wirtschaftliche, finanzielle oder andere Zwänge die Unabhängigkeit ihrer Arbeit nicht beeinflussen.
- 8.2.2.6 Die Zertifizierungsstelle muss allen Antragstellern Zugang zum Programm gewähren, deren Aktivitäten in den Geltungsbereich des Zertifizierungsprogramms fallen. Der Zugang zum Zertifizierungsverfahren wird nicht von der Mitgliedschaft in bestimmten Organisationen oder Verbänden abhängig gemacht.
- 8.2.2.7 Die Zertifizierungsstelle ist für den sorgsamen Umgang mit allen Informationen verantwortlich, die sie im Rahmen der Organisation des Programms sammelt. Mit Ausnahme von Informationen, die der (potenzielle) Zertifikatnehmer öffentlich zur Verfügung stellt oder im Rahmen der Organisation des Zertifizierungsprogramms

anderen Systembeteiligten zur Verfügung stellt, werden alle Informationen als geschützte Informationen betrachtet und müssen vertraulich behandelt werden.

8.2.2.8 Die Zertifizierungsstelle muss ein Verfahren für die zeitnahe Bearbeitung von Beschwerden und Einsprüchen hinsichtlich ihrer unter 8.2.1.1 aufgeführten Aufgaben entwickeln, implementieren und pflegen.

8.2.2.9 Alle relevanten Entscheidungen und Vorgänge müssen dokumentiert werden.

8.3 Prüfstellen

8.3.1 Aufgaben

8.3.1.1 Die Prüfstellen haben im Rahmen des Zertifizierungsprogramms folgende Aufgaben:

- a) Durchführung der Typprüfung gemäß DIN EN 303-5 wenn notwendig und gewünscht, Bereitstellung des Prüfberichts/der Messergebnisse der Typprüfung (an den Antragsteller/Zertifikatnehmer);
- b) Durchführung der Prüfung nach Lastzyklusmethode gemäß Prüfstandshandbuch (siehe 6.2), Bereitstellung des Prüfberichts/der Messergebnisse der Lastzyklusprüfung (an den Antragsteller/Zertifikatnehmer);
- c) Unterstützung der Zertifizierungsstelle bei der Beurteilung, ob im Falle von Änderungen an wesentlichen Komponenten oder im Falle einer Neuprüfung bei Änderungen an Sicherheitseinrichtungen und sicherheitsrelevanten Komponenten gemäß DIN EN 303-5 eine Neuzertifizierung nötig ist oder nicht (siehe 6.9).

8.3.2 Anforderungen

8.3.2.1 Prüfstellen müssen nach DIN EN ISO/IEC 17025 (Prüfgebiet „Heizkessel für feste Brennstoffe“) akkreditiert sein.

8.3.2.2 Prüfstellen müssen über die für Prüfverfahren nach Lastzyklusmethode gemäß Prüfstandshandbuch notwendige Ausstattung und die Kompetenzen verfügen.

8.3.2.3 Prüfstellen müssen über eine Zulassung für Kesselprüfungen gemäß DIN EN 303-5 verfügen.

8.3.2.4 Prüfstellen müssen beim Systemträger gelistet sein.

8.3.2.5 Alle weiteren Anforderungen an Prüfstellen ergeben sich aus der Akkreditierung.

9 Entgeltordnung – beim Antragsteller/Zertifikatnehmer anfallende Kosten

9.1 Prüfkosten

9.1.1 Es fallen Kosten für die Prüfung nach Lastzyklusmethode im Rahmen von Erst-, Neu- und Rezertifizierungen an.

9.1.2 Die Kosten sind direkt an die Prüfstelle zu entrichten.

9.2 Zertifizierungspauschale

9.2.1 Für die Ausstellung des Zertifikats wird eine Zertifizierungspauschale erhoben.

9.2.2 Die Kosten der Zertifizierungspauschale sind an die Zertifizierungsstelle zu entrichten.

9.3 Lizenzgebühr

9.3.1 Für die Nutzung des Zertifizierungszeichens fällt eine jährliche Lizenzgebühr an.

9.3.2 Die Kosten der Lizenzgebühr sind an den Systemträger zu entrichten.

9.3.3 Die Höhe der Lizenzgebühr ist abhängig von der Anzahl der zertifizierten Kessel.

Anhang A

Tabelle 2: Bewertungsmatrix für die Bestimmung der Effizienz-Emissions-Zahl, heizwertbezogen

Messgröße	Effizienz	CO-Emissionen	NOx-Emissionen	OGC-Emissionen	PM-Emissionen
Formelzeichen	$\eta_{NAE,N}$	CO_{NAEF}	NOx_{NAEF}	OGC_{NAEF}	PM_{NAEF}
Einheit	%	mg/MJ	mg/MJ	mg/MJ	mg/MJ
1	$\eta_{NAE,N} \geq 98$	$CO_{NAEF} < 30$	$NOx_{NAEF} < 50$	$OGC_{NAEF} < 5$	$PM_{NAEF} < 2,5$
2	$98 > \eta_{NAE,N} \geq 92$	$30 \leq CO_{NAEF} < 70$	$50 \leq NOx_{NAEF} < 60$	$5 \leq OGC_{NAEF} < 10$	$2,5 \leq PM_{NAEF} < 5$
3	$92 > \eta_{NAE,N} \geq 85$	$70 \leq CO_{NAEF} < 150$	$60 \leq NOx_{NAEF} < 70$	$10 \leq OGC_{NAEF} < 15$	$5 \leq PM_{NAEF} < 15$
4	$85 > \eta_{NAE,N} \geq 80$	$150 \leq CO_{NAEF} < 250$	$70 \leq NOx_{NAEF} < 80$	$15 \leq OGC_{NAEF} < 20$	$15 \leq PM_{NAEF} < 25$
5	$80 > \eta_{NAE,N} \geq 75$	$250 \leq CO_{NAEF} < 350$	$80 \leq NOx_{NAEF} < 90$	$20 \leq OGC_{NAEF} < 25$	$25 \leq PM_{NAEF} < 35$
6	$\eta_{NAE,N} < 75$	$CO_{NAEF} \geq 350$	$NOx_{NAEF} \geq 90$	$OGC_{NAEF} \geq 25$	$PM_{NAEF} \geq 35$
Einzelklassenwert					

CycleTest Abschlussbericht



Bestimmung der Realemissionen und des Nutzungsgrads von kleinen automatisch beschickten Holz-Zentralheizungskesseln mittels Lastzyklus-Methode

– Methodenentwicklung und Ergebnisse einer
Serienprüfung

Detaillierter Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 22409818

Autoren

Sabine Feldmeier
Claudia Schön
Hans Hartmann
Markus Schwarz
Paul Roßmann

Straubing und Wieselburg, Dezember 2022

Titel: Bestimmung der Realemissionen und des Nutzungsgrads von kleinen automatisch beschickten Holz-Zentralheizungskesseln mittels Lastzyklus-Methode (CycleTest) – Abschlussbericht

MitarbeiterInnen
Stephan Winter-Thoma (TFZ)
Tobias Rohrmeier (TFZ)
Daniel Fera (TFZ)
Elisabeth Rist (TFZ)
Thomas Kießlinger (TFZ)
Albert Maierhofer (TFZ)
Anja Rocktäschel (TFZ)
Hans-Martin Behr (DEPI)
Jakob Bosch (DEPI)
Kevin Spieker (DEPI)

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages unter dem Förderkennzeichen 22038918 gefördert. Die Projektlaufzeit geht vom 01.07.2019 bis zum 30.09.2022. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

© 2022
Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), Straubing

Alle Rechte vorbehalten.
Kein Teil dieses Werkes darf ohne schriftliche Einwilligung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt, verbreitet oder archiviert werden.

Unter Verwendung mineralölfreier Druckfarben (Mineralölanteil <1 %) gedruckt auf chlorfreiem Papier aus nachhaltiger, zertifizierter Waldbewirtschaftung.

ISSN: 1614-1008
Hrsg.: Technologie- und Förderzentrum
im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ)
Schulgasse 18, 94315 Straubing
E-Mail: poststelle@tfz.bayern.de
Internet: www.tfz.bayern.de

Redaktion: Schön
Gestaltung: Schön
Verlag: Eigenverlag
Erscheinungsort: Straubing
Erscheinungsjahr: 2022

Fotos: TFZ; BEST



Danksagung

Wir danken den Kesselherstellern, die uns während des Projekts durch Überlassung von Versuchskesseln unterstützt haben und ggf. beim Kesselbetrieb unterstützend tätig waren. Auch danken wir dem beteiligten Projektbeirat für die Hinweise und Ergänzungen während der Projektbearbeitung.

Abstract

Ziel des Teilvorhabens 2 war die Entwicklung, vollständige Ausarbeitung und Validierung einer praxisnahen Prüfmethode zur Beurteilung der Effizienz (Nutzungsgrad) und des Emissionsverhaltens von häuslichen Holz-Zentralheizungen im Realbetrieb. Die Methode sollte sich als Prüfgrundlage für ein Zertifizierungsprogramm für automatisch beschickte Pellet- und Hackschnitzelkessel eignen. Sie basiert auf einem Lastzyklus für eine Prüfstandsmessung, der den Lastverlauf eines Kessels über das Jahr hinweg proportional und praxisnah abbildet. Dadurch wird - anders als bei Anwendung der in der DIN EN 303-5 definierten Methode für die Typenprüfung - eine realitätsnahe Bewertung eines Kessels ermöglicht. Die Methode sollte erprobt dokumentiert und validiert sein, sowie von externen Prüfinstituten nachvollzogen werden können.

Die CycleTest-Prüfung sollte für die Hersteller hochwertiger Holzkessel die Möglichkeit schaffen, die hohe Effizienz und das auch im Benutzungsalltag gegebene Emissionsverhalten ihrer Produkte nachzuweisen, um somit besonders fortschrittliche Technologien identifizieren und hervorheben zu können.

Die im Projekt erfolgreich entwickelte Prüfmethode ist dem hier ebenfalls dargestellten ausführlichen Prüfstandshandbuch dargestellt. Es wurde ausschließlich in englischer Sprache abgefasst und beinhaltet alle Aspekte der Prüfung, d. h. Versuchsaufbau und messtechnische Durchführung mit Fokus auf Pelletkessel ohne Pufferspeicheranbindung, wobei unterschiedliche kesselspezifische hydraulische Anbindungen (mit und ohne hydraulische Weiche) und verschiedene Temperaturniveaus zur Anwendung kommen können. Der prinzipielle Versuchsaufbau folgt zwar den relevanten Normen (EN 304, EN 303-5), jedoch gehen die Anforderungen, die an die Prüfumgebung, Messtechnik, Prüfstandsausstattung, Kesselbedienung, Personalbedarf, Brennstoff, Auswertung und prüfinternes Qualitätsmanagement gestellt werden, weit über die genannten Normen hinaus.

Die Methode wurde in einem Ringversuch erprobt, zwei verschiedene Pelletkessel wurden damit auf 6 Feuerungsprüfständen untersucht, wobei zusätzlich auch eine stationäre Nenn- und Teillastmessung erfolgte. Die Validierungsergebnisse zeigen, dass die Umsetzung der neuen Methode eine große Herausforderung für Mess- und Prüfstellen bedeutet. Jedoch werden im Vergleich zur etablierten Kesselprüfmethode nach DIN EN 303-5 kaum höhere Messwertschwankungen produziert, obwohl für die neue Methode noch keine langjährigen Erfahrungen bei den beteiligten Prüfständen vorlagen.

Zugleich wurden in einer Reihenuntersuchung an insgesamt 11 Zentralheizungen (8 x Pellet, 2 x Hackschnitzel, 1 x Heizöl) eine Datengrundlage für die Beurteilung der realen Emissionen und Nutzungsgrade von automatisch beschickten häuslichen Holzheizungen geschaffen, und es wurde zugleich auch die Frage nach der Wirkung eines Pufferspeichers unter Lastzyklusbedingungen beantwortet.

Inhaltsverzeichnis

Abstract	9
Abbildungsverzeichnis	11
1 Ziel	19
2 Entwicklungsschritte und untersuchte Aspekte	21
2.1 Recherche zu den gängigen Regelungskonzepten	21
2.2 Optimierung des Lastzyklus	22
2.3 Pufferspeichereinbindung	25
2.4 Erfassung des Brennstoffverbrauchs	32
2.5 Parameter des Wärmeübertragungssystems im Lastzyklusbetrieb	35
2.6 Anwendung der Lastzyklus-Methode bei Brennwertfeuerungen	36
2.7 Definition der zulässigen Prüfbrennstoffe	37
2.8 Bestimmung von Gesamtstaub-Emission und Abgasvolumenstrom	39
2.9 Anpassung der Brennstoffzufuhr für Hackschnitzelkessel	41
2.10 Einheitliche Auswertung	42
2.11 Die finale Lastzyklus-Methode	43
3 Die Lastzyklus-Methode - Technische Herausforderungen	47
3.1 Vorbereitung - Anforderungen an die Infrastruktur des Prüfstandes	47
3.2 Durchführung - Zeitmanagement und relevante Versuchsabschnitte	49
3.3 Auswertung - Bewertung der Datenqualität	50
4 Validierung der Lastzyklus-Methode	53
4.1 Organisation des Ringversuchs	53
4.1.1 Auswahl der Feuerungen und Hinweise zum Kesselbetrieb	53
4.1.2 Auswahl der teilnehmenden Prüfinstitute	54
4.1.3 Versuchsumfang und Durchführung	54
4.1.4 Versuchsbrennstoff	54
4.1.5 Validierung der Messdaten	55
4.2 Ergebnisse des Ringversuchs	56
4.2.1 Rahmenbedingungen an die Prüfstände und Validierung der Datenqualität	56
4.2.2 Prüfung der Einstellungen an den Feuerungen	58
4.2.3 Vergleich von Effizienz und Emissionen	62
4.3 Bestimmung der Wiederholbarkeit (am gleichen Prüfstand)	70
4.4 Vergleich des Kesselzustands zu Beginn und am Ende des Ringversuchs	71
4.5 Zusammenfassung der Validierung der Lastzyklus-Methode	73

5	Erstellung der Datengrundlage (Serienuntersuchung)	75
5.1	Material.....	75
5.1.1	Eingesetzte Feuerungen	75
5.1.2	Pufferspeicher.....	77
5.1.3	Versuchsbrennstoffe.....	78
5.1.4	Prüfberichte mit Ergebnissen der Typenprüfung	81
5.2	Ergebnisse für die Serienuntersuchung ohne und mit Pufferspeicheranbindung	81
5.2.1	Feuerungsseitiger Einfluss bei acht Pelletkesseln	82
5.2.2	Brennstoffseitiger Einfluss bei zwei Holzhackschnitzelfeuerungen	87
5.2.3	Ergebnisse mit dem Ölkessel	94
5.3	Vergleich mit Daten nach Ökodesign-Verordnung	94
5.4	Zusammenfassung der Serienuntersuchung	107
	Zusammenfassung	109
	Quellenverzeichnis	111
6	Anhang: Weitere Messwerte	113
7	Anhang - Erarbeitetes Methodenhandbuch.....	117

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Wärmebedarfskurven nach VDI 4655:2019 (links), daraus resultierendes Standardlastprofil (rechts). Jahreszeiten: W__ = Winter, Ü__ = Übergang, S__ = Sommer; Wochentag: _w_ = Werktag, _s_ = Sonntag; Wetter: __H = heiter, __B = bewölkt	23
Abbildung 2:	Vergleich des Nutzungsgrades und der Gesamtenergiemenge bei unterschiedlichem Puffervolumen.....	28
Abbildung 3:	Vergleich des Nutzungsgrades und der Gesamtenergiemenge bei unterschiedlicher Anbindung der Lastmessstrecke.....	29
Abbildung 4:	Vergleich des Nutzungsgrades und der Gesamtenergiemenge bei unterschiedlicher Regelung der Lastmessstrecke	30
Abbildung 5:	Verlauf von Temperatur in verschiedenen Höhen zwischen 50 cm und 160 cm am Pufferspeicher bei der Ladung mit maximaler Leistung.....	31
Abbildung 6:	Verlauf von Temperatur in verschiedenen Höhen zwischen 50 cm und 160 cm am Pufferspeicher bei Ladung mit Laderegelung	31
Abbildung 7:	Vergleich des Nutzungsgrades und der Energiemenge während des Lastzyklus (linkes Bild) und über gesamte Messung (rechtes Bild) bei unterschiedlicher Pufferladeregelung	32
Abbildung 8:	Überprüfung der mechanischen Entkopplung des Kessels auf der Plattformwaage zur Erfassung des Brennstoffverbrauchs.....	34
Abbildung 9:	Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit bei Nennlast vor und nach der Staubprobenahmestelle ohne Korrekturen mit Profilkfaktoren aufgrund der Einbauten (Versuch vom 07.12.2020).	41
Abbildung 10:	Abgaszusammensetzung (O ₂ , CO ₂ , CO) bei Lastzyklusversuchen an einem Hackschnitzelkessel vor (links) und nach (rechts) der Adaptierung des Austragsbehälters.	42
Abbildung 11:	Versuchsablauf für die Durchführung der Lastzyklus-Methode an einem konventionellen Biomassekessel ohne Brennwerttechnik	45
Abbildung 12:	Versuchsablauf für die Durchführung der Lastzyklus-Methode an einem Biomassekessel mit Brennwerttechnik	46
Abbildung 13:	Kohlenstoffbilanz und erforderliche Daten.	51
Abbildung 14:	Kriterium zur Bewertung der Durchflussabweichung des Prüfstandes	52
Abbildung 15:	Eingesetzte Holzpellets während des Ringversuchs	55
Abbildung 16:	Parameter zur Validierung der Messdaten im stationären Betrieb an zwei Pelletkesseln	55
Abbildung 17:	Einhaltung der Vorgaben an das Wärmeübertragungssystem.....	57
Abbildung 18:	Kohlenstoffbilanz während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln zur Bewertung der Messtechnik des Prüfstandes	58
Abbildung 19:	Vorlauftemperaturen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln..	59

Abbildung 20:	Vergleich von gemessener Leistung bezogen auf Nennleistung. v = Variationskoeffizient.....	60
Abbildung 21:	Restsauerstoffgehalt während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln. v = Variationskoeffizient.....	61
Abbildung 22:	Rahmenbedingung Soll-Temperatur Bewertung der Kesseleinstellungen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln	62
Abbildung 23:	Ergebnisse zur heizwertbezogenen Effizienz im Ringversuchs mit zwei Kesseln. Bei der angegebenen Varianz wurden die Ergebnisse von Labor 4 nicht berücksichtigt, wegen der fehlenden Brennstoffmassenbestimmung. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen.....	63
Abbildung 24:	CO-Emissionen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln. Max. Abw: 15 mg/MJ. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen	65
Abbildung 25:	Org.-C-Emissionen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln. Max. Abw: 3,5 mg/MJ. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen	66
Abbildung 26:	NO _x -Emissionen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln. Max. Abw: 15 mg/MJ. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen	68
Abbildung 27:	Staub-Emissionen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln. Max. Abw: 4,5 mg/MJ. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen	69
Abbildung 28:	Konstruktions-Skizze des Pufferspeichers mit Volumina der einzelnen Anschlussmöglichkeiten. Bildquelle: TWL-Technologie GmbH	77
Abbildung 29:	Untersuchte Holzhackschnitzel-Qualitäten. Buche Energierundholz (oben links), Buche Waldrestholz (oben rechts), Fichte Energierundholz (unten links), Fichte Waldrestholz (unten rechts).....	80
Abbildung 30:	CO-Emissionen von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung	83
Abbildung 31:	Org.-C-Emissionen von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung	84
Abbildung 32:	NO _x -Emissionen von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung	85
Abbildung 33:	Staub-Emissionen von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung	86
Abbildung 34:	Effizienz von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung	87
Abbildung 35:	CO-Emissionen von zwei Holzhackschnitzelkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode,	

	LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte, Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.....	89
Abbildung 36:	Org.-C-Emissionen von zwei Holzhackschnitzelkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte, Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.....	90
Abbildung 37:	NO _x -Emissionen von zwei Holzhackschnitzelkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte, Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.....	91
Abbildung 38:	Staub-Emissionen von zwei Holzhackschnitzelkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte, Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.....	92
Abbildung 39:	Effizienz (brennwertbezogen) von zwei Holzhackschnitzelkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte, Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.....	93
Abbildung 40:	Staubemissionen bei Nennlast und nach Ökodesign als Beispiel für die Besser-Bewertung. Daten von BEST, Auswertungen von TFZ.....	96
Abbildung 41:	Vergleich der CO-Emissionen nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus- Methode mit Pufferspeicher (LCP)	98
Abbildung 42:	Vergleich der Org.-C-Emissionen nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus- Methode mit Pufferspeicher (LCP)	100
Abbildung 43:	Vergleich der NO _x -Emissionen nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus- Methode mit Pufferspeicher (LCP)	102
Abbildung 44:	Vergleich der Staub-Emissionen nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus- Methode mit Pufferspeicher (LCP)	104
Abbildung 45:	Vergleich der Nutzungsgrade nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus- Methode mit Pufferspeicher (LCP)	106

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Standardlastprofil für die Lastzyklus-Methode ohne die anschließende Stillstandsphase	24
Tabelle 2:	Übersicht zu möglichen Pufferspeichern für die Versuche im Rahmen der Entwicklung der Lastzyklus-Methode	26
Tabelle 3:	Untersuchungen zur Erfassung des Brennstoffverbrauchs mit verschiedenen Methoden.....	33
Tabelle 4:	Eigenschaften für den Testbrennstoff Pellets (d - trocken, ar - im Anlieferungszustand)	38
Tabelle 5:	Eigenschaften für den Testbrennstoff Holzhackschnitzel (d - trocken, ar - im Anlieferungszustand).....	39
Tabelle 6:	Definition von Zeitpunkten, Versuchsbedingungen und Abläufe für die Lastzyklus-Methode. Die zuerst genannte Temperatur bezieht sich jeweils auf eine konventionelle Feuerung, die zweite auf eine Brennwertfeuerung.....	44
Tabelle 7:	Anforderungen an die Genauigkeit der Messgeräte für die Lastzyklus-Methode.....	49
Tabelle 8:	Prüftoleranzen nach Tabelle 2 Anhang IV der 2015/1189; Grenzwerte der Emissionen umgerechnet in mg/MJ.....	56
Tabelle 9:	Ermittelte Effizienz: minimaler und maximaler Wert sowie maximale Abweichung. ^A Brennstoffverbrauch wurde nicht kontinuierlich erfasst. ^B Sollwert-Kesseltemperatur vermutlich falsch eingestellt.....	63
Tabelle 10:	CO-Emissionen während des Ringversuch an zwei Pelletkesseln. Bei Labor 4 wurden die Ergebnisse während des Lastzyklus nicht berücksichtigt aufgrund der fehlenden Volumenstrombestimmung (n. b.).	65
Tabelle 11:	Org.-C-Emissionen während des Ringversuch an zwei Pelletkesseln. Bei Labor 4 wurden die Ergebnisse während des Lastzyklus nicht berücksichtigt aufgrund der fehlenden Volumenstrombestimmung. n. b. - nicht bestimmt	67
Tabelle 12:	NO _x -Emissionen während des Ringversuch an zwei Pelletkesseln. Bei Labor 4 wurden die Ergebnisse während des Lastzyklus nicht berücksichtigt aufgrund der fehlenden Volumenstrombestimmung (n. b.). ^A - Kalibration mit veraltetem Prüfgas und somit Überschätzung	68
Tabelle 13:	Staub-Emissionen während des Ringversuch an zwei Pelletkesseln. Bei Labor 4 wurden die Ergebnisse während des Lastzyklus nicht berücksichtigt aufgrund der fehlenden Volumenstrombestimmung (n. b.)	70
Tabelle 14:	Messwerte zur Bestimmung der Wiederholbarkeit der Lastzyklus-Methode am TFZ am Brennwertkessel	71
Tabelle 15:	Vergleich der Messergebnisse zu Beginn und am Ende des Ringversuchs mit dem Brennwertkessel	72

Tabelle 16:	Vergleich der Messergebnisse zu Beginn und am Ende des Ringversuchs mit dem Heizwertkessel	73
Tabelle 17:	Relevante Brennstoff-Eigenschaften der Holzpellets (ar - im Anlieferungszustand "as received", d - trocken, n. b. - nicht bestimmt) ..	79
Tabelle 18:	Relevante Brennstoff-Eigenschaften der Holzhackschnitzel, Fi - Fichte, Bu - Buche, Erh - Energierundholz, Wrh - Waldrestholz, ar - im Anlieferungszustand "as received", d - trocken	80
Tabelle 19:	Relevante Eigenschaften des verwendeten Flüssigbrennstoffs, d - trocken.....	81
Tabelle 20:	Anzahl der Pelletkesselstarts (ohne Kaltstart) während der Lastzyklus-Methode ohne (LC) und mit Pufferspeicheranbindung (LCP)	82
Tabelle 21:	Emissionen und Effizienz des untersuchten Ölkessels	94
Tabelle 22:	Besser-Bewertung der Kessel, wenn die Berechnung nach Ökodesign-Verordnung im Vergleich zur Nennlastmessung erfolgt	96
Tabelle 23:	Heatmap der CO-Emissionen bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerten, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in mg/MJ	99
Tabelle 24:	Heatmap der org.-C-Emissionen bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerten, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in mg/MJ	101
Tabelle 25:	Heatmap der NO _x -Emissionen bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerten, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in mg/MJ	103
Tabelle 26:	Heatmap der Staub-Emissionen bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerten, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in mg/MJ	105
Tabelle 27:	Heatmap der brennwertbezogenen Nutzungsgrade bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerten, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in %, k. A = keine Angaben dazu im Typenprüfbericht.....	106
Tabelle 28:	Emissions- und Effizienzwerte der acht untersuchten Pelletkessel - Teil 1. NL = Nennlast, TL = Teillast, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, HW = heizwertbezogen, BW = brennwertbezogen, n. b. = nicht bestimmt	113

Tabelle 29:	Emissions- und Effizienzwerte der acht untersuchten Pelletkessel - Teil 2. NL = Nennlast, TL = Teillast, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, HW = heizwertbezogen, BW = brennwertbezogen, n. b. = nicht bestimmt	114
Tabelle 30:	Emissions- und Effizienzwerte von Kessel 09, einem Holzhackschnitzelkessel. NL = Nennlast, TL = Teillast, LC = Lastzyklus- Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, HW = heizwertbezogen, BW = brennwertbezogen, n. b. = nicht bestimmt	115
Tabelle 31:	Emissions- und Effizienzwerte von Kessel 10, einem Holzhackschnitzelkessel. NL = Nennlast, TL = Teillast, LC = Lastzyklus- Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, HW = heizwertbezogen, BW = brennwertbezogen, n. b. = nicht bestimmt	116

1 Ziel

Ziel des Vorhabens war die Entwicklung und Validierung einer praxisnahen Prüfmethode zur Beurteilung der Effizienz und des Emissionsverhaltens von Holz-Zentralheizungen im Realbetrieb. Die Methode sollte auf einem Lastzyklus für eine Prüfstandsmessung basieren, welcher den Lastverlauf eines Kessels über das Jahr hinweg proportional und praxisnah abbildet. Dadurch sollte - anders als bei Anwendung der in der DIN EN 303-5 definierten Methode für die Typenprüfung - eine realitätsnahe Bewertung eines Kessels ermöglicht werden.

Die Methode sollte eine messtechnische Grundlage bieten, auf der ein Zertifizierungsprogramm für automatisch beschickte Pellet- und Hackschnitzelkessel aufsetzen kann. Im dafür entwickelten Prüfstandshandbuch sollten neben dem definierten Lastzyklus eine einheitliche Mess- und Auswertungsmethodik sowie die zu verwendenden Prüfbrennstoffe festgelegt werden, um die Vergleichbarkeit der Messungen sicherzustellen. In einem zweiten Schritt sollte die neue Prüfmethode in einem Ringversuch durch erfahrene Institute im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit und die Reproduzierbarkeit bewertet und gegebenenfalls angepasst werden.

Neben der Schaffung und Validierung von methodischen Grundlagen für ein Zertifizierungsprogramm für Holz-Zentralheizungen sollte die Methodenentwicklung auch Ansätze für Kesselentwickler bieten, welche das Betriebsverhalten ihrer Ablagen im Benutzungsalltag bewerten und optimieren möchten. Das könnte auch für Werksprüfstände relevant sein, welche die Bewertung ihrer Anlagen in einer realen Wärmeversorgungssituation prüfen und optimieren möchten, z. B. indem sie die Kesselsteuerung und -regelung an die Betriebsbedingungen eines permanent wechselnden Wärmebedarfs optimal anpassen.

Die Ergebnisse der nach dieser Methode gemessenen Kessel würden außerdem Planer, Installateure, Energieagenturen und Fördermittelgeber in die Lage versetzen, verschiedene Kessel realitätsnah zu bewerten und besonders fortschrittliche Technologien zu identifizieren und hervorzuheben. Durch Anwendung der neuen Methode auf eine Vielzahl von heutigen automatisch beschickten Zentralheizungsanlagen sollte zugleich eine ausreichende Datenbasis erarbeitet werden, die den Stand der Technik unter den hier definierten, besonderen Prüfbedingungen charakterisiert.

Generell sollte mit der neuen Methode aber auch der wachsenden Kritik an der geringen Aussagefähigkeit der bisherigen Typenprüfmethode begegnet werden. Es wird erwartet, dass diese Kritik zunehmen wird, weil seit 2020 mit der Ökodesignrichtlinie die vorgegebenen Berechnungsmethoden für den "Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad" sowie für die "Raumheizungs-Jahres-Emissionen" Anwendung finden, wodurch die Wirklichkeit weiter verzerrt wird. Derartigen Hemmnissen sollte das Projekt vorbeugen und gleichzeitig eine international umsetzbare Real-Messmethode als Alternative auch für normative Zwecke anbieten.

2 Entwicklungsschritte und untersuchte Aspekte

Der Ablauf der Lastzyklus-Methode wurde im ersten Projektjahr zunächst ausgearbeitet, abgestimmt, erprobt und vorläufig festgelegt. Die hier notwendigen Arbeiten bauten unmittelbar auf den Erfahrungen des EU-Projektes "BioMaxEff" [18] auf. In den vorherigen Projekten blieben viele Detailfragen und konkrete Aussagen zur Messvorschrift offen. Diese offenen Fragen sollten gelöst werden und die Herangehensweise wird nachfolgend erläutert.

2.1 Recherche zu den gängigen Regelungskonzepten

Mit modernen Reglern kann die Effizienz von Biomassefeuerungen gesteigert und gleichzeitig deren Emissionen gesenkt werden. In der Vergangenheit wurden eine Vielzahl von möglichen Regelalgorithmen für Heizungs- und Feuerungsregelungen in der Fachliteratur vorgestellt und beschrieben, jedoch haben es nur wenige bis zur Serienreife geschafft bzw. sind auch am Markt zu finden.

Mögliche Technologien wären in diesem Zusammenhang z. B.:

- Niedertemperaturkessel mit Außentemperatursteuerung,
- Einbindung von Wetterprognosedaten,
- Optimierte Pufferspeicherladeverhalten,
- Anbindung an Smart Home.

Die Festlegung der Lastzyklus-Methode sowie deren Implementierung in die Steuerung des Wärmeübertragungssystems setzen voraus, dass diese Konzepte bekannt sind und wenn notwendig auch entsprechend berücksichtigt wurden.

Es wurde daher eine Recherche über die gängigsten Regelungskonzepte und neuen Produktvarianten durchgeführt. Diese Recherche umfasste 44 Hersteller bzw. Generalvertriebspartner von Biomassekleinfeuerungen und deckt nahezu den gesamten Absatz an Pellet- und Hackgutfeuerungen für die Raumwärmeerzeugung in Deutschland und Österreich ab.

Die Recherche zeigte auch, dass bereits 36,4 % der Hersteller von Pelletkesseln (Marktanteil: 75,2 %) Brennwertkessel anbieten im Jahr 2017 [17]. Demgegenüber liegt deren Anteil bei Hackgutfeuerungen (Marktanteil: 15,8 %) nur bei 12,0 %. Da es sich dabei manchmal nur um eine Zusatzausstattung handelt, bieten jedoch nur 27,3 % der Hersteller (mit 43,2 % Marktanteil) echte Niedertemperaturkessel bzw. Kessel mit gleitender Temperaturführung an, bei denen auch Solltemperaturen unterhalb des Taupunkts des Abgases möglich sind. Obwohl derzeit (Stand: 2017 und [17]) nur 5,9 % der in Deutschland verkauften Biomassefeuerungen mit einer Brennwerttechnologie ausgestattet sind, wurden diese bei der Entwicklung der Methode berücksichtigt. Mit dieser Technologie lässt sich der eingesetzte Brennstoff noch effizienter nutzen, da aufgrund der zusätzlichen

Abkühlung der Abgase der Wasserdampf noch kondensieren kann. Dies erfordert jedoch im zu beheizenden Gebäude ein Heizsystem mit niedrigen Rücklauftemperaturen (z. B. Fußbodenheizung) sowie einen Abfluss für das anfallende Kondensat.

Fast jeder Kesselhersteller bietet eine Smartphone-App an, welche einen Zugriff auf die Kesseldaten erlaubt. Während diese zunächst nur eine Remoteverbindung auf die Kesselsteuerung war, haben nun die meisten Hersteller bereits auf serverbasierte Systeme umgestellt, da dies den Verbindungsaufbau wesentlich vereinfacht. Dadurch sind heute viele Pellet- und Hackgutkessel mit dem Internet verbunden. Die Netzwerkfähigkeit wird jedoch nur von wenigen Herstellern für die Kesselsteuerung genutzt: nur 9,1 % der Kesselhersteller erlauben die Verwendung von Online-Wetterdaten.

Ein direkter Zugriff auf die Kesseldaten durch die Gebäudeleittechnik oder Smart-Home-Systeme wird von einigen Herstellern unterstützt, wobei dies meist einen Aufpreis bedeutet und daher im privaten Wohnbau kaum Verwendung findet. Die Kommunikation ist nahezu immer auf das Lesen der Daten beschränkt, d.h. die Gebäude-Leittechnik (GLT) kann den Kesselbetrieb nicht steuern, sondern nur überwachen, wobei bei vielen Herstellern dafür das Modbus-Protokoll eingesetzt wird. Aus diesem Grund ist dieser Aspekt nicht weiter in der Methode berücksichtigt bzw. untersucht worden.

Aus den öffentlich zur Verfügung stehenden Dokumenten der Kesselhersteller lässt sich in den wenigsten Fällen ermitteln, welche Regelalgorithmen für Leistungsregelung eingesetzt werden. Auch geben die Hersteller selten an, ob der Kessel die Leistung nur in wenigen, vordefinierten Stufen einstellen kann, oder ob es eine kontinuierliche Leistungsregelung gibt. Aus der Erfahrung mit Biomassekesseln am Prüfstand ist jedoch bekannt, dass einige Hersteller für die Leistungsregelung der Kessel aufgrund des stabilen Regelverhaltens immer noch P-Regler einsetzen. Dabei wird die Leistung, abhängig von der Temperatur zur Kesselsolltemperatur meist in Stufen abgesenkt. Da diese Kessel im Betrieb unter Volllast nie die vorgegebene Solltemperatur erreichen, muss die Kesselregelung für den Prüfzyklus auf eine höhere Solltemperatur eingestellt werden.

Viele Kesselhersteller verwenden bereits PID-Regler, die diese Limitierung nicht besitzen, hier wird die Kesselleistung entsprechend dem realen Wärmebedarf moduliert. Höhere Regelalgorithmen wie etwa modellbasierte Regler werden nach den bisherigen Erfahrungen nicht eingesetzt.

2.2 Optimierung des Lastzyklus

Anhand aktueller Betriebsdaten wurde geprüft, inwieweit der bislang lediglich an einer Bauart von Pelletkesseln erprobte Normlastzyklus, dessen frühere Versions im Rahmen einer Forschungszusammenarbeit von TFZ und BEST (ehemals als BE2020+) gemeinsam entwickelt wurde [16] [3], auch für andere Bauweisen sowie für Hackschnitzelkessel anwendbar ist. Insbesondere zweitgenannte besitzen aufgrund der schwereren Bauart ein trägeres Aufheiz- und Regelungsverhalten. Daher sollte die Phase der Nennlast zu Versuchsbeginn verlängert werden, da die [16] in definierte Zeit von lediglich 04:52 Minuten

als deutlich zu kurz erschien und der Kessel somit nicht die Möglichkeit hatte, überhaupt annähernd in die optimale Betriebsweise zu kommen. Für die Arbeiten am Prüfstand erfolgte eine Auswahl von in dieser Hinsicht anspruchsvollen Prüfkesseln. Im Ergebnis sollte der für Pellet- und Hackschnitzelfeuerungen verwendete Lastzyklus identisch sein und eine realitätsnahe Abbildung des Kesselbetriebs darstellen.

Das bisher auf den Wärmebedarfsdaten der VDI Richtlinie 4655 aus dem Jahr 2008 basierende Lastprofil wurde weiterentwickelt [1] [16], denn im September 2019 wurde eine neue Version dieser Richtlinie veröffentlicht [2]. Die Wärmebedarfskurven nach der neuen Version der VDI 4655 sind für die verschiedenen Jahreszeiten, Wochentage und Wetterlage in Abbildung 1, links, grafisch dargestellt. Basierend auf der neuen Datengrundlage entstand das neue Standardlastprofil in Abbildung 1, rechts, welches über insgesamt acht Stunden abgefahren werden soll.

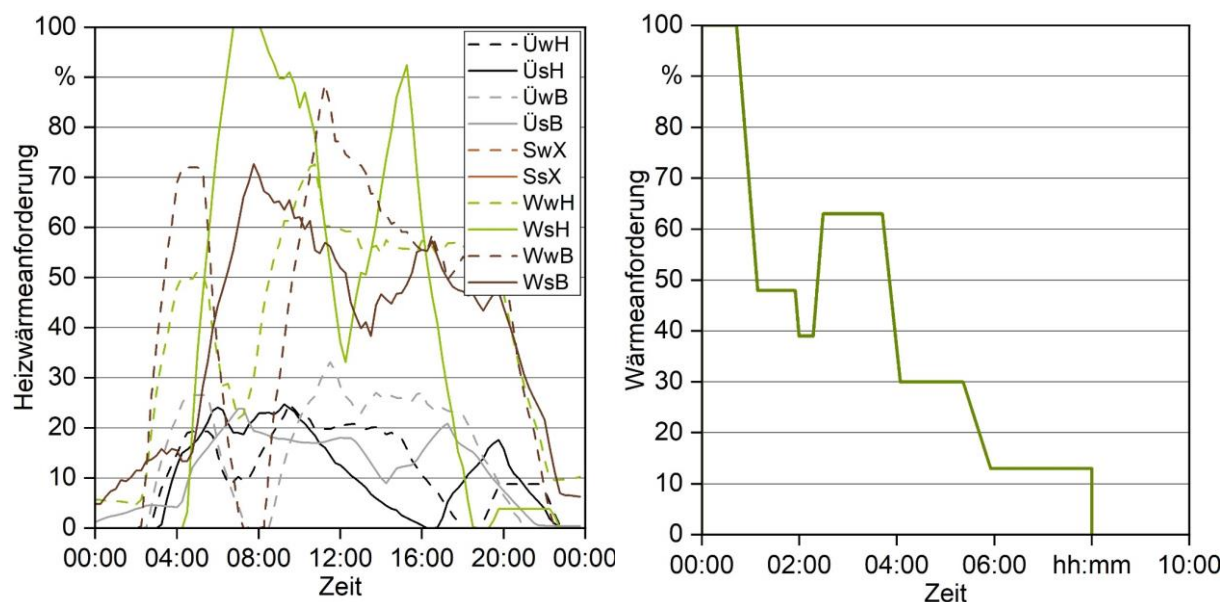


Abbildung 1: Wärmebedarfskurven nach VDI 4655:2019 (links), daraus resultierendes Standardlastprofil (rechts). Jahreszeiten: W = Winter, $Ü$ = Übergang, S = Sommer; Wochentag: $_w$ = Werktag, $_s$ = Sonntag; Wetter: $_H$ = heiter, $_B$ = bewölkt

Die Wärmeanforderungen und deren Haltezeiten sind in der nachfolgenden Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Standardlastprofil für die Lastzyklus-Methode ohne die anschließende Stillstandsphase

Wärmeanforderung [%] (mit Pfeil: Lastwechsel)	Haltedauer [hh:mm:ss]	Gesamte Versuchszeit [hh:mm:ss]
0	0	0
100	00:42:34	00:42:34
100 → 48	00:26:00	01:08:34
48	00:46:05	01:54:39
48 → 39	00:04:30	01:59:09
39	00:17:43	02:16:42
39 → 63	00:12:00	02:28:52
63	01:13:00	03:41:52
63 → 30	00:20:00	04:03:52
30	01:17:34	05:21:26
30 → 13	00:34:00	05:55:26
13	02:04:34	08:00:00
0	00:00:00	08:00:00

Zusätzlich zum reinen Acht-Stunden-Lastprofil sind weitere vorbereitende und nachbereitende Tätigkeiten zu berücksichtigen, so dass für die Durchführung eines Versuchs nach der Lastzyklus-Methode ein Zeitraum von weniger als 24 Stunden erforderlich ist:

- Kalibrierung von Gasanalysatoren und Einbau von Messgeräten in die Prüfstrecke, Kessel mit ausreichend Brennstoff befüllen: 01:00 bis 02:00 Stunden
- Vor-Temperierung des Kessels auf eine definierte Temperatur: 00:30 Stunden
- Lastprofil („Verbrennungsphase“): 08:00 Stunden mit Messung
- Abkühl-/Standby-Phase: 12:00 Stunden ohne Messung
- Re-Temperierung des Kessels auf die gleiche definierte Temperatur wie zu Beginn: 00:30 Stunden
- Ggf. erneute Überprüfung der Gasanalysatoren auf Richtigkeit und Ausbau der Messgeräte: 00:30 Stunden

Bei der Definition der Abkühl- bzw. Standby-Phase, die für nachts vorgesehen ist, wurde darauf geachtet, dass es zeitlich möglich ist, alle mit dem Lastzyklus-Versuch verbundenen Tätigkeiten innerhalb der gesetzlich erlaubten Arbeitszeit zu erledigen. Die Versuche können somit durchgeführt werden, ohne zusätzliche Abläufe zu automatisieren oder zusätzliches Personal einzusetzen, wobei eine Automatisierung gewisser Komponenten nicht aufwendig, aber sehr anwendungsfreundlich wäre, z. B. Integration eines Timers

zum Ein- und Abschalten der Umwälzpumpe und eines Steuerungs-Relais zum Ein- und Abschalten der elektrischen Heizung für die Temperierung des Kessels.

2.3 Pufferspeichereinbindung

Die Installation von Biomassefeuerungen ist meist ohne Pufferspeicher (gesetzlich) möglich, jedoch wird die Installation des Kessels nur gefördert (BAFA [4][5], BEG), wenn ein Pufferspeicher verwendet wird. Zusätzlich empfehlen viele Kesselhersteller diesen Betrieb mit Pufferspeicher, um die Effizienz zu steigern.

Diese aktuellen Entwicklungen zeigen, dass es zukünftig erforderlich ist, die Messung mit einem realen Pufferspeicher durchzuführen. Dadurch würde der Tatsache Rechnung getragen, dass Kessel mit neuartigen Regelungskonzepten inzwischen auch verstärkt den Pufferspeichereinsatz selbst steuern bzw. die angesteuerte Heizlast des Kessels anhand des momentan gegebenen Ladezustands wählen. Basierend auf der o. g. Recherche zu den gängigen Regelungskonzepten (Abschnitt 2.1) wurden im Rahmen von Versuchen mit und ohne Pufferspeichereinbindung die Anforderungen an den Versuchsaufbau für die Normprüfung festgelegt.

Auf dem Markt sind Pufferspeicher mit einem Volumen von bis zu 5.000 Litern erhältlich, wobei jedoch nur wenige unterschiedliche Volumina verfügbar sind. Die Volumenvorgaben für Pufferspeicher für automatische Hackschnitzelfeuerungen liegen bei 50 L/kW Nennleistung, für Pelletfeuerungen bei 30 l/kW Nennleistung. Der Versuchsaufbau sollte daher möglichst flexibel gestaltet werden, um ein Spektrum an möglichen Puffergrößen mit Kesseln unterschiedlicher Nennwärmeleistung abzudecken. Ergebnisse der Recherche sind in der folgenden Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: *Übersicht zu möglichen Pufferspeichern für die Versuche im Rahmen der Entwicklung der Lastzyklus-Methode*

Hersteller	Modell	Qualität der Isolierung	Verlust in W	Bodenablass	Laderohr	keine Schichtleitvorrichtung	Anschlussebenen	Baugrößen in mm
Austria Email	PSM 800	C/1	108	-	- / Leitbleche	+	4/100°	500/800/1000
Huch	PSX-ECO 800	C/1	134	-	- / Leitbleche	+	4/~90°	500/600/800/850/1000
Juratherm	JPSM 825	B/1	83	-	-	+	4/90°	480/560/718/815/887/995
OEG	516008055	A+	k. A.	-	+	+	4/90°	516/804/999
Reflex	Storatherm Heat HF 800	C/1	132	-	-	+	4/100°	500/800/100/1500
Sailer	HLE 850 + 200mm Vlies	A?	k. A.					550/850/1050
Sailer	HLE 850	B/1	87	-	+	(+) / Verteilbleche	4(7)/0°	
Solarbayer	SLS-800-Plus	A/2	64	(+)	+	+	2/90°	489/801/934/1505
Solimpeks	Solibuffer 800	B/1	k. A.	+	-	+	3/180°	500/800/1000
STAG	SP 850	C/1	166	+?	-	+	4/90°	500/600/750/850/1000
tml	PF 00800R	C/1	83	-	+	+	4/90°	500/800/1000
TWL	P.0800-180 Iso-A	A/1	69	-	+	(kurze)	5/180° R1+R11/2	500/800/1079
TWL	P.0800-90 Iso-B	B/1	73	-	-	+	4/90°	500/800/1079
unitec	PF750	C/1	104	+	+	+	4/90°	476/585/755/932
weishaupt	WES 910	A/1	73	(+)	-	+	4/0° (2+2)	652/903
Wikora	WPH 805	B	86	-	- / Leitbleche	+	4	500/800/1000
Zeeh	P750	B	90	-	-	Schichtungskäfig	>=2	600/650/750/850/1000

Für eine Prüfmethode ist gegebenenfalls die Definition eines "Norm-Pufferspeichers" (inkl. Verrohrung) erforderlich. Als variable Lösung für die Verbrennungsversuche wurde ein Pufferspeicher ausgewählt, der unterschiedliche Anschlusshöhen ermöglicht, um breites ein Spektrum an möglichen Speichervolumina abzudecken.

Bei BEST wurden praktische Versuche mit Pufferspeicher durchgeführt, um Erfahrung im Umgang mit der Pufferspeicheranbindung an den Kesseln zu gewinnen und relevante Parameter für die Betriebsführung zu identifizieren. Die Messungen wurden an einem ersten, noch nicht optimierten Versuchsaufbau mit einem Pufferspeicher mit einem Volumen von

825 Liter durchgeführt, welcher entsprechend der Energieeffizienzklasse C gedämmt war. Beim Kessel handelte es sich um einen 15 kW Pelletkessel mit Unterschubfeuerung. Dieser war über isolierte Kupferleitungen der Stärke DN25 mit dem Pufferspeicher verbunden. Die Einstellungen der Kesselsteuerung wurden an die Vorgaben der Lastzyklus-Methode angepasst, wobei die Sollkesseltemperatur 3 K höher als die Vorlauf-Solltemperatur des Lastzyklus gesetzt wurde, um das Heizmedium mit 70 °C im Vorlauf aus dem Puffer abziehen zu können.

Die erste Messserie diente der Festlegung der Rahmenbedingungen für die Durchführung der Lastzyklus-Methode. Folgende Punkte waren dabei von besonderem Interesse:

- Volumen des Pufferspeichers,
- Verschaltung für Anbindung des Kessels an den Puffer,
- Methode der Limitierung der Lastabnahme.

Bei den ersten Messungen zeigte sich, dass das Puffervolumen einen großen Einfluss auf das Kesselbetriebsverhalten und somit auf Emissionen und Nutzungsgrad hatten, Abbildung 2. Das Puffervolumen musste im Sinn der Prüfung so gewählt werden, dass der Kessel vor dem Ende des Lastzykluses autonom seinen Betrieb beendet. In den Messungen, bei welchen das Puffervolumen durch Umpositionierung des Kesselrücklaufs variiert wurde, zeigte sich, dass dies unter einem Wert von 40 l/kW der Fall ist. Durch den größeren Pufferspeicher ist die vom Kessel produzierte Gesamtenergie höher, der Nutzungsgrad steigt dann ebenfalls an.

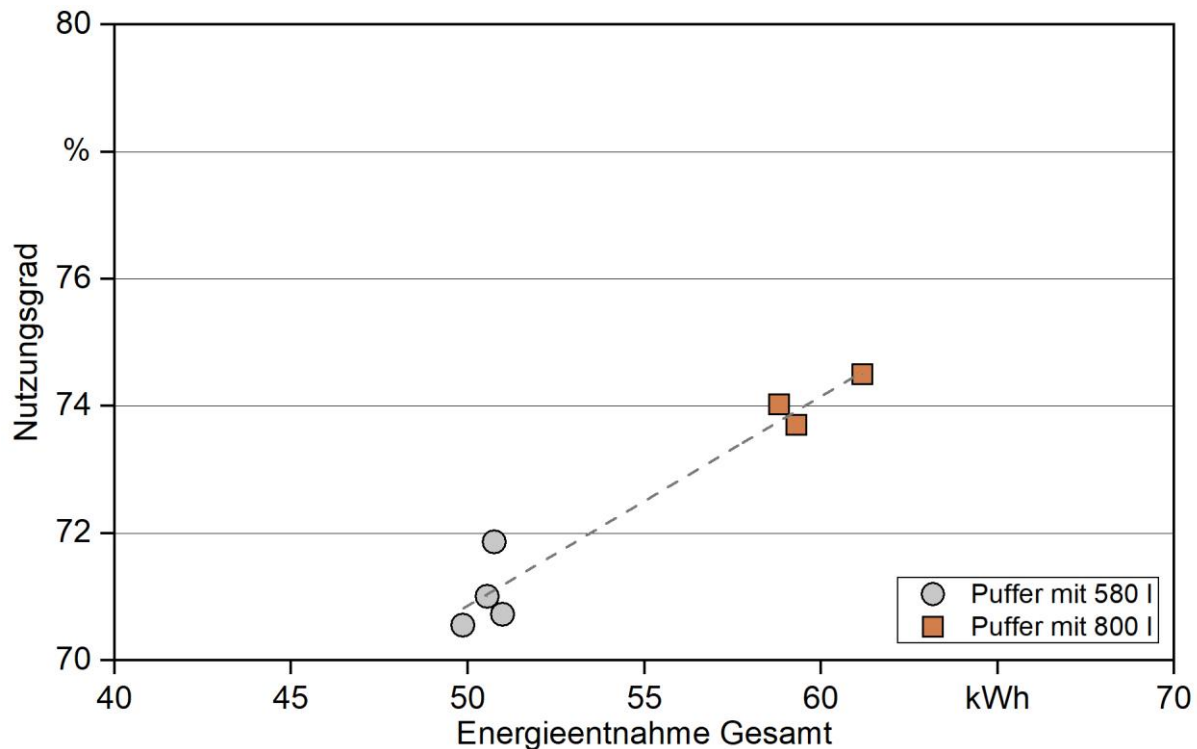


Abbildung 2: Vergleich des Nutzungsgrades und der Gesamtenergiemenge bei unterschiedlichem Puffervolumen

Hinsichtlich der Verschaltung des Kessels mit dem Pufferspeicher gibt es zwei gängige Installationsarten. Entweder bezieht der Heizkreis die Wärme aus den Anbindungsleitungen des Kessels an den Puffer (T-Anschluss) oder er zieht über getrennte Anschlüsse die Wärme direkt aus dem Puffer, welcher dadurch als hydraulische Weiche agiert und den Druck der Förderpumpe des Heizkreises kompensiert.

Prinzipiell lieferten beide Anbindungsarten ähnliche Resultate, wobei bei der Anbindung über T-Anschluss ein hoher Volumenstrom im Heizkreis zu erhöhten Rohrleitungsverlusten führen kann, welches zu einer stärkeren Varianz der Resultate führt, Abbildung 3. Daher stellt die Variante mit getrennten Anschlüssen für Kessel und Leistungsmessstrecke (Weiche) die bevorzugte Installation dar.

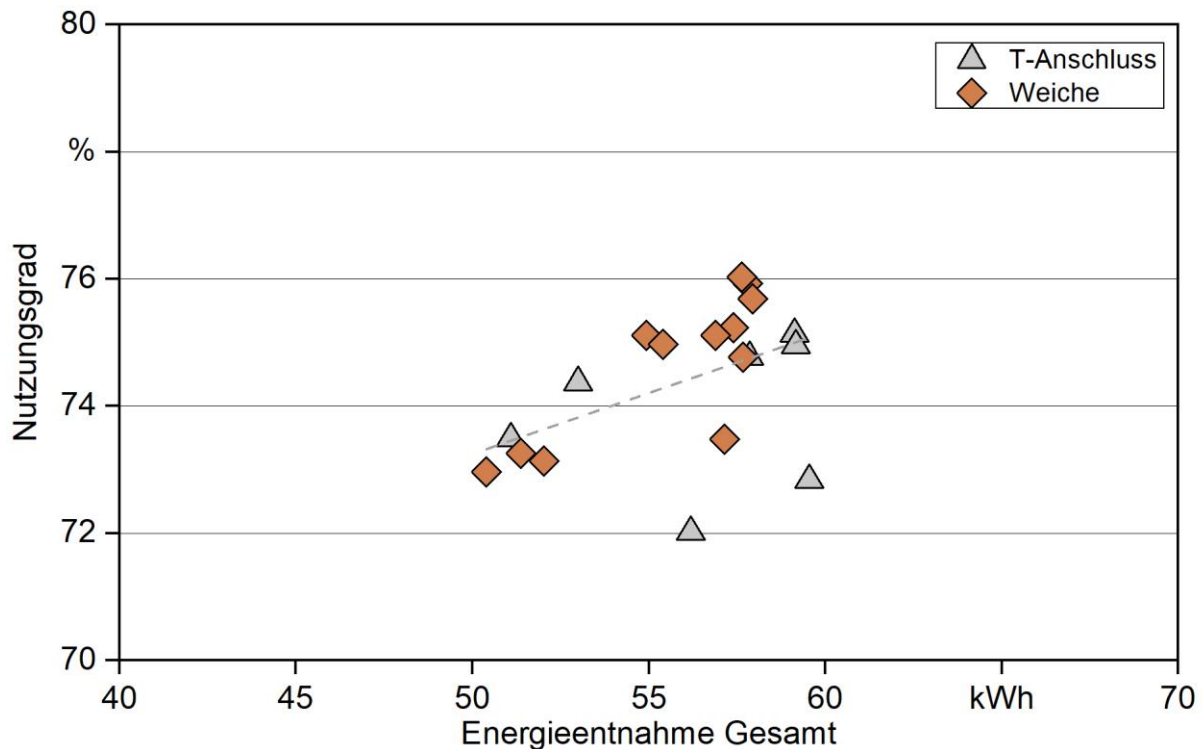


Abbildung 3: Vergleich des Nutzungsgrades und der Gesamtenergiemenge bei unterschiedlicher Anbindung der Lastmessstrecke

Ein wesentlicher Punkt ist auch welche Verfahrensweise zur Limitierung der Heizleistung angewendet werden soll, und welche Auswirkungen dies auf die Resultate hat. Prinzipiell stehen 4 Varianten zu Verfügung, um die Schwankungen in der Vorlauftemperatur zu kompensieren:

- FlowReg: Anpassung des Volumenstroms, konstante Rücklauftemperatur,
- TempReg: Anhebung der Rücklauftemperatur, konstanter Volumenstrom,
- PropReg: Kombinierte Variante, wobei Volumenstrom proportional zur Solllast ist und die Leistung über die Rücklauftemperatur geregelt wird,
- FlowProp: Vereinfachte Variante, Volumenstrom proportional zur Solllast, Rücklauftemperatur konstant.

Unter Berücksichtigung der bei den Versuchen zusätzlich variierten Parametern (Anbindung, Kesselregelung) lieferten die Messungen mit kombinierter Regelung die stabilsten Resultate, Abbildung 4. Bei den Versuchen mit der vereinfachten Variante wurde zu viel Wärme an den Heizkreis geschickt, wodurch die Gesamtenergieabgabe bei den meisten Messungen im Vergleich zu den anderen Versuchen höher war. Eine Leistungslimitierung durch Anhebung der Rücklauftemperatur führt zu erhöhten Wärmeverlusten und beeinträchtigt die Schichtung des Warmwassers im Pufferspeicher. Die als PropReg bezeichnete Variante lieferte die besten Ergebnisse, da die Resultate stabil waren. Durch die schnelle primäre Leistungslimitierung über den Durchfluss als Funktion der Sollleistung ist auch die Umsetzung in der Praxis vereinfacht. Die Einhaltung der vorgegebenen

Sprenzung über einen Regelkreis für die Rücklauftemperatur kann damit unkompliziert kombiniert werden.

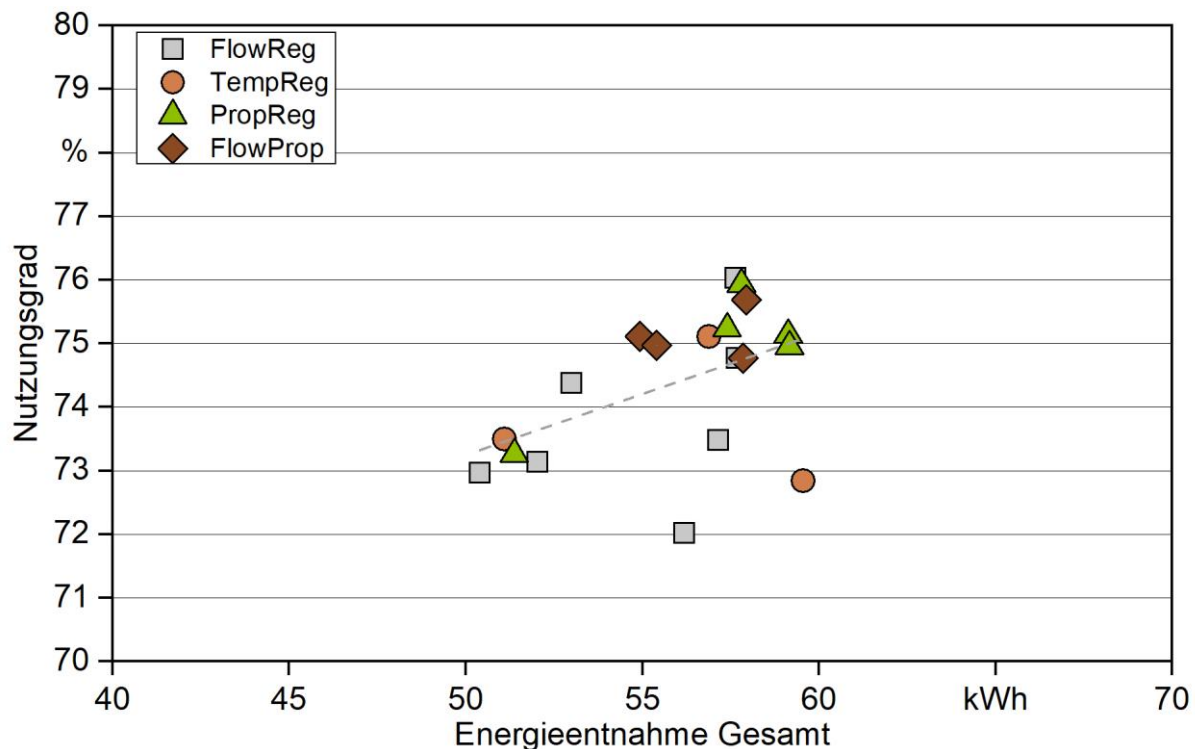


Abbildung 4: Vergleich des Nutzungsgrades und der Gesamtenergiemenge bei unterschiedlicher Regelung der Lastmessstrecke

Bei den praktischen Versuchen mit Pufferspeicher bei BEST wurde auch der Volumenstrom als relevanter Parameter identifiziert, da er entscheidend ist für die Temperaturerhöhung beim Durchlauf des Wassers durch den Kessel. Ist der Volumenstrom zu hoch eingestellt, so muss das Wasser mehrfach Kessel und Puffer durchströmen, bis es die Puffersolltemperatur erreicht hat. Da der Volumenstrom ein Parameter ist, welcher vom Kunden nie verändert wird, muss er vom Hersteller bei der Installation, oder falls der Kessel eine drehzahlregelbare Pumpe besitzt, durch die Kesselsteuerung eingestellt werden.

Verschiedene Hersteller bieten in der Zwischenzeit auch eine optimierte Regelstrategien für die Pufferladung an. Während es vor einigen Jahren noch Stand der Technik war, dass der Puffer im Nennlastbetrieb des Kessels geladen wurde, erfolgt dies bei einigen Kesseln nun bei modulierender Kessellast, sehr oft auch in Kombination mit einer Drehzahlregelung der Pufferladepumpe. Bei dem Pelletkessel, der für diese Messserie herangezogen wurde, konnte zwischen der klassischen Ladung bei Nennlast (Abbildung 5) und einem alternativen Regelalgorithmus für eine optimierte Pufferladung umgeschaltet werden. Bei diesem wurde die Kessellaststufe reduziert, sobald die Temperatur am oberen Pufferfühler (160 cm über dem Pufferboden) die Solltemperatur erreichte. Durch diese Regelstrategie soll der Kessel länger an einem Betriebspunkt mit höherer Effizienz betrieben werden, der Puffer wird dabei langsamer geladen wie man anhand des Temperaturprofils im Pufferspeicher in Abbildung 6 sehen kann.

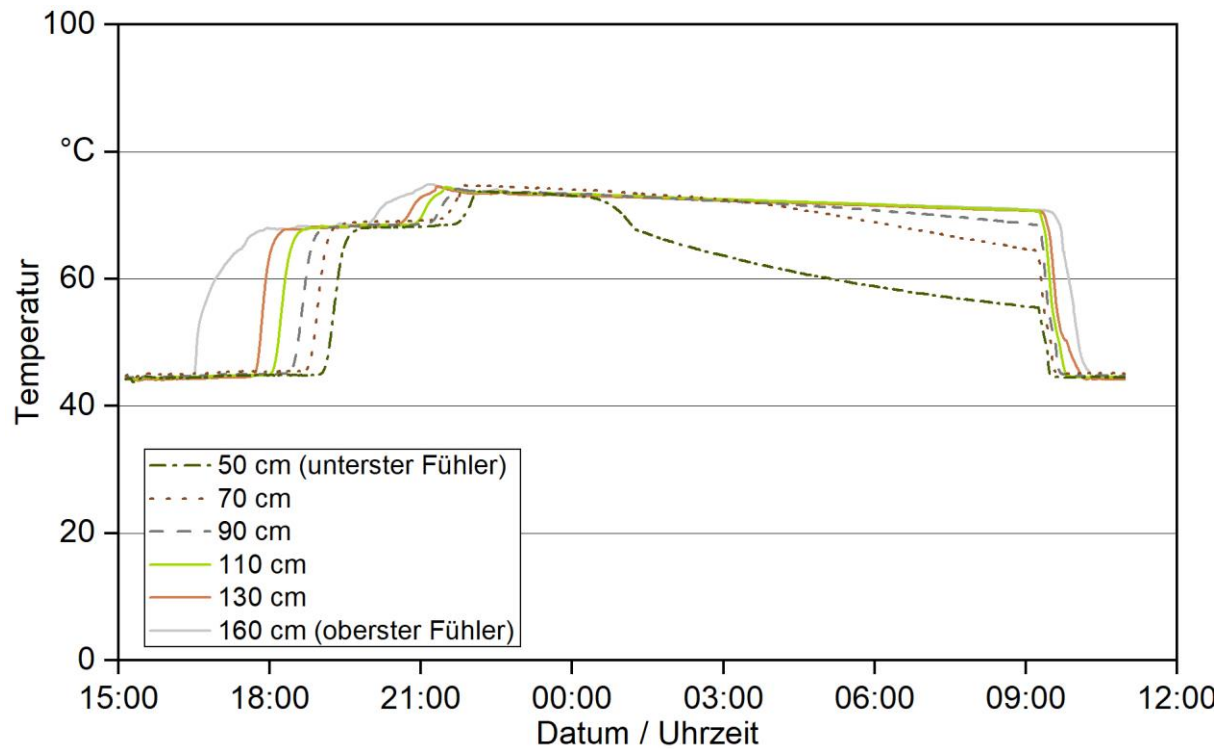


Abbildung 5: Verlauf von Temperatur in verschiedenen Höhen zwischen 50 cm und 160 cm am Pufferspeicher bei der Ladung mit maximaler Leistung

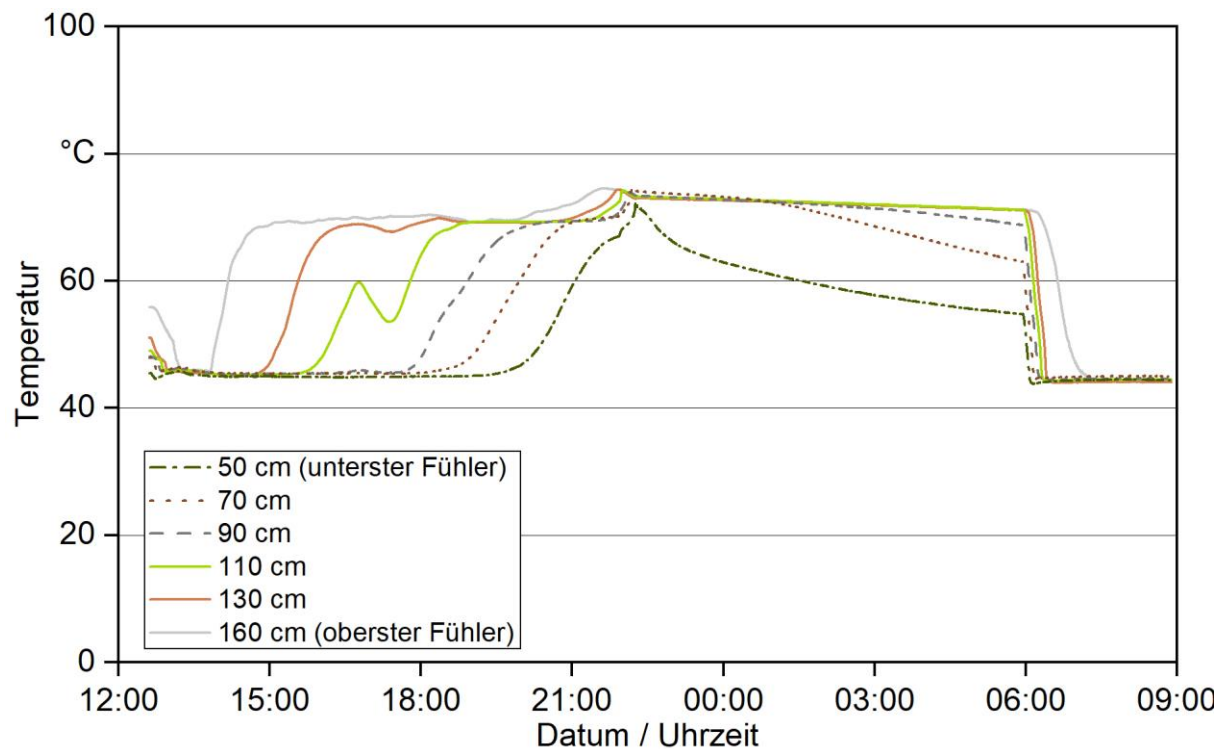


Abbildung 6: Verlauf von Temperatur in verschiedenen Höhen zwischen 50 cm und 160 cm am Pufferspeicher bei Ladung mit Laderegulung

Diese Veränderung des Kesselbetriebs zeigt auch Wirkung in den Resultaten der Messung. Während des Lastzyklus ist die Energieabgabe beider Varianten ähnlich und wird durch andere Versuchsparameter beeinflusst. Wenn die Energieabgabe über die gesamte Messung analysiert wird, zeigt sich jedoch ein eindeutiger Trend.

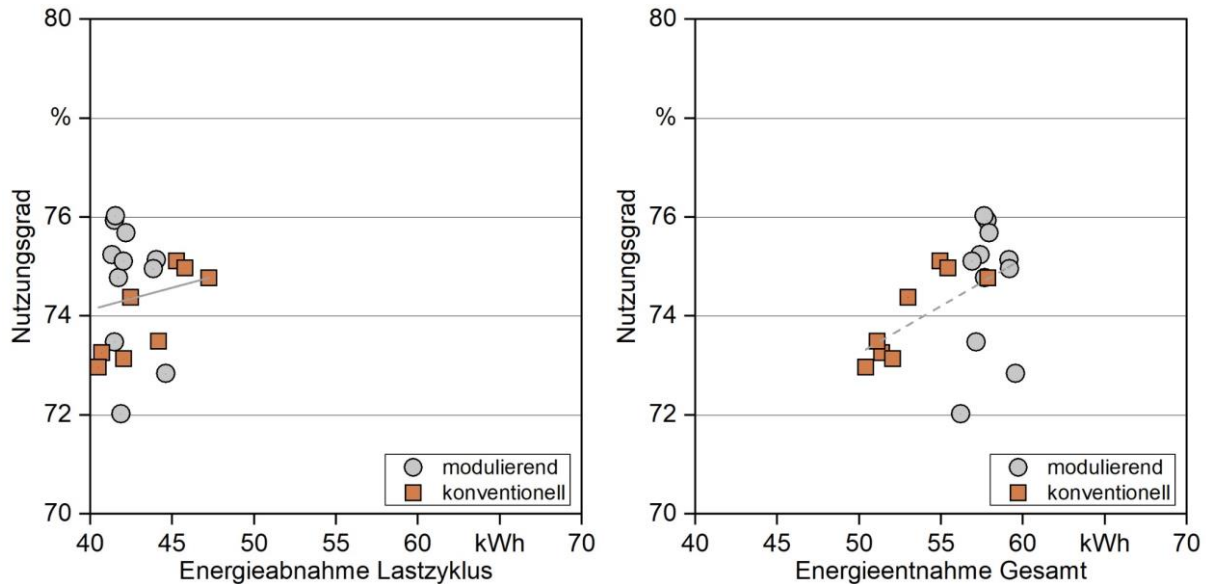


Abbildung 7: Vergleich des Nutzungsgrades und der Energiemenge während des Lastzyklus (linkes Bild) und über gesamte Messung (rechtes Bild) bei unterschiedlicher Pufferladeregelung

Die Versuche, die bei BEST durchgeführt wurden, zeigten, dass Emissionen beim Betrieb mit Pufferspeicher reduziert werden können, jedoch auch der Nutzungsgrad aufgrund höherer Verluste über Puffer und Pufferanbindung absinkt. Im Rahmen von zahlreichen Versuchen mit einem Pelletkessel wurden unterschiedliche Parameter variiert. Der Nutzungsgrad lag zwischen 70 % und 78 %, abhängig von Lastzyklus-Varianten, Puffervolumina, Anbindung an Pufferspeicher, Regelung Wärmeübertragungssystem sowie Dauer der Standby-Phase. Das Ladeverhalten von Feuerungen ist abhängig von deren Steuerung bzw. Regler-Logik und die Lastzyklus Methode muss mit allen Varianten umgehen können.

2.4 Erfassung des Brennstoffverbrauchs

Die Erfassung des Brennstoffverbrauchs sollte möglichst kontinuierlich erfolgen, d. h. der Messwert der Plattformwaage (maximaler Fehler: 1 %), auf welcher der Kessel bzw. der Brennstoffbehälter platziert ist, wird in regelmäßigen zeitlichen Abständen aufgezeichnet. Wenn der Kessel mit Brennstoffbehälter auf einer Plattformwaage installiert ist, muss auf eine mechanische Entkopplung des Kessels von nicht auf der Waage befindlichen Komponenten wie Abgasmessstrecke und Wasserkreislauf vorgenommen werden. Der Einfluss der Temperatur des Kesselwassers auf die Dichte des Wassers und die damit verbundene Gewichtsänderung auf der Waage wird durch die Vor- und Rücktemperierung

auf Referenztemperatur (siehe Methodenbeschreibung im Anhang "Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers - Manual for test stands") ausgeschlossen. So ist ein Brennwertkessel auf 25 °C vorzuheizen, während ein konventioneller Kessel auf 45 °C vorgeheizt werden muss.

Eine mögliche alternative Methode für den Fall, dass keine Plattformwaage zur Verfügung steht, ist die diskontinuierliche Bestimmung der Brennstoffmassen, d. h.:

- Nachfüllen und Erfassen der eingefüllten Brennstoffmenge nach Versuchsende, Bestimmung der Differenz
- Einwaage des Brennstoffs vor Versuchsbeginn und vollständige Entleerung des Ta-
gesbehälters nach Versuchsende inklusive Zurückwiegen.

Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen kontinuierlicher Erfassung des Brennstoffverbrauchs und der diskontinuierlichen Erfassung durch Nachfüllen sind in Tabelle 3 zusammengestellt.

Tabelle 3: Untersuchungen zur Erfassung des Brennstoffverbrauchs mit verschiedenen Methoden

Versuch	Kontinuierliche Bestimmung mittels Plattformwaage in kg	Diskontinuierliche Bestimmung durch Nachfüllen in kg	Abweichung (bezogen auf kontinuierliche Be- stimmung)
Lastzyklus (12.03.2020)	10,542	10,400	+1,3 %
Teillast (16.03.2020)	8,807	8,637	+1,9 %
Volllast (18.03.2020)	19,494	19,649	+0,8 %
Lastzyklus (24.03.2020)	10,403	10,046	+3,4 %
Volllast (26.03.2020)	22,683	23,142	+2,0 %

Obwohl der nachgefüllte Brennstoff von derselben Brennstoffcharge stammte, das Be- und Nachfüllen des Brennstoffbehälters jeweils von derselben Person durchgeführt wurde und die im Kessel verbliebene Aschemenge bei der Berechnung berücksichtigt wurde, konnte die maximale Abweichung von $\pm 0,2$ % der verbrannten Brennstoffmasse nicht erreicht werden.

Geprüfte Alternativen, wie das oben genannte „Nachfüllen“ oder das „Zurückwiegen“ von Brennstoff, haben sich somit als nicht ausreichend genau herausgestellt. Im Einzelfall ist die Bestimmung des Brennstoffverbrauchs auf diese Weise zwar in Orientierungsmessungen ausreichend; sie kann jedoch nicht bei durchgeführt werden, wenn belastbare

Ergebnisse gefordert sind. Zum einen hat sich in den Vorversuchen gezeigt, dass Brennstoffbehälter mancher Feuerungen so konstruiert sind, dass ein gleichmäßiges, wiederholbares Befüllen nicht möglich ist. Zum anderen ist es bei anderen Feuerungen nicht möglich, den nicht-verbrannten Brennstoff aus dem Kessel zu entfernen, da Zuführschnecke oder Brennraum nicht zugänglich sind. Bei manchen Feuerungen kann jedoch der Brennstoffverbrauch auf eine dieser beiden Weisen bestimmt und als Näherungswert verwendet werden, wenn keine entsprechende Waage zur Verfügung steht und die Lastzyklus-Methode lediglich für Entwicklungszwecke angewendet wird, wie beispielsweise direkt beim Kesselhersteller.

Für eine zuverlässige Erfassung des Brennstoffverbrauchs ist eine kraftschlüssige Entkopplung des Biomassekessels von der Abgasmessstrecke bzw. von den Wasseranschlüssen zur Wärmeabnahme entscheidend, um eine hohe Qualität der erfassten Messdaten zu gewährleisten und eine für eine möglichst geschlossenen Kohlenstoffbilanz ausweisen zu können.

Die Entkopplung des Kessels am TFZ wurde durch mehrfaches Auflegen und wieder Abnehmen von Prüfgewichten verifiziert. Die Wägung erwies sich als sehr genau, da die Waage nach dem Auflegen und Abnehmen der Prüfgewichte wieder auf den ursprünglichen Gewichtswert zurückkehrte, Abbildung 8. Die Abweichungen zwischen den Messreihen waren vernachlässigbar gering. Die Schwankungen betrugen lediglich den Wert der Waagenauflösung, die bei 5 g lag. Die Linearitätsabweichung durch die Kraftschlüsse zu benachbarten Bauteilen, die nicht auf der Waage stehen, beträgt ca. 0,16 % im untersuchten Messbereich (0 – 30,5 kg).

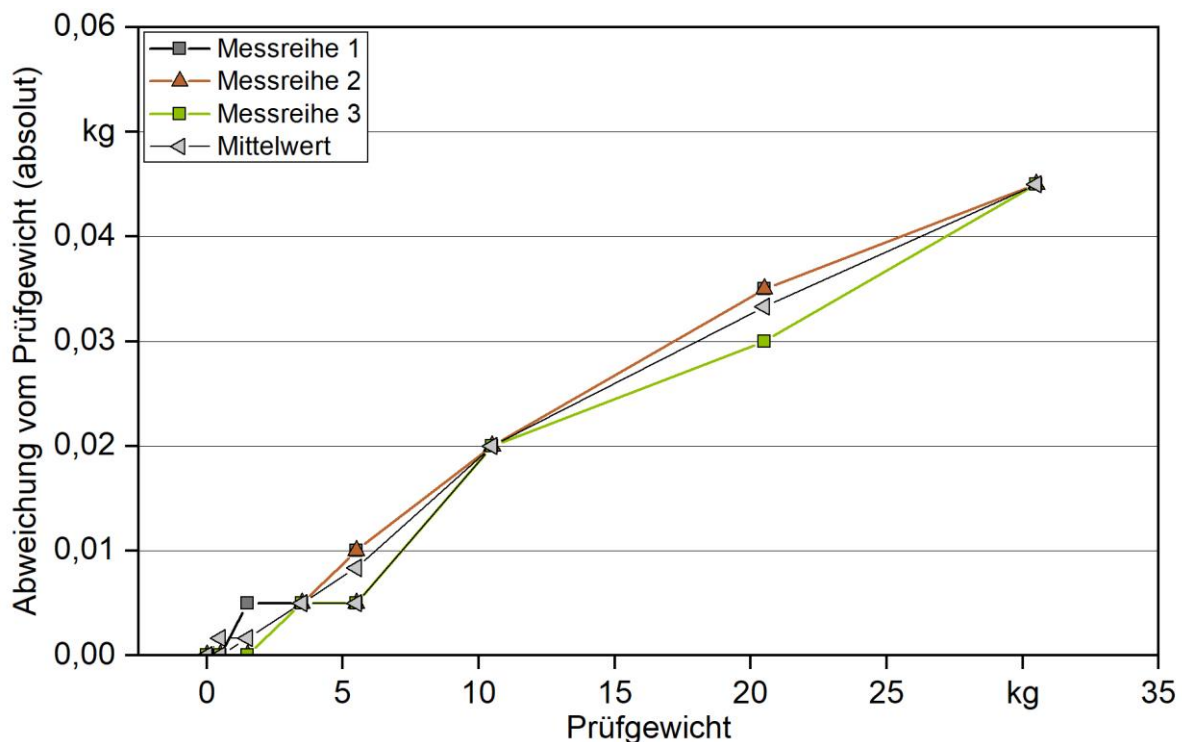


Abbildung 8: Überprüfung der mechanischen Entkopplung des Kessels auf der Plattformwaage zur Erfassung des Brennstoffverbrauchs.

2.5 Parameter des Wärmeübertragungssystems im Lastzyklusbetrieb

Die Prozedur für Vorwärmen oder Abkühlen auf Referenztemperatur vor Start und nach Versuchsende wurde weiter ausgearbeitet, insbesondere da Kessel mit einem hohen Anteil an feuerfester Masse träge auf Temperaturänderungen reagieren. Die Referenztemperatur wurde gleichzeitig als minimale Rücklauftemperatur definiert und beträgt bei Brennwertkesseln 25 °C und bei konventionellen Kesseln 45 °C. Insgesamt soll eine Temperaturdifferenz (Vorlauftemperatur minus Rücklauftemperatur) von 25 K eingehalten werden. Die vom Normlastzyklus vorgegebene Dynamik im Prüfbetrieb kann theoretisch auch durch Veränderung der Rücklauftemperatur herbeigeführt werden. Eine Variation des Volumendurchflusses ermöglicht jedoch eine bessere Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

In bisherigen Versuchen mit der Lastzyklus-Methode wurde die abgeführte Wärmemenge durch die Regelung des Volumendurchflusses und die Rücklauftemperatur des Kesselwassers über das Wärmeübertragungssystem limitiert. Dazu wurden interne Kesselpumpen und Mischer deaktiviert. Um ein breiteres Temperaturspektrum abzudecken (d. h. höhere Rücklauftemperaturen für die Feuerung zu ermöglichen) und den Eingriff in die Kesselregelung so gering wie möglich zu halten, wurde als zusätzliche Option eine Entkopplung mittels hydraulischer Weiche erwogen. So kann die abgegebene Wärmemenge statt der Kesselleistung bestimmt und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

Die hydraulische Weiche ermöglicht einen unabhängigeren Betrieb des Kessels, indem sie die Durchflussmenge (Umwälzpumpe) und die Temperatur (Mischer) des Rücklaufwassers im Wärmeübertragungssystem unabhängig von den Kesseleinstellungen regelt. Damit entkoppelt sie den Massenstrom des Primärkreises (Kessel, innerhalb der Systemgrenzen) und den Massenstrom des Sekundärkreises (Wärmeübertragungssystem). Um verschiedene Kesselsysteme und Hydraulikvarianten mit der Lastzyklus-Methode zu prüfen, bietet der Versuchsaufbau mehrere Möglichkeiten, den Kessel mit dem Wärmeübertragungssystem zu verbinden:

- Integration eines Pufferspeichers, wenn der Kesselhersteller den Betrieb mit Pufferspeicher vorschreibt.
- Direkter Anschluss an das Wärmeübertragungssystem, wenn der Hersteller einen Betrieb des Kessels mit einer Rücklauftemperatur von 45 °C bei konventionellen Kesseln und bis 25 °C bei Brennwertkesseln erlaubt.
- Installation einer hydraulischen Weiche zum Anschluss des Kessels, wenn der Kessel eine höhere Rücklauftemperatur erfordert und mit einer internen Umwälzpumpe und einem Mischer ausgestattet ist.
- Der Kessel erfordert eine höhere Rücklauftemperatur, ist aber nicht mit einer internen Umwälzpumpe ausgestattet, so sind für den Anschluss des Kessels eine hydraulische Weiche, eine externe Umwälzpumpe und ein Mischer zu installieren.
- Empfiehlt der Kesselhersteller den Einbau einer Einrichtung zur Erhöhung der Rücklauftemperatur bei Anschluss eines Pufferspeichers (Mischer und Umwälzpumpe), so ist diese Einrichtung unabhängig vom Temperaturbereich zu installieren.

Durch die Einbindung einer hydraulischen Weiche werden Wassermassenströme entkoppelt und in zwei Kreisläufe mit unterschiedlichen Temperaturniveaus aufgeteilt – Primärkreislauf inklusive Kessel innerhalb der Systemgrenzen, Sekundärkreislauf des Wärmeübertragungssystems außerhalb der Systemgrenzen. Der Massenstrom des Heizungswassers muss so gewählt werden, dass im Volllastbetrieb eine Temperaturspreizung von 25 K zwischen Kesselvorlauf- und Kesselrücklauf-temperatur erreicht wird. Der Massenstrom folgt dem gleichen prozentualen Verlauf wie das Lastprofil, d. h. dass die Spreizung von 25 K über die komplette Versuchsdauer eingehalten werden soll. Hierfür sind vor allem der Arbeitsbereich der verwendeten Umwälzpumpe sowie die Ansteuerung des Mischers für die Einstellung der Rücklauf-temperatur relevant. Vorversuche haben gezeigt, dass einige Feuerungsregelungen die eingestellten Parameter Kessel-temperatur und Rücklauf-temperatur bzw. Hysterese nicht mehr einhalten können, wenn der eingestellte Massenstrom zu hoch und in der Folge die Temperaturspreizung zu gering ist. Als Referenztemperatur für Temperierung und Rücklauf wurden 45 °C (Heizwert-Kessel) bzw. 25 °C (Brennwert-Kessel) definiert.

Die am Kessel eingestellten Parameter (Kessel-Solltemperatur, Hysterese, Abschaltkriterien, etc.) beeinflussen den Regelbereich der Feuerung und damit die Anzahl der Starts während der gesamten Versuchsdauer im Lastzyklus-Betrieb. Daher müssen die gewählten Einstellungen vorab überprüft und dokumentiert werden. Bestenfalls ist die erforderliche Einstellung vom Kesselhersteller anzugeben.

2.6 Anwendung der Lastzyklus-Methode bei Brennwertfeuerungen

Bei Brennwertfeuerungen führt das niedrigere Rücklauf-Temperaturniveau zur Kondensation des Wasserdampfes im Abgas und erhöht dadurch den Wärmegewinn. Die aktuelle EN 303-5 [7] wurde für derartige Feuerungen bereits angepasst und sieht eine Rücklauf-temperatur von 30 °C und eine Differenz zwischen Vorlauf- und Rücklauf-temperatur von $\geq 20^\circ\text{K}$ (d. h. eine Vorlauf-temperatur von zumindest 50 °C) vor.

Um die entwickelte Lastzyklus-Methode für Brennwertfeuerungen anwendbar zu machen, ist ebenfalls eine Anpassung der bisherigen Rahmenbedingungen erforderlich. Zur Untersuchung des Verhaltens von Brennwerttechnologien auf dem Prüfstand stellten mehrere Anbieter Brennwertfeuerungsanlagen für Verbrennungsversuche bereit. Untersucht und diskutiert wurden Änderungen im Versuchsaufbau hinsichtlich:

- Zu- und Abwasserleitung zur Spülung des Wärmetauschers und zur Kondensatableitung,
- Beeinflussung der Masse des Kessels auf der Waage durch Kondensatansammlung und Spülvorgänge,
- Temperaturbereich (Vor- und Rücklauf-temperatur, Temperaturspreizung) für Brennwertbetrieb und
- grundsätzliche Anwendbarkeit der Lastzyklus-Methode bei Brennwertbetrieb.

Um die oben genannten Fragestellungen zu untersuchen, wurden Lastzyklus-Versuche mit Brennwertfeuerungen bei unterschiedlichen Temperaturniveaus (Brennwert- und Heizwertbetrieb) und Versuchsaufbauten (mit/ohne hydraulische Weiche, mit/ohne Pufferspeicher) durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Lastzyklus-Methode unter bestimmten Voraussetzungen auch bei Brennwertfeuerungen angewendet werden kann. Um einen kondensierenden Betrieb zu ermöglichen, wurde das Temperaturniveau - analog zum Temperaturniveau bei Typenprüfung von Brennwertkesseln - um 20 K abgesenkt. Beim Versuchsaufbau ist außerdem sicherzustellen, dass zu- oder abfließendes Spülwasser oder das entstehende Kondensat die Quantifizierung des Brennstoff-Inputs (d. h. Massebestimmung) nicht beeinflusst. Das kann durch das manuelle Auslösen eines Spülvorgangs vor Versuchsbeginn erreicht werden. Dadurch wird der Kondensatbehälter gefüllt und das im Laufe der Verbrennung entstehende Kondensat wird nicht angesammelt, sondern fließt ab. Der freie Abfluss des Kondensats muss während des kompletten Versuchs gewährleistet sein und es muss wieder auf die mechanische Entkopplung des Kessels von nicht auf der Waage befindlichen Komponenten - in diesem Fall die Kondensatableitung - geachtet werden. Dies kann z. B. durch Ableiten des Kondensats über einen kurzen Schlauch in einen Behälter realisiert werden. Schlauch und Behälter dürfen dabei keinen Kontakt haben. Auch ein automatisches Spülen des Kessels mit Frischwasser während der Versuchszeit muss unterbunden werden, indem der Wasserzulauf über einen Absperrhahn verhindert wird.

2.7 Definition der zulässigen Prüfbrennstoffe

Trotz der Normierung des Brennstoffs Holzpellets weisen diese bei der Verbrennung in einer Feuerung teilweise ein deutlich unterschiedliches Emissions- und Ascheschmelzverhalten auf [10].

Durch gezielte Auswahl bzw. Abstufung von Brennstoffeigenschaften (sowohl bei Pellets als auch bei Holzhackschnitzeln) wurde dieser mögliche Einfluss experimentell an einigen der ausgewählten Feuerungen quantifiziert, um zusätzliche Streuungsursachen, die nicht auf die methodische Durchführung der Prüfung zurückzuführen sind, bewerten zu können. Diese Bewertung ist auch deshalb erforderlich, weil bei der Validierung der später durchzuführenden Lastzyklus-Methode (vgl. Ringversuch in Arbeitspaket 3) nur eine einheitliche Brennstoffcharge (Pellets) verwendet werden soll. Diese Arbeiten sollen auch Anhaltspunkte für die Frage liefern, inwieweit die "Brennstoffunempfindlichkeit" auch ein zukünftiges Qualitätsmerkmal für eine Feuerung darstellen könnte.

Die Eigenschaften der Prüfbrennstoffe wurden von DEPI definiert und schränken den von EN ISO 17225-2 [8] und ENplus [9] vorgegebenen Bereich zusätzlich ein, um den brennstoffseitigen Einfluss auf die Messdaten zu minimieren. Teilweise wurden obere und untere Grenzen (z. B. Aschegehalt, Schüttdichte) zur Sicherstellung realitätsnaher Ergebnisse festgelegt.

Tabelle 4: Eigenschaften für den Testbrennstoff Pellets (d - trocken, ar - im Anlieferungszustand)

Parameter	Norm	Einheit	Bereich
Durchmesser	ISO 17829:2016	mm	$6 \pm 0,5$
Längenverteilung	ISO 17829:2016	mm	$< 20 \text{ m-\%} \leq 10 \text{ mm}$
Aschegehalt	ISO 18122:2015	m-%, d	0,2 ... 0,45
Wassergehalt	ISO 18134-1:2015	m-%, ar	5 ... 10
Abriebfestigkeit	ISO 17831-1:2015	m-%, ar	$\geq 99,0$
Feingehalt	ISO 18846:2016	m-%, ar	$< 0,5$
Ascheerweichungs- temperatur (DT)	ISO 21404:2020	°C	≥ 1.300
Heizwert	ISO 18125:2017	kWh/kg, ar	$\geq 4,8$
Schüttdichte	ISO 17828:2015	kg/m ³ , ar	660 ... 720
Rohdichte	ISO 18847:2016	kg/dm ³ , ar	≥ 1.250
Stickstoffgehalt	ISO 16948:2015	m-%, d	$\leq 0,15$
Kaliumgehalt	ISO 16967:2015	mg/kg, d	≤ 500
Siliciumgehalt	ISO 16967:2015	mg/kg, d	≤ 300

Da die Sensitivitätsanalyse zur Quantifizierung des Brennstoffeinflusses unterschiedliche Brennstoffqualitäten erfordert, wurden unterschiedliche Chargen an Hackgut in unterschiedlichen Hackgutfeuerungen eingesetzt (Laubholz und Nadelholz, Buche, Fichte; jeweils Energierundholz nach ENplus A1 bzw. A2 und Waldrestholz). Details zu den verwendeten Brennstoffen sind in Abschnitt 5.1.3 und zu den Ergebnissen in Abschnitt 5.2.2 zu finden.

Folgender Vorschlag zur Definition zur Hackschnitzelqualität wurde im Rahmen des Projekts erarbeitet.

Tabelle 5: Eigenschaften für den Testbrennstoff Holzhackschnitzel (d - trocken, ar - im Anlieferungszustand)

Parameter	Norm	Einheit	Bereich
Ausgangsmaterial	ISO 17225-1	-	1.1.3.2 und 1.2.1.2 (Nadelbaumholz mit Rinde) sowie 1.2.1.3 (Laubbaumholz ohne Rinde) und 1.2.1.4 (Nadelbaumholz ohne Rinde)
Partikelgröße 1*	ISO 17225-4:2021	mm	P31S; Zusatzanforderung: $\leq 40 \text{ m-\%} < 16 \text{ mm}$
Partikelgröße 2*	ISO 17225-4:2021	mm	P45s; Zusatzanforderung: $\leq 40 \text{ m-\%} < 31 \text{ mm}$
Feingehalt	ISO 17827-2:2016	m-%, ar	≤ 5
Aschegehalt	ISO 18122:2015	m-%, d	$\leq 1,0$
Wassergehalt 1*	ISO 18134-1:2015	m-%, ar	$\geq 10 \text{ bis } \leq 25$
Wassergehalt 2*	ISO 18134-1:2015	m-%, ar	$\geq 30 \text{ bis } \leq 45$
Stickstoffgehalt	ISO 16948:2015	m-%, d	$\leq 1,0$
Heizwert	ISO 18125:2017	kWh/kg, d	$\geq 4,7$

Die Anforderungen an den Brennstoff Holzpellets und Holzhackschnitzel sind auch im Methoden-Handbuch aufgeführt [15].

2.8 Bestimmung von Gesamtstaub-Emission und Abgasvolumenstrom

Im Rahmen einer Typenprüfung erfolgt die Bestimmung der Gesamtstaub-Emission lediglich über mehrere 30 Minuten-Intervalle unter konstanten Abgasbedingungen. Eine isokinetische Staubprobenahme durch genaues Nachregeln der Staubabsaugung bezüglich der variierenden Abgasgeschwindigkeiten ist ohne großen Aufwand möglich. Während der Lastzyklus-Prüfung variiert jedoch der Abgasvolumenstrom und damit die Abgasgeschwindigkeit deutlich, und die Staubprobenahme sollte idealerweise über eine geeignete automatische Regelung verfügen, um eine isokinetische Staubabsaugung in allen Betriebsphasen zu garantieren. Im Rahmen eines Vorversuchs erfolgte an einer Staubprobenahmestelle die Beprobung isokinetisch und parallel dazu an einer weiter hinten im Abgasrohr angeordneten Staubprobenahmestelle mit konstanter Absauggeschwindigkeit. Bei isokinetischer Beprobung wurde ein Staubgehalt im Abgas von 16,01 mg/MJ ermittelt während bei konstanter Beprobung ein Staubgehalt von 14,95 mg/MJ bestimmt wurde. Dies ist eine Abweichung von ca. 7 %. Dennoch erscheint die Forderung nach einer über

den gesamten Lastverlauf isokinetischen Staubprobenahme berechtigt, damit dem schwankenden Abgasvolumenstrom Rechnung getragen wird.

Für die Bestimmung des Abgasvolumenstroms während der verschiedenen Lastzuständen ist eine sinnvolle Anordnung der Messstellen im Abgaskanal entscheidend. So ist stets zuerst der Abgasvolumenstrom mittels einem geeigneten Geschwindigkeitsmessgerät zu erfassen, bevor Probengas zur Gasanalyse oder zur Gesamtstaubbestimmung entnommen wird. Diesen Sachverhalt veranschaulicht die nachfolgende Abbildung 9. Sie zeigt, dass die Abgasgeschwindigkeit bei Erfassung nach einer Staubprobenahmestelle stets geringer ausfällt, wenn gleichzeitig eine Staubprobe dem Abgas entnommen wird. Ebenso ist ersichtlich, dass über die Versuchsdauer die ermittelte Geschwindigkeit mit dem eingesetzten Vortex-Anemometer sinkt und somit keine zuverlässige Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit möglich ist. Das Flügelrad-Anemometer zeigt hier aber klare Vorteile aufgrund einer nahezu konstanten Erfassung der Abgasgeschwindigkeit. Es sei angemerkt, dass für die zuverlässige Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit dieser Teil der Messstrecke auf 80 bzw. 64 mm im Durchmesser reduziert wurde.

Die Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit mit einem Prandtl-Staurohr wird nicht empfohlen, da die Abgasgeschwindigkeiten im niedrigen Leistungsbereich (13 % Leistung) unterhalb der Ansprechschwelle von ca. 1 m/s liegen.

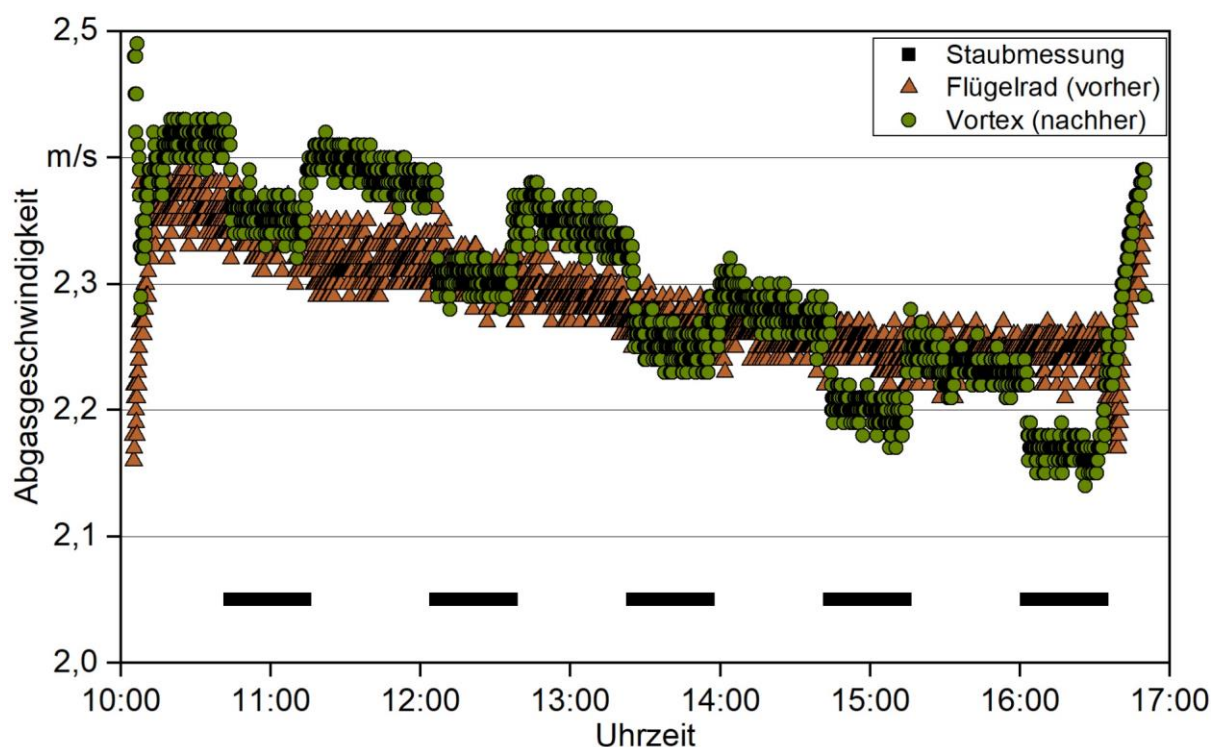


Abbildung 9: Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit bei Nennlast vor und nach der Staubprobenahmestelle ohne Korrekturen mit Profilfaktoren aufgrund der Einbauten (Versuch vom 07.12.2020).

2.9 Anpassung der Brennstoffzufuhr für Hackschnitzelkessel

Der Versuchsaufbau nach der Lastzyklus-Methode ist für Hackschnitzelheizungen wesentlich komplexer und aufwändiger, was u. a. darauf zurückzuführen ist, dass Hackschnitzelkessel nicht mit einem Brennstoff-Tagesbehälter ausgestattet sind, sondern der Brennstoff mit Hilfe eines separaten Raumaustrags zugeführt wird. Die am TFZ bisher praktizierte Lösung war nur für den stationären Betrieb von Hackschnitzelkesseln bei Leistungen von > 25 kW möglich, da die Austragsschnecke des vorhandenen Brennstoffbehälters nicht mit der Kesselsteuerung (Zufuhrschnecke) kommuniziert. Außerdem konnte die Drehzahl des Schneckenmotors nicht so weit reduziert werden, dass auch geringe Brennstoffmengen für Wärmeanforderungen < 25 kW transportiert werden konnten. Aus diesem Grunde wurde der vorhandene Austragsbehälter mit einem Motor, der ein breiteres Spektrum an Drehzahlen abdeckt, sowie mit einem ansteuerbaren Getriebe ausgestattet. Abbildung 10 zeigt den Verlauf der Abgaszusammensetzung beim dynamischen Betrieb mit einer Hackgutfeuerung. Zu sehen ist, dass das Brennstoff-Luftverhältnis vor der Umrüstung nicht optimal eingestellt war (Schwankungsbereich des Restsauerstoffs um 4 Vol.%). Die Ursache dafür ist, dass die Brennstoffzufuhr nicht konstant erfolgte (sondern in "Schüben"). Nach der Adaptierung des Austrags konnte der Brennstoff dynamisch zugeführt werden, was der Verbrennungsregelung des Kessels ermöglicht, das Brennstoff-Luftverhältnis besser einzustellen. Der gemessene Restsauerstoff bewegt sich im Rahmen von +/- 1 Vol.%.

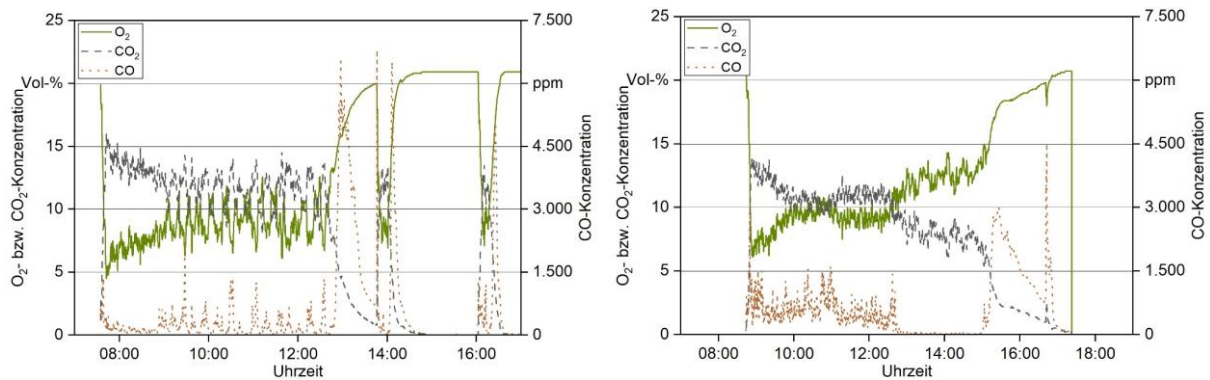


Abbildung 10: Abgaszusammensetzung (O_2 , CO_2 , CO) bei Lastzyklusversuchen an einem Hackschnitzelkessel vor (links) und nach (rechts) der Adaptierung des Austragsbehälters.

Der Vergleich der beiden Versuche zeigt, dass beim Lastzyklus-Test die Brennstoffzufuhr nach Absprache mit den Herstellern konfiguriert werden sollte und vom Hersteller nach Möglichkeit - analog zur Typenprüfung - ein kompatibles Raumaustrags-System bereitgestellt werden sollten. Auf diesem Wege ist die Qualität der Verbrennung und damit auf die Ergebnisse des Lastzyklus-Tests nicht von der jeweiligen Ausstattung des Prüfstands abhängig.

2.10 Einheitliche Auswertung

Um eine hohe Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu erzielen, ist neben dem im Prüfstands-Handbuch beschriebenen einheitlichen prüftechnischen Vorgehen auch eine einheitliche Messdatenauswertung erforderlich.

Aufgrund der im Vergleich zur Typenprüfung nach EN 303-5 erheblich komplexeren Auswertung, wurde ein Auswertetool auf Basis von Microsoft Excel® entwickelt. Dieses wurde aufgrund der frachtenbasierenden Bilanzierung mittels VBA-Programmierung realisiert, um eine hohe Rechenleistung kombiniert mit schneller Verarbeitungsgeschwindigkeit zu erreichen. Das Auswertetool muss für jeden Zeitschritt absolute Werte für Energiemengen und unter Berücksichtigung von Konzentration und Abgasvolumenstrom die Massen an Emissionskomponenten berechnen. Insbesondere für die Kontrollkriterien sind zusätzlich noch augenblickliche Abweichung vom Sollwert zu ermitteln. Nach Festlegung der Auswerteintervalle, d. h. Eingabe der Zeiten, zu denen der Versuch gestartet und abgeschlossen wurde, werden diese Zwischendaten über die im Handbuch beschriebenen entsprechenden Auswertezeiträume aufsummiert und am Bilanzsheet hinterlegt. Für die Berechnung der Messergebnisse wird dann auf diese Bilanzen zugegriffen. Auch die Kontrollkriterien, wie die Berechnung der Kohlenstoffbilanz über den gesamten Versuchslauf, sind ebenfalls im Auswertetool implementiert.

Das Auswertetool dient als Referenzberechnung für die Zertifizierung, es ist frei verfügbar, und sämtliche Rechenwege sind auch im Prüfstandshandbuch dokumentiert. Das Auswertetool wurde vom Projektpartner BEST erstellt, nachdem zuvor der angewandte

Auswertungsalgorithmus mit dem TFZ abgestimmt und durch Vergleich mit manueller Auswertung sowie durch bilateralen Datenaustausch zwischen TFZ und BEST validiert wurde. Es ermöglicht die einheitliche Evaluierung von Lastzyklus-Versuchen mit unterschiedlichen Varianten für den Versuchsaufbaute (d. h. Lastzyklus mit oder ohne Pufferspeicher bzw. hydraulischer Weiche, Kessel oder Brennstoffbehälter auf der Waage).

In das Excel-Tool müssen dazu für die Berechnung und zur Dokumentation notwendige Daten des Kessels, des verwendeten Brennstoffes sowie des Prüfstandes eingegeben werden. Zudem muss das Sheet mit den Rohdaten aus der Liste der geöffneten Dateien ausgewählt werden, und darauf basierend muss die Kanalzuordnung erfolgen. Diskontinuierlich erfasste Messwerte, wie etwa von der Staubmessung oder dem Luftdruck können entweder in Listen oder als Zahlenwert eingegeben werden. Nachdem dies erfolgt ist, können die Daten geladen werden, wobei gleichzeitig die inkrementellen Berechnungen durchgeführt werden. Durch Eingabe von Start- und Endzeit werden im letzten Schritt die Bilanzen über die Auswertzeiträume erstellt.

Das Exceltool wurde auch von den externen Prüfstellen für die Auswertung der Ringversuche (AP3) verwendet. Es zeigte sich, dass die Anwendung nach kurzer Einschulung für jeden möglich war, die Schwierigkeiten betrafen meist nur die Aufbereitung der Daten in das für die Auswertung notwendige Format.

2.11 Die finale Lastzyklus-Methode

Basierend auf die gesammelten Erfahrungen und Validierungen konnte eine finale Lastzyklus-Methode für konventionelle Biomassekessel (Abbildung 11) und Biomassekessel mit Brennwerttechnik (Abbildung 12) entwickelt und definiert werden. Die Abbildungen veranschaulichen auch gleichzeitig, wann welche Geräte ein- bzw. auszuschalten sind.

Folgende Zeitpunkte werden in Tabelle 6 definiert und festgelegt. Diese Zeitpunkte sind auch in den beiden nachfolgenden Abbildung enthalten.

Tabelle 6: Definition von Zeitpunkten, Versuchsbedingungen und Abläufe für die Lastzyklus-Methode. Die zuerst genannte Temperatur bezieht sich jeweils auf eine konventionelle Feuerung, die zweite auf eine Brennwertfeuerung

Bezeichnung	Bedingung	Vorgang
t_0	Kesseltemperatur 45 bzw. 25 °C	Start Betriebsphase
t_1	Vorlauftemperatur über 55 bzw. 35 °C	Externe Zuheizung beendet
t_2	Ende des Standardlastprofils	Start der Ruhephase, Entnahme der Restwärme
t_3	Kessel abgeschaltet	Ende Emissionsmessungen
t_4	Vorlauftemperatur unter 55 bzw. 35 °C	Ende Restwärmeabnahme
t_5	Ende der Ruhephase	Start Temperierung Kessel
t_6	Kessel auf Bezugstemperatur 45 bzw. 25 °C	Versuchsende

Weitere Bedingungen zur Versuchsdurchführung sind dem englischsprachigen Methodenhandbuch zu entnehmen (siehe Anhang) [15].

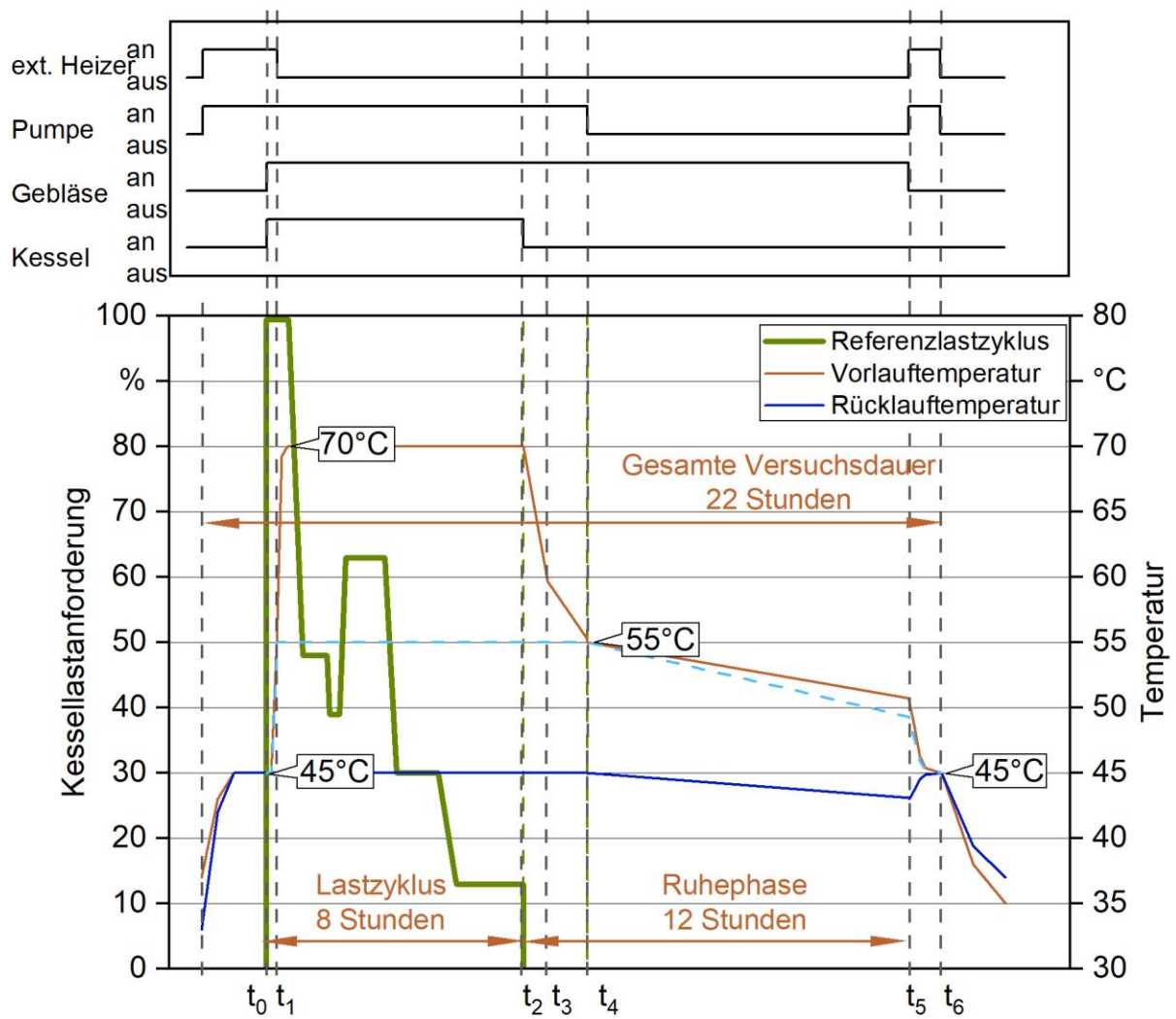


Abbildung 11: Versuchsablauf für die Durchführung der Lastzyklus-Methode an einem konventionellen Biomassekessel ohne Brennwerttechnik

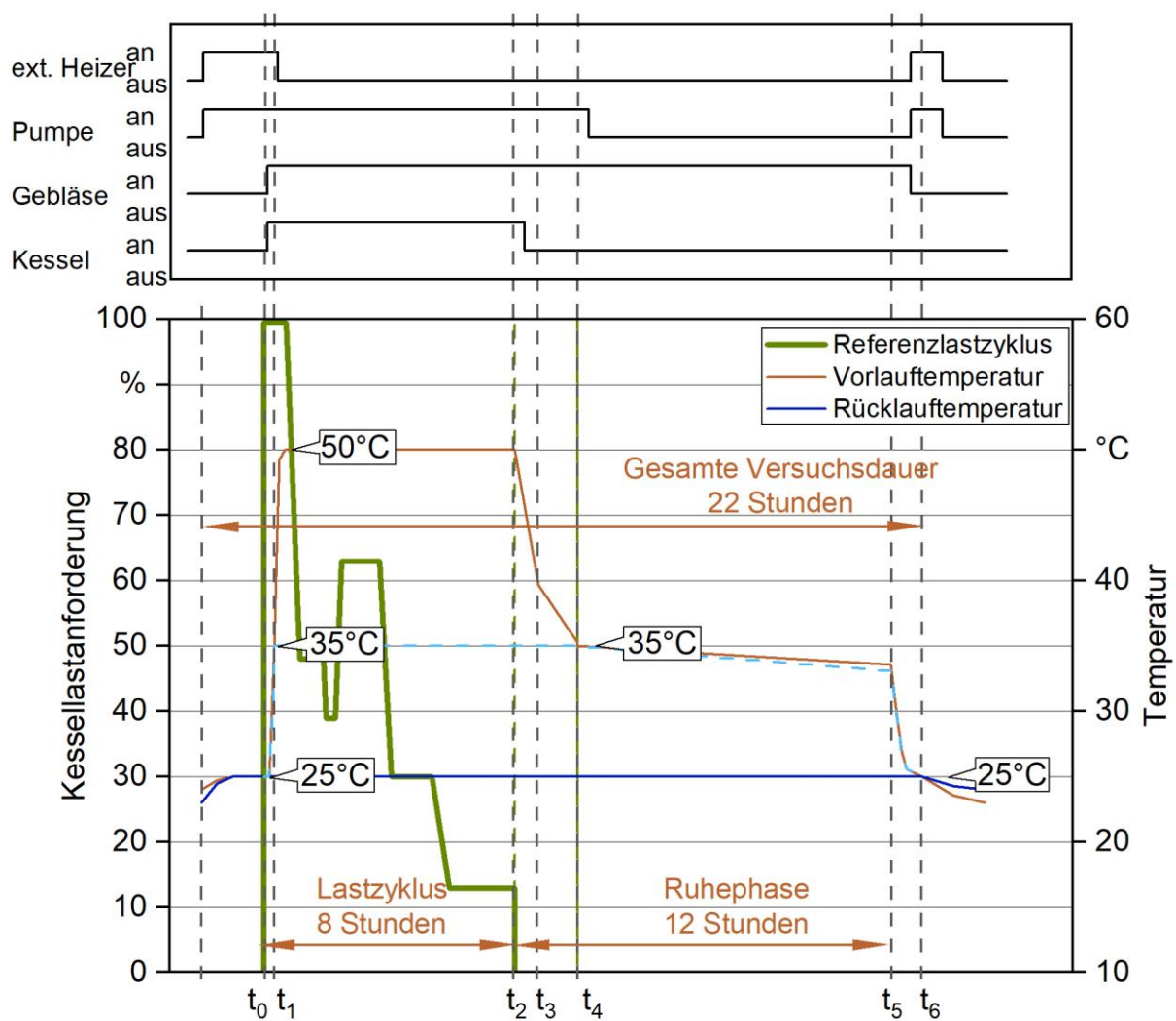


Abbildung 12: Versuchsablauf für die Durchführung der Lastzyklus-Methode an einem Biomassekessel mit Brennwerttechnik

3 Die Lastzyklus-Methode - Technische Herausforderungen

Die entwickelte Lastzyklus-Methode umfasst die Bestimmung verschiedener Schadstoffemissionen und des Jahresnutzungsgrades unter variierender Leistungsanforderung. Im Gegensatz zur Typenprüfung nach EN 303-5 [7] werden auch instationäre Betriebsbedingungen wie Kesselstart oder Laständerung gemessen und bewertet.

Auf Basis der in Kapitel 2 genannten Vorarbeiten wurde ein englischsprachiges Prüfstandhandbuch für die Lastzyklus-Methode erarbeitet. Das Handbuch soll zertifizierten Prüfstellen den Einstieg in die Messungen erleichtern und diene außerdem als Basis für die Validierung der Methode mittels Ringversuch (Kapitel 4). Es beinhaltet sämtliche Schritte von der Vorbereitung und dem Aufbau der Messung bis hin zur Durchführung, Qualitätssicherung und Datenerfassung, Vorgaben zur Messgenauigkeit der Messgeräte und der Definition des Brennstoffanforderungen für Holzpellets bzw. Holzhackschnitzel. Das Prüfstandshandbuch ist ein eigenständiges Dokument [15]. An dieser Stelle werden die wichtigsten Aspekte des Versuchsaufbaus und der Methodik erläutert.

3.1 Vorbereitung - Anforderungen an die Infrastruktur des Prüfstandes

Aufgrund der Dynamik der Methode ist der Prüfstandsaufbau im Vergleich zur Typenprüfung nach EN 303-5 [7] etwas anspruchsvoller. Zusätzliche Messinfrastruktur ist erforderlich, insbesondere was die Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit sowie die transiente isokinetische Staubprobenahme betrifft. Außerdem ist ein Wärmeübertragungssystem erforderlich, das den mit dem Lastprofil definierten Wärmebedarf variabel steuert, d. h. es muss in der Lage ein, den Kesselwasser-Volumenstrom zu variieren. Abhängig von der hydraulischen Konfiguration sowie den Angaben des Kesselherstellers kann zusätzlich die Installation einer hydraulischen Weiche, einer Rücklaufgruppe bzw. eines Pufferspeichers erforderlich sein.

Der gesamte Lastzyklus umfasst alle Phasen des Kesselbetriebs, d. h. Kalt- und Warmstart, wechselnder Wärmebedarf, stationärer Betrieb bei unterschiedlichen Lasten, Abschaltung und Standby. Er ermöglicht es, über eine relativ kurze Messdauer Betriebsergebnisse zu erhalten, die als Jahresnorm-Nutzungsgrad und als Jahresnorm-Emission zu interpretieren sind. Jeder Lastwechsel im resultierenden 8-Stunden-Lastwechselversuch ist mit definierten Gradienten versehen.

Durch die eigenständige Anpassung der Feuerung an den variierenden Wärmebedarf variiert die entstehende Abgasmenge und damit der Abgasvolumenstrom. Das heißt der Abgasvolumenstrom ändert sich während des gesamten Lastzyklus. Daher wurde es erforderlich, dass die Schadstoffemissionen proportional zur Dynamik des Abgasstroms zu bestimmt werden.

Dies gilt auch für die Probenahme zur Bestimmung der Staubemissionen. Das bedeutet, dass der Volumenstrom des abgesaugten Gases für die Staub-Probenahme synchron an

den dynamischen Volumenstrom im Abgaskanal angepasst werden. Dadurch ist die am Probenfilter gemessene Staubfracht repräsentativ für die im Verlauf ständig variierende Abgasmenge. Außerdem kann durch die dynamische Staubabsaugung auch die Vorgabe einer isokinetischen Probenahme erfüllt werden. In der Durchführung bedeutet das, dass die Probenahme nicht in kurzen Intervallen stattfindet, sondern durchgehend und möglichst ohne Unterbrechungen über den kompletten Versuchszeitraum.

Da viele Feuerungen während der Start- und Ausbrandphase die Lüfterdrehzahlen erhöhen ist ein großer Messbereich erforderlich und der Durchmesser der Messstrecke ist entsprechend festzulegen, um bei hohen und niedrigen Abgasvolumina auch noch eine zuverlässige Geschwindigkeitsbestimmung zu ermöglichen. Bezüglich der Staubprobenahme könnte hierzu entweder mit zwei verschiedenen Düsendurchmessern gearbeitet werden, wobei die kleine Düse den Versuchsbereich mit hohen Abgasgeschwindigkeiten und eine große Düse für den Bereich kleiner Abgasgeschwindigkeiten optimal wäre und je nach Lastzustand die dazu passende Staubprobenahme aktiviert wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass beide Staubprobenahmen mit gleicher Düsendgröße arbeiten, dann aber automatisch auf die noch unbenutzte Staubprobenahme umschalten, wenn der andere Filter ausreichend beladen ist.

Insgesamt sind bei der Lastzyklus-Methode spezielle Messgeräte erforderlich (z. B. zur genauen Bestimmung des Abgasvolumendurchflusses, Gaspumpen mit stark variabler Durchflussamplitude, hochpräzise Waage zur Bestimmung des Brennstoffverbrauchs, zusätzlicher Stromzähler usw.). Außerdem sind die Anforderungen in Bezug auf Genauigkeit der Messtechnik höher als bei der herkömmlichen Typenprüfung.

Die Genauigkeit der Messgeräte ist dem Prüfstandshandbuch [15] bzw. der nachstehenden Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Anforderungen an die Genauigkeit der Messgeräte für die Lastzyklus-Methode

Parameter	Einheit	Max. Ungenauigkeit oder Messbereich
Umgebungsdruck	mbar	± 10 mbar
Umgebungstemperatur	$^{\circ}\text{C}$	± 1 K
Wasserdampfgehalt im Abgas	Vol-%	± 0.5 Vol-%
Abgastemperatur	$^{\circ}\text{C}$	± 1 K
Förderdruck	Pa	± 1 Pa
Abgasvolumenstrom	m^3/s	± 10 % des geringsten Messwerts
Mindest-Abgasgeschwindigkeit	m/s	max. 0.5 m/s
CO-Konzentration	ppm	± 10 % des Messbereichs jedoch mit einem Maximum von ± 10 ppm für einen Messbereich bis 500 ppm; ± 45 ppm für einen Messbereich bis 3,000 ppm
O ₂ und CO ₂ -Konzentration	Vol-%	± 5 % des Messbereichs aber maximal ± 0.4 Vol-%
NO _x -Konzentration	ppm	± 5 % des Messbereichs aber maximal ± 15 ppm
Org.-C-Konzentration	ppm	± 10 % des Messbereichs aber maximal ± 5 ppm
Staubkonzentration	mg/m^3	± 15 % des Messbereichs aber maximal 10 mg/m^3
Volumenstrom für die Staubprobenahme		Geeignet zur Abdeckung des gesamten Messbereichs der Abgasgeschwindigkeit
Brennstoffmasse	kg	± 0.2 % des gesamten Brennstoffverbrauchs
Erzeugte Wärmeabgabe	kW	± 1.5 % des Messwerts
Auxiliary electric power (active power)	W	± 1.0 % des Messwerts
Wasservolumen des Kessels	l	± 1 %

3.2 Durchführung - Zeitmanagement und relevante Versuchsabschnitte

Die Lastzyklus-Methode bedarf einiger zusätzlicher Vor- und Nachbereitungsschritte im Vergleich zur Typenprüfung nach EN 303-5.

So ist eine Vor- und Nachtemperierung des Kessels auf eine einheitliche Temperatur zu Beginn und am Ende der Lastzyklusprüfung erforderlich, um Energie- und Kohlenstoffbilanzen schließen zu können (Abschnitt 2.11). Da bereits der Kesselstart mitgemessen

wird, muss die gesamte Messtechnik schon zu Beginn kalibriert und in die Messstrecken eingebaut werden, was während der Typenprüfung sonst während der Aufwärmphase des Kessels erfolgen kann. Dies erfordert mindestens eine Stunde Vorlaufzeit, die neben dem achtstündigen Lastzyklus zu berücksichtigen ist. Nach dem Erreichen einer vordefinierten Vorlauftemperatur ist die externe Zuheizung auszuschalten. Eine weitere Herausforderung sind die wechselnden Lastzustände, so dass die Staubabsaugung entweder händisch nachgeregelt werden muss aufgrund der geforderten Isokinetik, oder man investiert in eine vollautomatische isokinetische Staubabsaugung (wie beim TFZ). Während der achtstündigen Lastphase sind ggf. die Planfilter der Staubprobenahme aufgrund zu hoher Filterbelastungen zu wechseln. Die Häufigkeit richtet sich dabei nach der Qualität der Verbrennung und kann nicht im Vorfeld abgeschätzt werden. Nach dem Ende der achtstündigen Lastzyklus-Methode wird die Wärmeanforderung auf 0 kW gesetzt und der Kessel wechselt eigenständig in den Nachlaufbetrieb und schaltet sich irgendwann selbst ab (abhängig von den hinterlegten Routinen des Kessels). Zu dem Zeitpunkt, an dem der Kessel den Status "Kessel AUS" einnimmt, ist die Staubmessung zu beenden und ggf. Einstellungen am Kessel für die zwölfstündige Ruhephase vorzunehmen, um einen Kesselneustart zu vermeiden. Nach der zwölfstündigen Ruhephase ist der Kessel erneut auf die vordefinierte Referenztemperatur abzukühlen bzw. aufzuheizen. Danach können alle Messgeräte aus der Messstrecke ausgebaut und gereinigt werden.

Somit sind für die Durchführung einer Lastzyklusprüfung am ersten Messtag ca. 10 Arbeitsstunden erforderlich und am darauffolgenden Tag ein zusätzlicher Aufwand von ca. 1 bis 2 Arbeitsstunden. In diesen Zeiten sind aber noch nicht die Auf- oder Abbauarbeiten des Kessels und eventuelle Vorversuche berücksichtigt, sondern es wird davon ausgegangen, dass der Kessel vollständig wasser- und abgasseitig angeschlossen ist und es zu keinen Störungen kommt. Treten jedoch während der mindestens achtstündigen Lastphase Störungen oder Ausfälle auf, so ist der komplette Versuchstag zu wiederholen. Daher ist der Aufwand für die reale Beurteilung des Kesselverhaltens aufwendiger als die Messungen im Rahmen einer Typenprüfung.

3.3 Auswertung - Bewertung der Datenqualität

Zur Bewertung der Qualität der gewonnenen Daten werden zwei Indikatoren definiert und herangezogen. Diese Benchmarks umfassen kesselbetriebsspezifische Indikatoren und Kriterien für Messabweichungen. An dieser Stelle werden die wichtigsten Kriterien genannt, die u. a. für die Validierung der Methode (Kapitel 4) relevant sind.

Kohlenstoff-Bilanz. Die Kohlenstoff-Bilanz beschreibt das Gleichgewicht zwischen dem im Brennstoff enthaltenen zugeführten Kohlenstoff und freigesetztem Kohlenstoff im Abgas (CO_2 , CO und org.-C), Abbildung 13. Für die korrekte Bestimmung des Abgasvolumenstroms ist eine zuverlässige Geschwindigkeitsmessung im Abgas erforderlich. Sie ist ein guter Indikator für die Qualität der Datenerfassung, da sie unterschiedliche Aspekte der Messung berücksichtigt, einschließlich des Kohlenstoffgehalts des Brennstoffs.

Die Kohlenstoff-Bilanz basiert auf der Abgasmenge und Abgasanalyse über den Zeitraum von t_0 bis t_3 und dem Brennstoffverbrauch, der über den Zeitraum von t_0 bis t_6 ermittelt wird. Sie darf eine maximale Abweichung von 5 % aufweisen. Die verschiedenen Zeiträume können der Tabelle 6 entnommen werden.

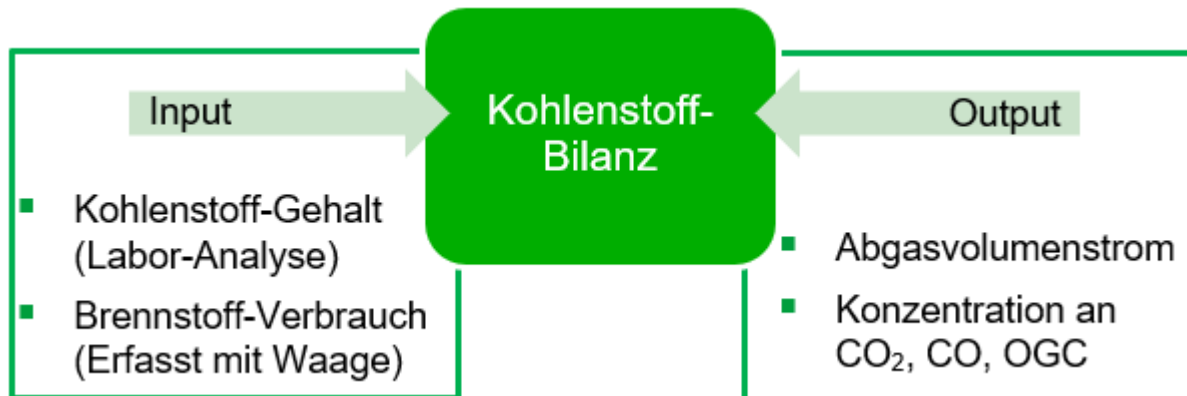


Abbildung 13: Kohlenstoffbilanz und erforderliche Daten.

Durchflussabweichungskriterium. Dieses Kriterium wird zur Bewertung der Leistung des Wärmeübertragungssystems verwendet. Es beschreibt, wie gut der Kesselwasser-Massenstrom des Wärmeübertragungssystems den Anforderungen des Lastprofils entspricht, d. h. mit dieser Kennzahl kann eine Aussage über die Regelung der Umwälzpumpe gemacht werden.

Die Bewertung ergibt sich aus dem Mittelwert der Abweichungen des Massenstroms. Diese werden für jeden Zeitschritt als Absolutwerte der Abweichung des tatsächlichen Kesselwasser-Massenstroms vom Wert der Lastzyklus-Methode ermittelt. Es werden nur die Daten während des aktiven Lastzyklus ohne die Ruhephase berücksichtigt (t_0 bis t_2 ; 8 Stunden). Diese Abweichung darf maximal 2 % betragen (Abbildung 14).

Ausgehend vom Soll- und Istwert der an das Wärmeübertragungssystem abgegebenen Wärmeleistung wird der Absolutwert der momentanen Abweichung wie folgt berechnet:

$$\Delta \dot{m} = \left| \frac{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} - \dot{m}_{\text{H}_2\text{O,SLP}}}{\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Nom}}} \right| \cdot 100 \quad \text{in \%}$$

- $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ Momentaner Kesselwasser-Massenstrom des Wärmeübertragungssystems kg/s
- $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,SLP}}$ Sollwert Kesselwasser-Massenstrom nach Standardlastprofil (SLP) in kg/s
- $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O,Nom}}$ Kesselwasser-Massenstrom bei Nennwärmeleistung in kg/s

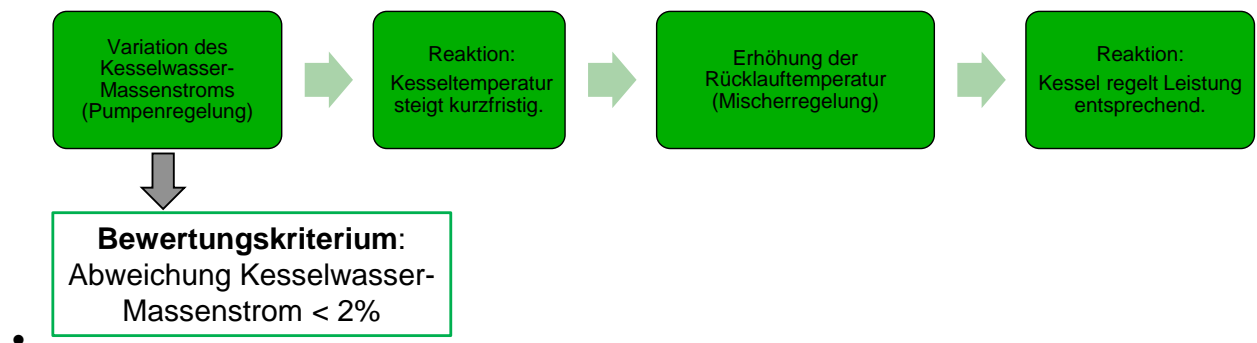


Abbildung 14: Kriterium zur Bewertung der Durchflussabweichung des Prüfstandes

4 Validierung der Lastzyklus-Methode

Hierzu wurde ein internationaler Ringversuch organisiert und durchgeführt. Dessen Ziel war es

- die Praxistauglichkeit des Prüfstands-Handbuchs zu erproben,
- Daten von unterschiedlichen Prüfständen zu erheben,
- Feedback von erfahrenen Personen, die vertraut mit Kesselprüfungen sind, einzuholen und
- auf Basis dieser Daten zu evaluieren, ob die entwickelte Methodik geeignet ist, den Praxisbetrieb von automatisch beschickten Biomassekesseln abbilden zu können.

Nachfolgend werden die Ringversuchsdurchführung und die Ergebnisse vorgestellt.

4.1 Organisation des Ringversuchs

4.1.1 Auswahl der Feuerungen und Hinweise zum Kesselbetrieb

Ursprünglich war geplant, für die Ringversuche jeweils einen Pellet- und einen Hackgutkessel zu verwenden. Aufgrund des geringen Mehrwertes, des aufwendigeren Versuchsaufbaus (z. B. entsprechende Raumaustrags-Lösung, um die Brennstoff-Zufuhr steuern zu können und dem damit verbundenen Mehraufwand bei der Installation) sowie der variierenden Hackgutqualität wurde beschlossen, für die Validierung zwei unterschiedliche Pelletkessel-Technologien zu verwenden, zumal Pelletkessel bei weitem die wichtigste Bauart unter den automatisch beschickten Holzentralheizungen stellen. Indem sowohl eine Heiz- als auch eine Brennwert-Pelletfeuerung eingesetzt wurden, erfolgt die Validierung der Lastzyklus-Methodik an den einzelnen Prüfständen nun mit zwei unterschiedlichen Temperaturniveaus. Zwei Kesselhersteller hatten sich dazu bereit erklärt, entsprechende Pelletfeuerungen für die Ringversuche zur Verfügung zu stellen. Zur Interessenswahrung der beiden Kesselhersteller wurden mit den Verantwortlichen der Institute Geheimhaltungsvereinbarungen abgeschlossen. Die Nennleistungen der beiden Feuerungen betrugen zwischen 15 kW und 20 kW.

Für einen vergleichbaren Betrieb der Biomassekessel bei allen Ringversuchsteilnehmern wurden die wesentlichen Parameter für den Kesselbetrieb im Vorfeld zur Verfügung gestellt. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Messergebnisse untereinander vergleichbar sind. Dies beinhaltete beispielsweise den einzustellenden Förderdruck während des Betriebs. Die Asche sollte zwischen den Versuchen nicht vom Rost entfernt werden. Auch wurde die am Kessel einzustellende Regeltemperatur während des Betriebs in Teillast, Nennlast und im Lastzyklus vorgegeben und aufgezeigt, wie und wo diese Parameter am jeweiligen Kessel einzustellen sind. Beim Brennwertkessel wurde zusätzlich darauf hingewiesen, wie ein Spülen mit Frischwasser während der achtstündigen Lastzyklus-Messung vermieden werden kann, um den Brennstoffverbrauch fehlerfrei bestimmen zu können.

Bisherige Betriebserfahrungen am TFZ und bei BEST wurden ebenfalls zur Verfügung gestellt, es wurden jedoch keine bereits bestehenden Messergebnisse übermittelt. So wurden die Bereiche der Abgasgeschwindigkeiten für eine 80 mm Abgasmessstrecke angegeben sowie die Abschalt- und Wiederanschaltemperaturen.

4.1.2 Auswahl der teilnehmenden Prüfinstitute

Eine Vorversion des Prüfstands-Handbuchs ("**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**"; im Anhang) wurde im November 2020 an mögliche Ringversuchsteilnehmer verschickt, damit diese Angebote für die Prüfdurchführung abgeben konnten. Details bezüglich Versuchsaufbau und -ablauf wurden ebenfalls diskutiert.

Zunächst wurden sechs potenziell geeignete Prüfinstitute angeschrieben und Angebote für die Durchführung der Ringversuche eingeholt. Vier dieser Prüfinstitute wurden nach Prüfung der Angebote mit der Durchführung der Versuche beauftragt.

Neben diesen vier erfahrenen Prüfinstituten wurden die Messungen auch am TFZ und bei BEST durchgeführt. Als Kick-Off Veranstaltung fand ein virtueller Workshop am 10.02.2021 statt, im Rahmen dessen wurde die Lastzyklus-Methode im Detail vorgestellt und es bestand die Möglichkeit, offene Fragen bzgl. Aufbau und Messtechnik zu klären.

4.1.3 Versuchsumfang und Durchführung

Die einzelnen Ringversuchsteilnehmer führten mit beiden Kesseln jeweils einen stationären Versuch unter Nennlastbedingung sowie Teillastbedingung nach EN 303-5 durch sowie mindestens einen Lastzyklus-Versuch. Somit konnten mögliche Abweichungen, welche während des Lastzyklus auftraten, anhand der Daten der stationären Versuche überprüft werden.

Bei der Durchführung der Versuche bei den Ringversuchsteilnehmern war ursprünglich eine persönliche Betreuung vor Ort vorgesehen, eine entsprechende Reise konnte jedoch aufgrund der Covid-Pandemie nicht genehmigt werden. Soweit es möglich war, wurden Fragen zur Methodik daher telefonisch beantwortet. Die Ringversuche fanden im Zeitraum von 15.03.2021 bis 30.11.2021 statt. Im Anschluss daran wurden die aufgezeichneten und von den Teilnehmern ausgewerteten Daten dem TFZ zur standortübergreifenden Auswertung zur Verfügung gestellt.

Um untersuchen zu können, ob an den Feuerungen während der Ringversuche bzw. beim Transport Veränderungen aufgetreten sind, wurden zusätzlich „Ring-Schluss-Messungen“ am TFZ und bei BEST durchgeführt.

4.1.4 Versuchsbrennstoff

Vom TFZ wurde homogenisierter Versuchsbrennstoff ("Pellets A") allen Teilnehmern zur Verfügung gestellt. Hierfür wurden ca. 7 Tonnen Holzpellets vom gleichen Hersteller aus einer einheitlichen Charge durch mehrfaches Umschaufeln und Umfüllen homogenisiert.

Dies diente dazu, einen brennstoffseitigen Einfluss auf einzelne Parameter auszuschließen. Jeder Versuchsteilnehmer bestimmte vor Ort den aktuellen Wassergehalt des Prüfbrennstoffs. Pellets aus der gleichen Charge wurde außerdem für einen Großteil der Versuche für die Serienuntersuchung (Kapitel 5) verwendet. Die Brennstoffzusammensetzung kann Kapitel 5.1.3 entnommen werden.



Abbildung 15: Eingesetzte Holzpellets während des Ringversuchs

4.1.5 Validierung der Messdaten

Abbildung 16 zeigt die Herangehensweise bei der Auswertung der Ringversuche. Zunächst wurde die Reproduzierbarkeit der Versuche mit stationärer Wärmeanforderung (Nenn- und Teillast) untersucht. Verglichen wurden die Parameter

- Leistungen in % der Nennleistung,
- Wirkungsgrad,
- Restsauerstoffgehalt und
- Temperaturniveau.

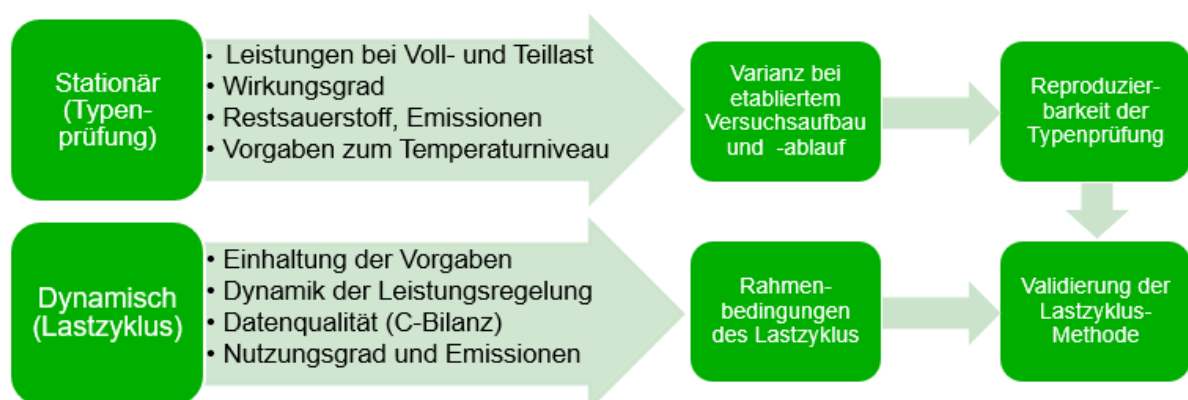


Abbildung 16: Parameter zur Validierung der Messdaten im stationären Betrieb an zwei Pelletkesseln

Der Variationskoeffizient, der die Bandbreite der generierten Messdaten beschreibt, lässt sich nach der folgenden Gleichung ermitteln und wird bei der weiteren Auswertung mit angegeben.

$$v = \frac{s}{x} \cdot 100\%$$

mit

v = Variationskoeffizient,

s = Standardabweichung,

x = Mittelwert.

Die Prüftoleranz bei Marktaufsicht gemäß der Ökodesign-Verordnung ([11]; Tabelle 8) wurde verwendet, um die Schwankungsbreite der Ergebnisse nachträglich zu bewerten.

Tabelle 8: Prüftoleranzen nach Tabelle 2 Anhang IV der 2015/1189; Grenzwerte der Emissionen umgerechnet in mg/MJ

Parameter	Prüftoleranzen
Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad	Der ermittelte Wert darf nicht mehr als 4 % unter dem angegebenen Wert des Modells liegen
Staubemissionen	Der ermittelte Wert darf nicht mehr als 4,5 mg/MJ über dem angegebenen Wert des Modells liegen
Emissionen von gasförmigen organischen Verbindungen	Der ermittelte Wert darf nicht mehr als 3,5 mg/MJ über dem angegebenen Wert des Modells liegen
Kohlenmonoxidemissionen	Der ermittelte Wert darf nicht mehr als 15 mg/MJ über dem angegebenen Wert des Modells liegen
Stickstoffoxidemissionen	Der ermittelte Wert darf nicht mehr als 15 mg/MJ über dem angegebenen Wert des Modells liegen

4.2 Ergebnisse des Ringversuchs

4.2.1 Rahmenbedingungen an die Prüfstände und Validierung der Datenqualität

Bevor die Ergebnisse hinsichtlich Emissionen und Wirkungs- bzw. Nutzungsgrad miteinander verglichen werden, erfolgt ein Vergleich der gestellten Anforderungen an das dynamische Wärmeübertragungssystem und der Genauigkeit der eingesetzten Messtechnik. Hierfür wurden im Handbuch für Prüfstände (Prüfstandshandbuch) [15] einige Kriterien festgelegt.

Kesselwasser-Massenstrom. In weiterer Folge wurden die Vorgaben, die die Lastzyklusmethode an den durchführenden Prüfstand stellt, überprüft. So darf die Abweichung des Kesselwasser-Massenstroms maximal 2 % betragen. Dieses Kriterium bewertet das Wärmeübertragungssystem des Prüfstands und die Regelungen für Pumpe und Mischer.

Dieses Kriterium wurde von allen Ringversuchsteilnehmern eingehalten, wie Abbildung 17 zeigt.

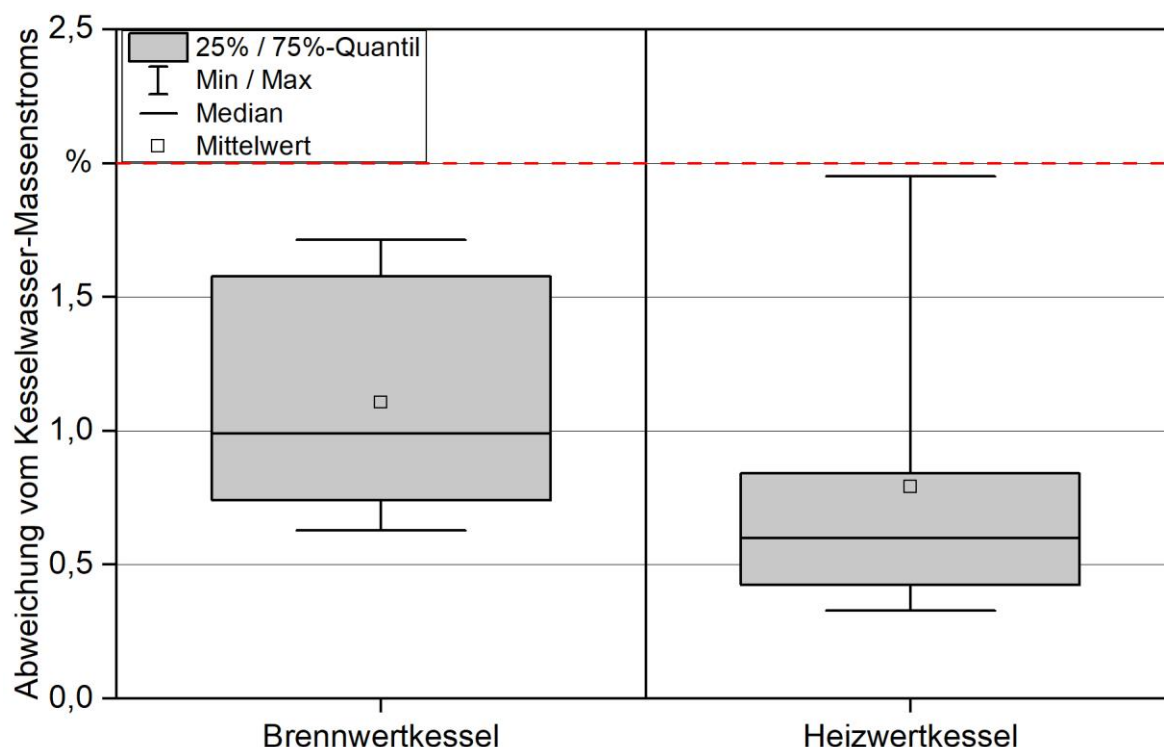


Abbildung 17: Einhaltung der Vorgaben an das Wärmeübertragungssystem

Kohlenstoffbilanz. Die Kohlenstoffbilanz stellt den Kohlenstoffeintrag über den zugeführten Brennstoff (Masse wird mit Waage bestimmt, Kohlenstoffgehalt des Brennstoffes geht aus der Elementaranalyse von einem externen Labor hervor) dem Kohlenstoff im Abgas gegenüber. Dieser wird durch den Abgasvolumenstrom und die Konzentration an kohlenstoffhaltigen Komponenten (CO_2 , CO , OGC) ermittelt. Hier ist eine maximale Abweichung von 5 % vorgesehen. Die Daten zeigen, dass diese Vorgabe bei den Versuchen, die mit der Heizwertfeuerung durchgeführt wurden, gut eingehalten werden konnte, Abbildung 18. Lediglich ein Prüfstand konnte den Wert beim Versuch mit dem Heizwertkessel nicht erfüllen. Im nachgehenden Gespräch konnten mögliche Ursachen identifiziert werden: Zum einen wurde das Flügelrad zur Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit vermutlich falsch kalibriert, und zum anderen erfolgte die Probenahme für die Gasanalyse – entgegen der Methodik, die in der Anleitung beschrieben ist – in der Messstrecke vor der Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit (Abschnitt 2.8).

Beim Betrieb der Brennwertfeuerung hat sich die Kohlenstoffbilanz als große Herausforderung herausgestellt.

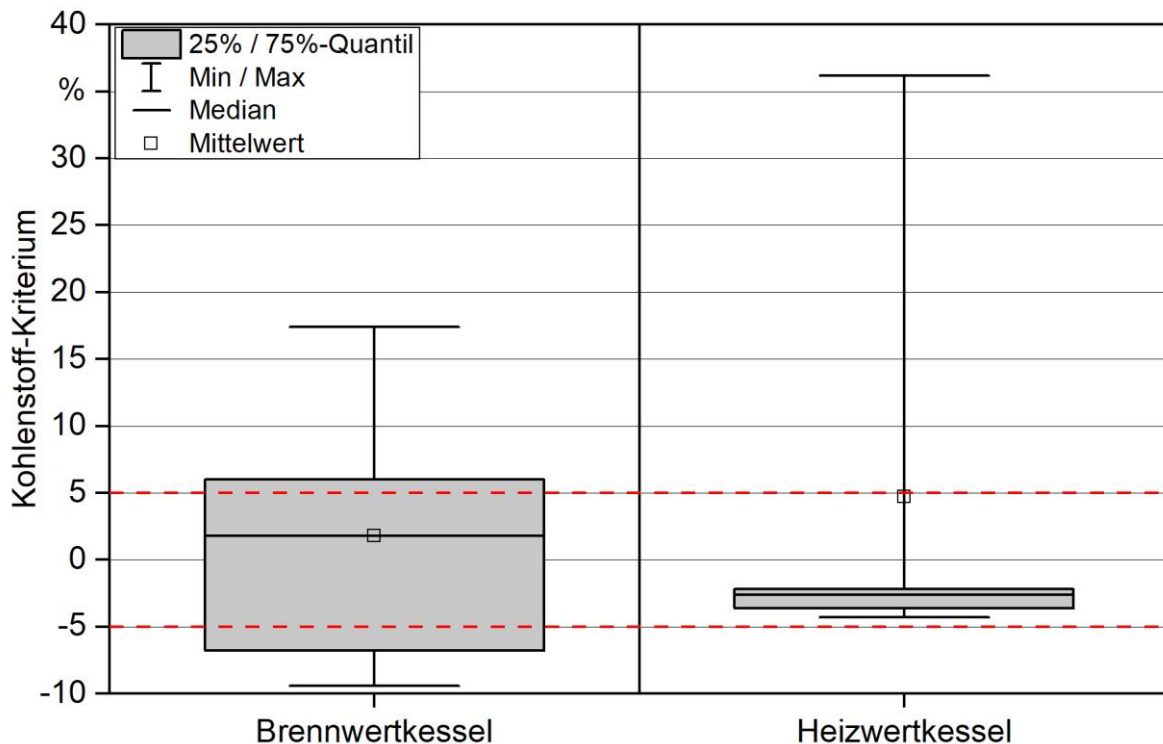


Abbildung 18: Kohlenstoffbilanz während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln zur Bewertung der Messtechnik des Prüfstandes

Einflussgrößen sind einerseits kondensierendes Wasser im kühlen Abgas ($< 40\text{ °C}$), welches die Bestimmung der Abgasgeschwindigkeit beeinflussen kann (abhängig vom Messprinzip des verwendeten Gerätes). Eine noch größere Fehlerquelle ist jedoch das Spülwasser, das bei Brennwerttechnologien für die Reinigung des Wärmetauschers erforderlich ist. Durch den Spülvorgang und durch Wasser, das in der Leitung nachläuft, wird der Messwert der Massenbestimmung verfälscht und ggf. dem Brennstoff zugeordnet (Abschnitt 2.6). Die Vorgehensweise beim Versuchsablauf mit Brennwertfeuerungen wird im Handbuch entsprechend beschrieben, um solche Fehlerquellen auszuschließen.

4.2.2 Prüfung der Einstellungen an den Feuerungen

Für die Versuche war für beide Feuerungen die einzustellende Kesseltemperatur - jeweils für Voll- und Teillastbetrieb sowie für den Lastzyklus-Versuch - vorgegeben. Die spezifischen Soll-Kesseltemperaturen wurden so gewählt, dass die Vorlauftemperatur bei der Brennwerttechnik 50 °C und bei der Heizwerttechnik 70 °C betragen sollte. Da die Vorgaben der EN 303-5 [7] zu unspezifisch sind, war diese Einschränkung erforderlich, um vergleichbare Rahmenbedingungen zu schaffen.

Vorlauftemperatur. Beim Vergleich der von den einzelnen Prüfinstituten gemessenen Vorlauftemperaturen (Abbildung 19) konnte festgestellt werden, dass die Vorlauftemperatur trotz der präzisen Vorgaben variiert. Während die Streuung bei den Temperaturen, (berechnet als Variationskoeffizient v) die mit dem Heizwertkessel aufgezeichnet wurden,

relativ gering ist ($v = 1,5\%$ bei Teillastbetrieb, $1,9\%$ bei Volllastbetrieb), war die Streuung der Temperaturen, die beim Betrieb des Brennwertkessels gemessen wurden, wesentlich höher ($v = 11,8\%$ bei Teillastbetrieb, $4,8\%$ bei Nennlastbetrieb). Geringfügige Abweichungen würden sich mit der unterschiedlichen Positionierung der Messstellen für die Temperaturfühler erklären lassen, jedoch nicht eine Differenz von 15 K beim Brennwertkessel. Anhand der aufgezeichneten Kesseldaten wurde festgestellt, dass bei den Versuchen, die von Labor 5 durchgeführt wurden, eine zu hohe Soll-Temperatur eingestellt war, und der Temperaturbereich dadurch höher als gewünscht war. Während der Versuche, die von Labor 4 durchgeführt wurden, erfolgte keine Aufzeichnung der Kesseldaten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch hier die Sollwerte falsch eingegeben wurde. In der Folge sind die Daten dieser beiden Versuche (Brennwertfeuerung bei Labor 4 und 5) nur bedingt vergleichbar, da die eingestellte Soll-Temperatur die Kesselregelung beeinflusst.

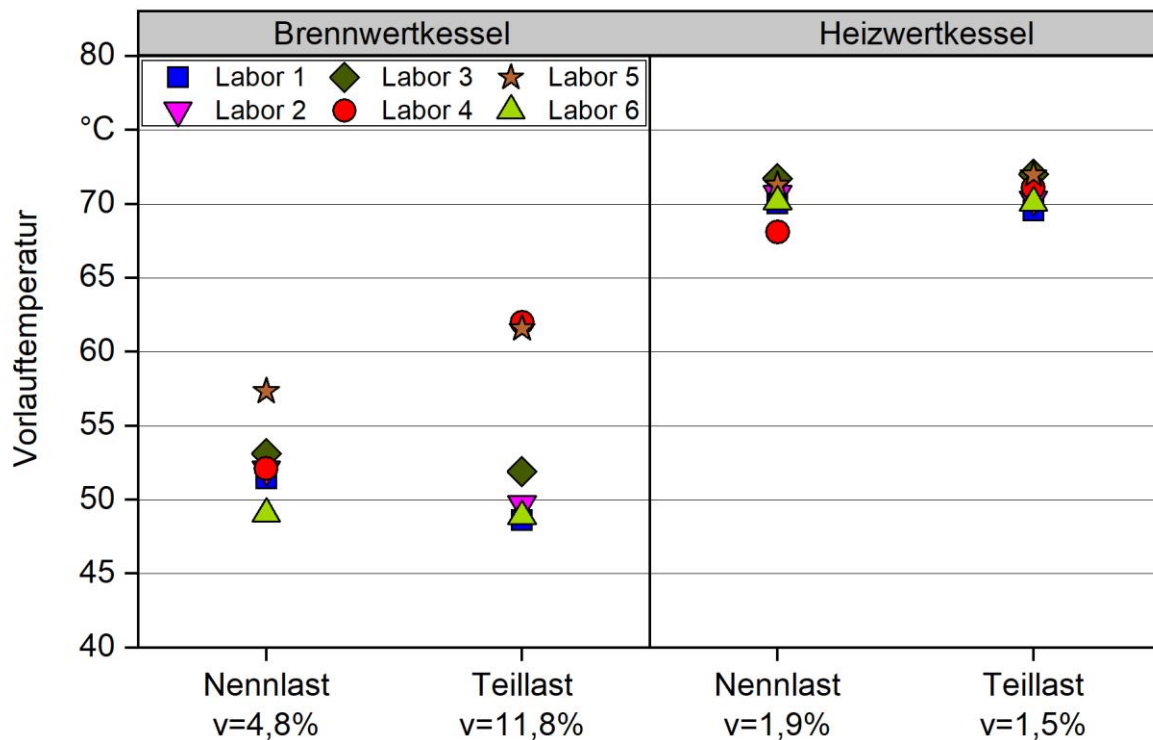


Abbildung 19: Vorlaufemperaturen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln

Kesselleistung. Die durch die Versuche bestimmte Kesselleistung bei Nenn- und Teillastbetrieb wurde auf die auf den Typenschildern angegebene Nennleistung bezogen (Abbildung 20). Die gewählten Einstellungen in Bezug auf Kesseltemperatur beeinflussen die abzugebende Wärmeleistung. Die Schwankungsbreite ist daher bei den jeweils an der Brennwertfeuerung bestimmten Wärmeleistungen höher (bei Nennlast: $v = 6,1\%$, bei Teillast: $v = 3,3\%$), während die Wärmeleistungen, die beim stationären Betrieb der Heizwertfeuerung bestimmt wurden, eine geringere Streuung zeigen (bei Nennlast: $v = 1,9\%$, bei Teillast: $v = 1,7\%$).

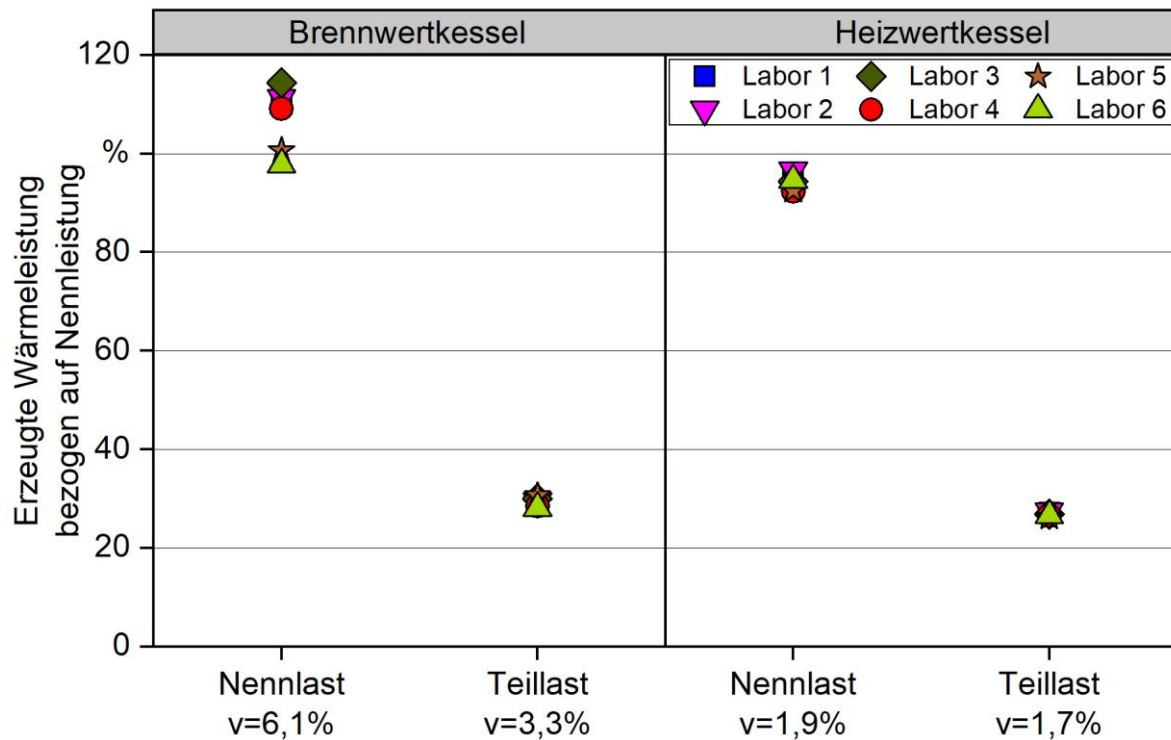


Abbildung 20: Vergleich von gemessener Leistung bezogen auf Nennleistung. v = Variationskoeffizient

Restsauerstoffgehalt. Als weiterer Parameter wurde der Restsauerstoffgehalt im Abgas zur Charakterisierung der Verbrennungsregelung betrachtet. Erneut ist die Schwankungsbreite der Messwerte beim Brennwertkessel höher als beim Heizwertkessel, aufgrund der unterschiedlich eingestellter Kessel-Soll-Temperatur beim Brennwertkessel (Abbildung 21).

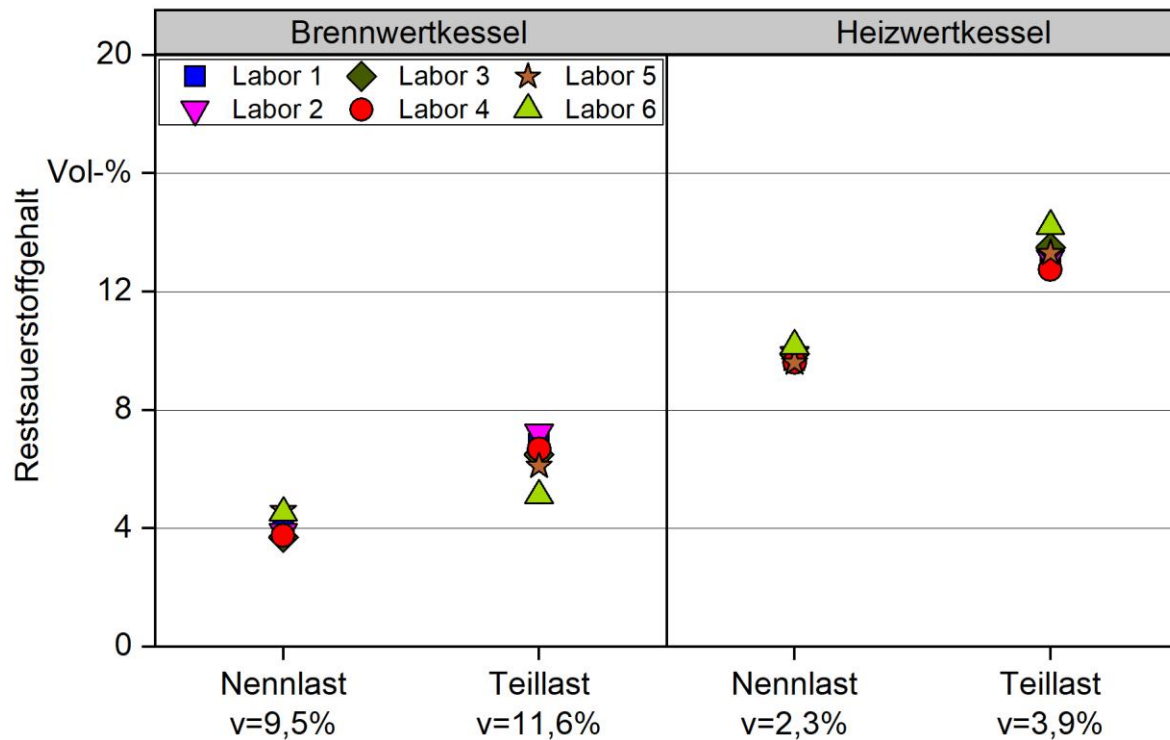


Abbildung 21: Restsauerstoffgehalt während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln.
 v = Variationskoeffizient

Soll-Temperatur-Kriterium. Das Soll-Temperatur-Kriterium muss beim Lastzyklus zu 60 % der Versuchszeit eingehalten werden, um sicherzugehen, dass die Feuerung auf einem entsprechend hohen Temperaturniveau gefahren wird. Das Minimum beträgt für Brennwertfeuerungen 50 °C und für Heizwertfeuerungen 70 °C. Diese Vorgabe wurde bei allen Lastzyklusversuchen (mit beiden Kesseln an allen Prüfständen) erfüllt. Die Schwankungsbreite ist bei der Brennwertfeuerung etwas höher ($v = 10,5 \%$; Heizwertfeuerung: $v = 3,5 \%$; Abbildung 22). Dies liegt daran, dass die Soll-Kesseltemperatur bei den Versuchen, die mit dieser Feuerung durchgeführt wurden, nicht einheitlich eingestellt war (siehe auch Vergleich der Vorlauftemperaturen der stationären Versuche; Abbildung 19).

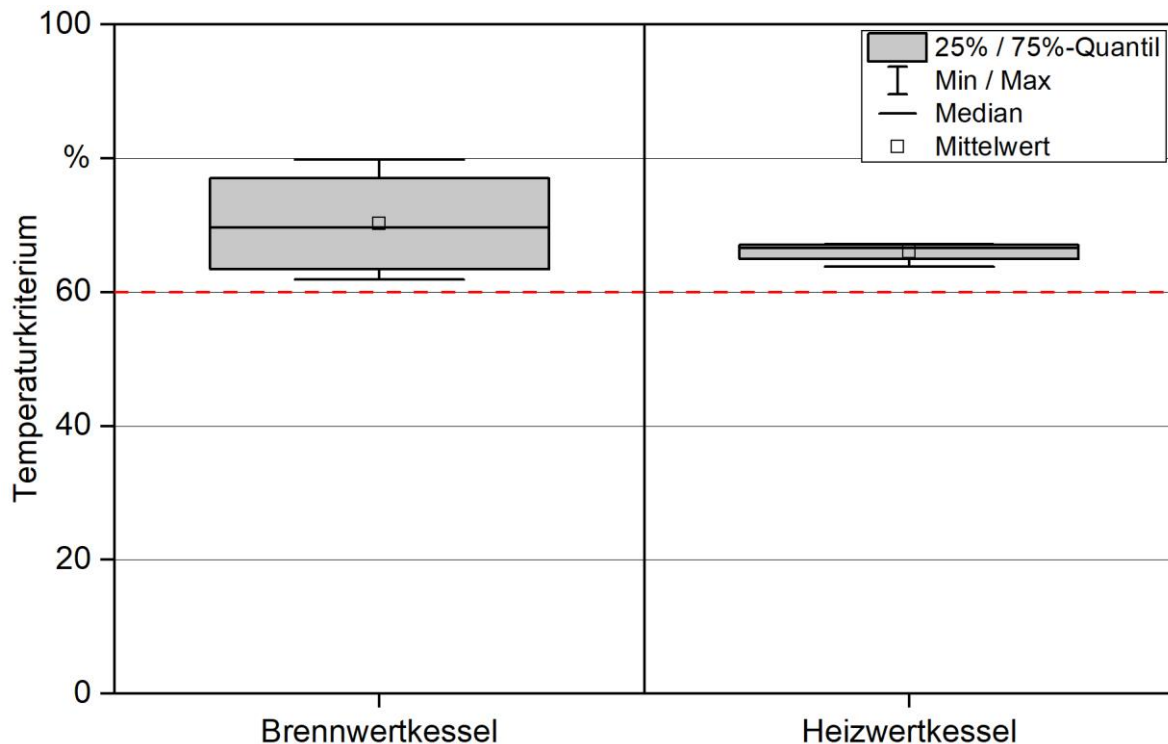


Abbildung 22: Rahmenbedingung Soll-Temperatur Bewertung der Kesseleinstellungen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln

4.2.3 Vergleich von Effizienz und Emissionen

In weiterer Folge werden die Ergebnisse der Versuche während des stationären Betriebs (Nennlast und Teillast) nach EN 303-5 sowie die Lastzyklus-Messung im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit verglichen.

Effizienz. Die Messergebnisse bezüglich der heizwertbezogenen Effizienz aller Labore sind in Abbildung 23 zusammengestellt. Wie erwartet konnte dabei für den Kessel mit Brennwerttechnik eine höhere Effizienz festgestellt werden als für den konventionellen Kessel. Die nach Tabelle 8 geforderte Genauigkeit bei der Bestimmung der heizwertbezogenen Effizienz (d. h. maximale Abweichung der Messwerte untereinander von 4 %) konnte lediglich bei den stationären Versuchen (Nenn- und Teillast) mit der Heizwertfeuerung eingehalten werden (Tabelle 9). Der Förderdruck wurde bei Labor 4 auf -30 Pa eingestellt anstatt auf den vom Hersteller vorgegebenen Wert von -15 Pa, obwohl diese Information auch den Ringversuchsteilnehmern zur Verfügung gestellt wurde.

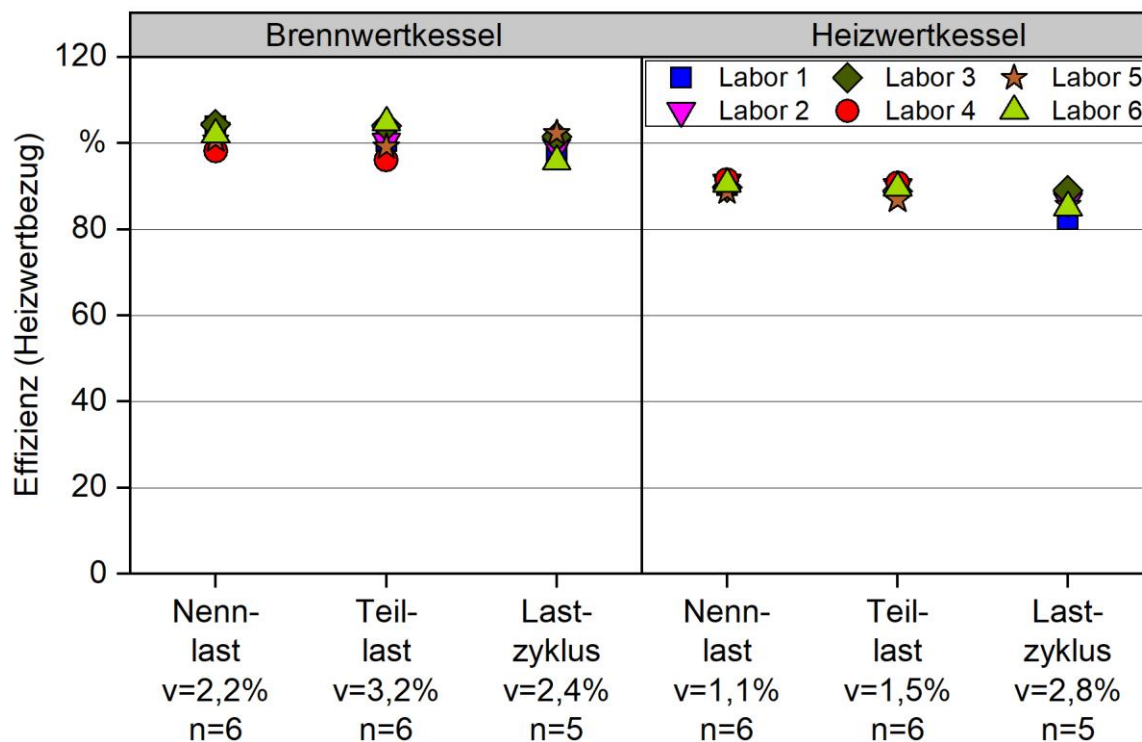


Abbildung 23: Ergebnisse zur heizwertbezogenen Effizienz im Ringversuch mit zwei Kesseln. Bei der angegebenen Varianz wurden die Ergebnisse von Labor 4 nicht berücksichtigt, wegen der fehlenden Brennstoffmassenbestimmung. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen

Tabelle 9: Ermittelte Effizienz: minimaler und maximaler Wert sowie maximale Abweichung. ^A Brennstoffverbrauch wurde nicht kontinuierlich erfasst. ^B Sollwert-Kesseltemperatur vermutlich falsch eingestellt

Labor	Brennwertkessel			Heizwertkessel		
	Wirkungs- grad Nenn- last in %	Wirkungs- grad Teil- last in %	Nutzungs- grad Last- zyklus in %	Wirkungs- grad Nenn- last in %	Wirkungs- grad Teil- last in %	Nutzungs- grad Last- zyklus in %
Labor 1	103,9	100,4	98,2	90,2	89,6	82,3
Labor 2	102,9	100,4	99,1	90,9	89,9	86,6
Labor 3	104,3	104,0	101,5	89,7	88,9	89,0
Labor 4	98,1 ^{A, B}	96,1 ^{A, B}	89,1 ^{A, B}	91,5 ^A	90,7 ^A	79,5 ^A
Labor 5	100,8 ^B	99,2 ^B	101,5 ^B	88,7	86,8	85,9
Labor 6	102,0	104,8	95,8	90,5	89,7	85,1
$\Delta\eta$ in %	6,2	8,7	12,4	2,8	3,9	9,5
Variations- koeffizient in %	2,2	3,2	4,8	1,1	1,5	4,0

Die Varianz der Messwerte für die etablierte Typenprüfung lag für den Heizwertkessel zwischen 1,1 % und 1,5 % und beim Brennwertkessel bei 2,2 bis 3,2 %. Etwas größere Unterschiede wurden beim Lastzyklus ermittelt und betrugen 4,0 % für den Heizwertkessel und 4,8 % für den Brennwertkessel. Werden die Messwerte von Labor 4 aufgrund der fehlenden kontinuierlichen Brennstoffmengenaufzeichnung nicht weiter berücksichtigt, so sinkt die Varianz auf 2,8 % für den Heizwertkessel bzw. auf 2,4 % für den Brennwertkessel und liegt dann im Bereich der Datenqualität einer Typenprüfung.

Mögliche Ursachen für den hohen Variationskoeffizienten bei der Bestimmung vom Nutzungsgrad sind:

- Abgastemperatur wurde evtl. falsch bestimmt
- Unterschiedlich hoher Bedarf an Hilfsenergie (Einfluss: u. a. Zündung, Lüfter, Brennstoffzufuhr, Schnecke zur Entaschung bzw. Rostbewegung)
- Platzierung der Temperaturfühler zu ungenau/nicht einheitlich,
- Einhaltung der Abschaltprozedur gemäß der Methode (Entnahme Restenergie),
- Ggf. Wärmedämmung der verwendeten Wasserschläuche,
- Herausforderung bei Brennwertkessel ist der Umgang mit dem Spülwasser.

CO-Emissionen. Die tolerierbare Schwankungsbreite der bestimmten CO-Emissionen (Abbildung 24) von 15 mg/MJ konnten mit der Brennwertfeuerung nur bei den stationären Versuchen eingehalten werden (Δ_{CO} bei Nennlastbetrieb: 12 mg/MJ; Δ_{CO} bei Teillastbetrieb: 9 mg/MJ), Tabelle 10. Der Variationskoeffizient ist bei den stationären Versuchen jedoch höher (28,9 % bzw. 51,8 %) als bei den Lastzyklusversuchen (28,5 %). Die Nennlastversuche mit der Heizwertfeuerung waren am besten reproduzierbar mit einer Schwankungsbreite von 13 mg/MJ ($v = 8,6 \%$). Sowohl die Schwankungsbreite der Teillastversuche (33 mg/MJ) als auch der Lastzyklusversuche mit der Heizwertfeuerung (51 mg/MJ) lagen höher als die Toleranzgrenze. Die beiden Variationskoeffizienten waren aufgrund des vergleichsweise hohen Emissionsniveaus gering (12,1 % bzw. 18,4 %). Die Daten von Labor 4 konnten nicht verwendet werden aufgrund der fehlenden Bestimmung des Abgasvolumenstroms und wurden bei der Auswertung der Lastzyklusversuche nicht berücksichtigt.

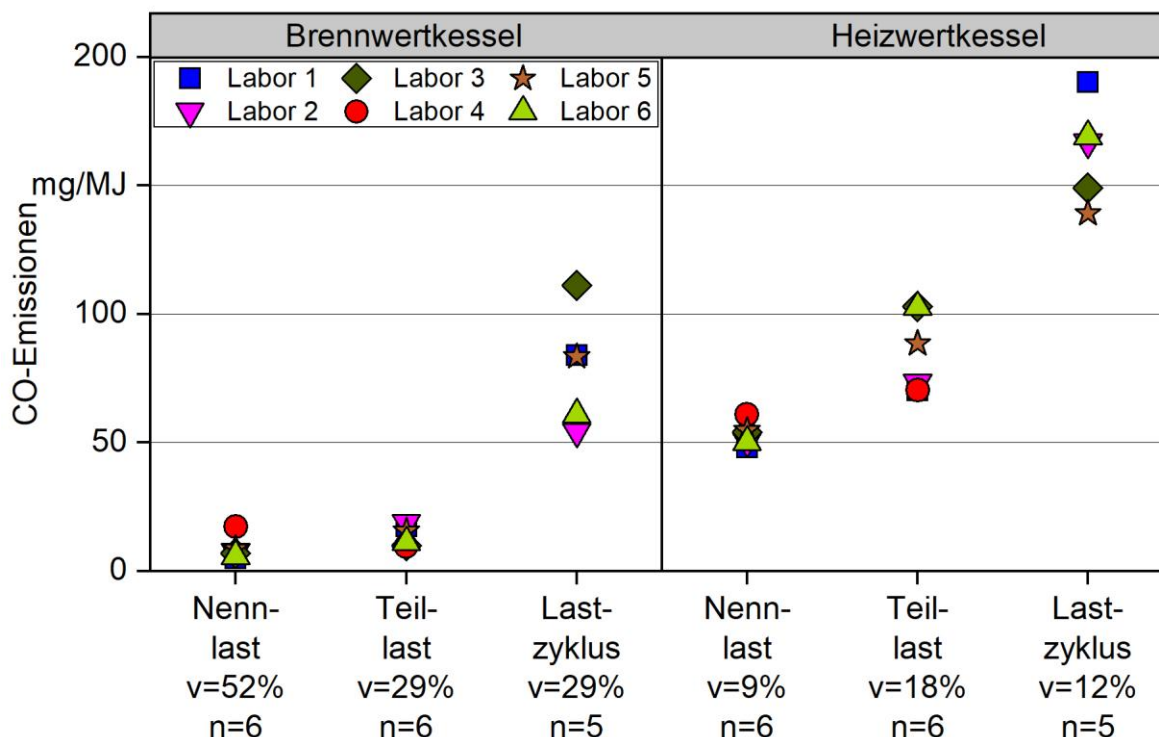


Abbildung 24: CO-Emissionen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln. Max. Abw: 15 mg/MJ. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen

Tabelle 10: CO-Emissionen während des Ringversuch an zwei Pelletkesseln. Bei Labor 4 wurden die Ergebnisse während des Lastzyklus nicht berücksichtigt aufgrund der fehlenden Volumenstrombestimmung (n. b.).

Labor	Brennwertkessel			Heizwertkessel		
	CO bei Nennlast in mg/MJ	CO bei Teillast in mg/MJ	CO im Lastzyklus in mg/MJ	CO bei Nennlast in mg/MJ	CO bei Teillast in mg/MJ	CO im Lastzyklus in mg/MJ
Labor 1	5,0	17,3	83,9	48,0	70,4	190,3
Labor 2	7,5	18,8	54,3	50,6	73,4	166,8
Labor 3	7,0	10,0	111,2	54,0	103,0	149,1
Labor 4	17,2	9,6	n. b.	60,8	70,4	n. b.
Labor 5	8,7	15,6	83,4	54,7	88,5	139,1
Labor 6	5,9	11,3	61,0	50,2	102,7	169,2
Δ CO	12,2	9,2	56,9	12,8	32,6	51,2
Variationskoeffizient in %	51,8	28,9	28,5	8,6	18,4	12,1

Org.-C-Emissionen. Die Emissionen an gasförmigen organischen Kohlenwasserstoffen war wie zu erwarten auf einem sehr niedrigen Niveau während der stationären Betriebs-

phasen, Abbildung 25. Vor allem der Brennwertkessel war sehr gut auf den Brennstoff eingestellt und setzte nahezu keine organischen Kohlenwasserstoffe frei. Etwas höher lagen die org.-C-Emissionen beim Heizwertkessel, Tabelle 11. Aufgrund der Berücksichtigung des Kesselstarts und der dynamischen Leistungsanpassung fallen die org.-C-Emissionen während des Lastzyklus höher aus. Labor 3 bestimmte keine org.-C-Emissionen während der stationären Messungen bei Nennlast und Teillast. Die Ergebnisse der Lastzyklusmessung von Labor 4 können nicht berücksichtigt werden wegen der fehlenden Abgasgeschwindigkeitsmessung.

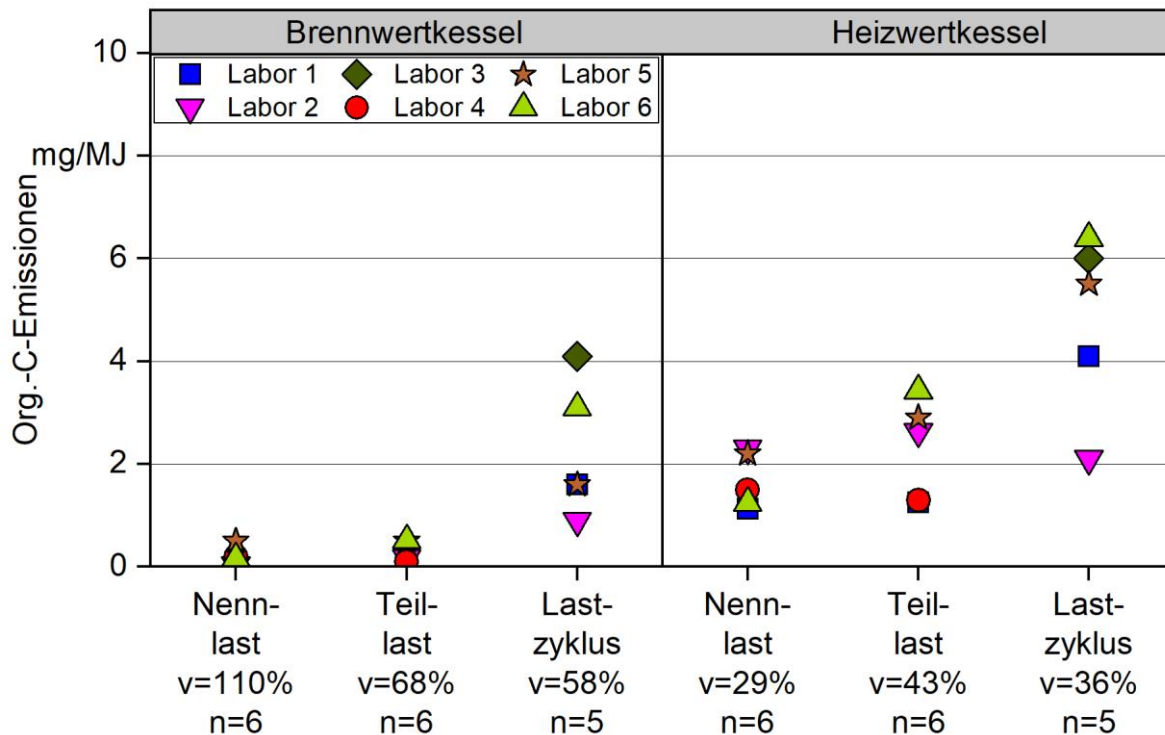


Abbildung 25: Org.-C-Emissionen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln.
Max. Abw: 3,5 mg/MJ. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen

Tabelle 11: *Org.-C-Emissionen während des Ringversuch an zwei Pelletkesseln. Bei Labor 4 wurden die Ergebnisse während des Lastzyklus nicht berücksichtigt aufgrund der fehlenden Volumenstrombestimmung. n. b. - nicht bestimmt*

Labor	Brennwertkessel			Heizwertkessel		
	Org.-C bei Nennlast in mg/MJ	Org.-C bei Teillast in mg/MJ	Org.-C im Lastzyklus in mg/MJ	Org.-C bei Nennlast in mg/MJ	Org.-C bei Teillast in mg/MJ	Org.-C im Lastzyklus in mg/MJ
Labor 1	0,01	0,0	1,6	1,1	1,3	4,1
Labor 2	0,03	0,2	0,9	2,3	2,6	2,1
Labor 3	n. b.	n. b.	4,1	n. b.	n. b.	6,0
Labor 4	0,2	0,1	n. b.	1,5	1,3	n. b.
Labor 5	0,5	0,5	1,6	2,2	2,9	5,5
Labor 6	0,16	0,5	3,1	1,3	3,4	6,4
Δ Org.-C	< 0,5	0,5	3,2	1,2	2,1	4,3
Variationskoeffizient in %	109,2	67,8	58,4	32,5	42,6	36,4

NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen sollten aufgrund des einheitlichen Brennstoffs bei den verschiedenen Betriebszuständen vergleichbar sein. Auffällig ist, dass die NO_x-Emissionen von Labor 1 deutlich höher ausfallen als bei den anderen Laboren, Abbildung 26 und Tabelle 12. In Labor 1 kam ein abgelaufenes Prüfgas für die Kalibration der Gasanalyse zum Einsatz, was diese Überschätzung der NO_x-Emissionen verursacht haben könnte. Erwartungsgemäß fallen diese Emissionen unter Nennlastbedingungen am höchsten aus, wegen der höchsten Temperaturen im Brennraum. Geringere NO_x-Emissionen wurden während des Teillastbetriebs bei allen Kesseln festgestellt. Die Ergebnisse der Lastzyklusmessungen ordnen sich zwischen den Teillast- und Nennlastergebnissen ein.

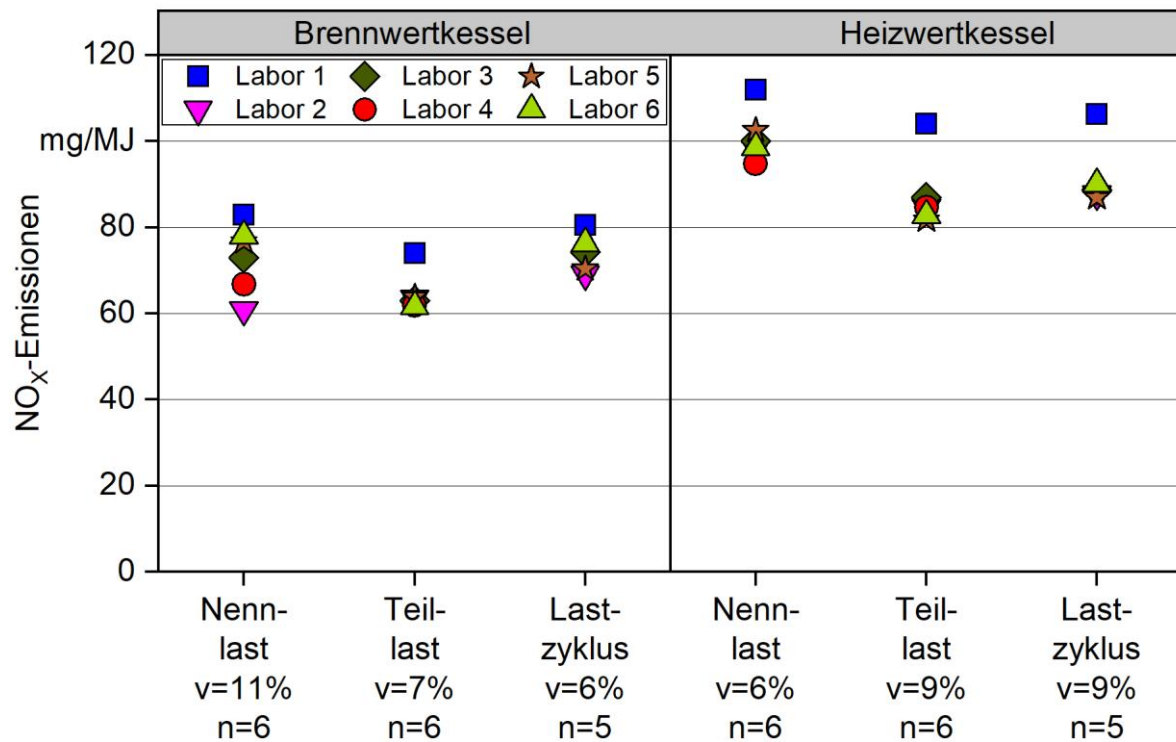


Abbildung 26: NO_x-Emissionen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln. Max. Abw: 15 mg/MJ. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen

Tabelle 12: NO_x-Emissionen während des Ringversuch an zwei Pelletkesseln. Bei Labor 4 wurden die Ergebnisse während des Lastzyklus nicht berücksichtigt aufgrund der fehlenden Volumenstrombestimmung (n. b.). ^A - Kalibration mit veraltetem Prüfgas und somit Überschätzung

Labor	Brennwertkessel			Heizwertkessel		
	NO _x bei Nennlast in mg/MJ	NO _x bei Teillast in mg/MJ	NO _x im Lastzyklus in mg/MJ	NO _x bei Nennlast in mg/MJ	NO _x bei Teillast in mg/MJ	NO _x im Lastzyklus in mg/MJ
Labor 1	83,0 ^A	73,9 ^A	80,6 ^A	112,0 ^A	104,0 ^A	106,2 ^A
Labor 2	60,8	63,6	69,1	98,4	84,6	87,7
Labor 3	73,0	63,0	74,3	100,0	87,0	88,7
Labor 4	66,8	61,9	n. b.	94,7	84,6	n. b.
Labor 5	76,7	63,8	70,4	102,5	81,7	86,9
Labor 6	78,1	61,7	76,3	98,6	82,8	90,1
ΔNO _x	22,2	12,2	11,5	17,3	22,3	19,3
Variationskoeffizient in %	11,0	7,2	6,2	5,9	9,5	8,8

Staub-Emissionen. Die Staubemissionen lagen beim Brennwertkessel allgemein auf einem sehr niedrigen Niveau, so dass kaum Unterschiede zwischen Teillast- und Nennlastmessungen erkennbar sind, Abbildung 27. Auch während des Lastzyklus kommt es zu fast keinem Anstieg der Staubemissionen aufgrund der sehr guten Regelung und Einstellung des Brennwertkessels auf den eingesetzten Pelletbrennstoff, Tabelle 13. Die maximale Abweichung der Messergebnisse lagen für diesen Kessel stets unter 4,5 mg/MJ. Im Gegensatz dazu lagen die Abweichungen beim Heizwertkessel bei deutlich über den in Tabelle 8 geforderten 4,5 mg/MJ. Erneut konnten die Ergebnisse von Labor 4 nicht bei der Lastzyklusmessung berücksichtigt werden. Auffällig ist, dass die Staubemissionen beim Heizwertkessel während des Lastzyklus für Labor 3 deutlich unterschätzt wurde. Der Grund hierfür bestand in einer zu frühen Beendigung der Staubmessung wodurch die Ausbrandphase des Heizwertkessels nicht vollständig berücksichtigt wurde. Die Varianz der Messergebnisse lag bei den stationären Messungen im Bereich der Lastzyklusmessungen. Labor 4 verwendete eine Trocknungstemperatur bei der Filternachbehandlung von 145 °C anstatt der vorgegebenen 180 °C. Aufgrund der niedrigen org.-C-Emissionen während der stationären Messungen dürfte sich das aber kaum auf die Staub-Emissionen auswirken, wie Erfahrungen zeigen [12].

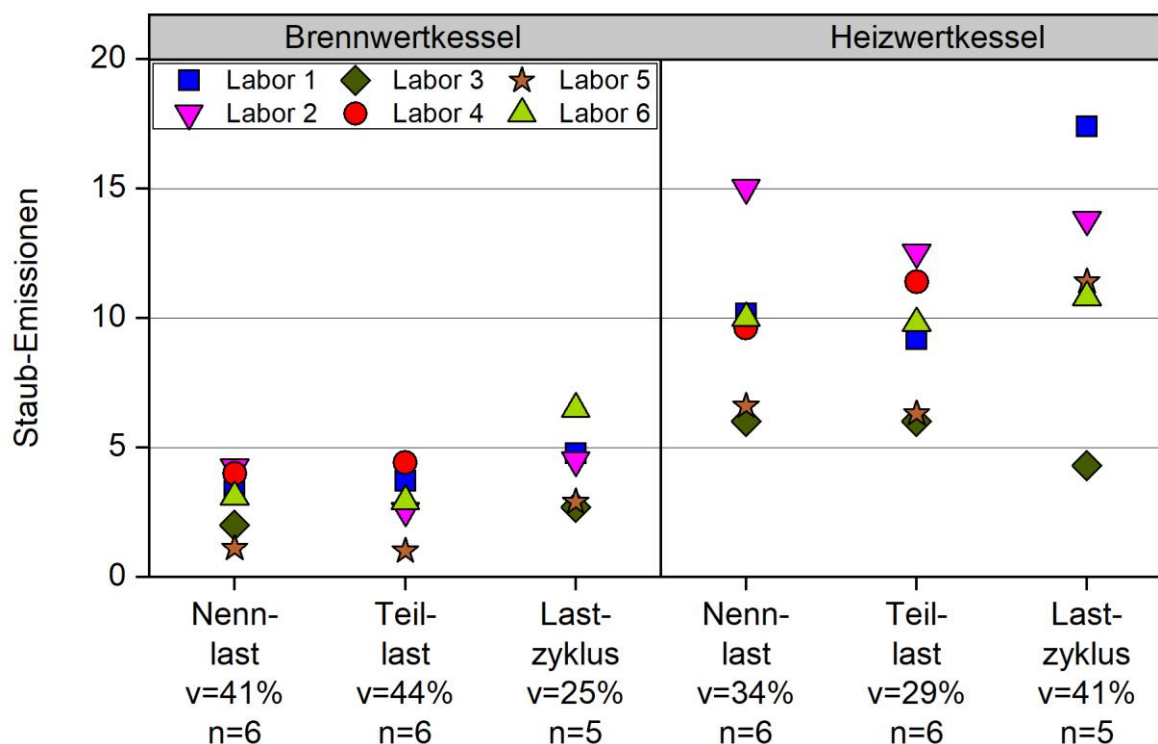


Abbildung 27: Staub-Emissionen während des Ringversuchs an zwei Pelletkesseln.
Max. Abw: 4,5 mg/MJ. v = Variationskoeffizient, n = Anzahl Messungen

Tabelle 13: *Staub-Emissionen während des Ringversuch an zwei Pelletkesseln. Bei Labor 4 wurden die Ergebnisse während des Lastzyklus nicht berücksichtigt aufgrund der fehlenden Volumenstrombestimmung (n. b.)*

Labor	Brennwertkessel			Heizwertkessel		
	Staub bei Nennlast in mg/MJ	Staub bei Teillast in mg/MJ	Staub im Lastzyklus in mg/MJ	Staub bei Nennlast in mg/MJ	Staub bei Teillast in mg/MJ	Staub im Lastzyklus in mg/MJ
Labor 1	3,3	3,7	4,8	10,2	9,2	17,4
Labor 2	4,2	2,6	4,5	15,0	12,5	13,8
Labor 3	2,0	n. b.	2,6	6,0	6,0	4,3
Labor 4	4,0	4,4	n. b.	9,6	11,4	n. b.
Labor 5	1,1	1,0	2,9	6,6	6,3	11,4
Labor 6	3,1	2,9	6,5	10,0	9,8	10,8
Δ Staub	3,1	3,4	3,8	9,0	6,5	13,1
Variationskoeffizient in %	40,7	44,1	36,7	33,7	28,8	41,4

Zusammenfassung der Ergebnisse. Die Ergebnisse zeigen nicht vernachlässigbare Varianzen der einzelnen Werte (Wirkungsgrad, Emissionen), insbesondere was den Betrieb der Brennwertfeuerung betrifft. Mögliche Gründe für Abweichungen zwischen den verschiedenen Ringversuchsteilnehmern könnten sein:

- Unterschiedliche Temperaturbereiche bei der Leistungsbestimmung (die Norm ermöglicht einen breiten Spielraum an möglichen Temperaturen),
- Positionierung der Temperaturfühler, Dämmungen etc. (mögliche Wärmeverluste),
- Falsche Kesseleinstellungen (um das zu vermeiden, wurden Solltemperaturen vom Ringversuchsorganisator vorgegeben, dies wurde jedoch nicht von allen Prüfständen so umgesetzt wie gefordert),
- Regelung des Förderdrucks im Kamin unterschiedlich eingestellt,
- Nicht einheitliche Messzeiten beim Lastzyklus,
- Unterschiedliche Messtechnik, Kalibrierungsgase,
- Verschiedene Versuchsaufbauten.

4.3 Bestimmung der Wiederholbarkeit (am gleichen Prüfstand)

Für die Bestimmung der Wiederholbarkeit der Messergebnisse am TFZ-Prüfstand wurde die Lastzyklus-Methode am Brennwertkessel von zwei verschiedenen Mitarbeiter*Innen

insgesamt fünfmal durchgeführt und die Werte sind in der nachfolgenden Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14: Messwerte zur Bestimmung der Wiederholbarkeit der Lastzyklus-Methode am TFZ am Brennwertkessel

Versuch	Effizienz in %	CO in mg/MJ	NO _x in mg/MJ	Org.-C in mg/MJ	Staub in mg/MJ	C-Bilanz in %
09.11.2021	98,2	114,4	75,2	4,6	2,3	3,9
10.11.2021	93,9	96,3	73,8	2,6	3,4	-1,0
11.11.2021	96,7	83,6	73,0	1,1	2,8	1,5
17.11.2021	101,3	92,1	67,7	1,0	4,5	1,5
18.11.2021	98,5	80,0	73,1	2,2	2,8	1,6
Mittelwert	97,7	93,3	72,6	2,3	3,2	1,5
Standardabweichung	2,4	12,1	2,6	1,3	0,8	1,6
Minimum - Maximum	7,4	34,4	7,5	3,6	2,2	4,9
Variationskoeffizient in %	2,8	14,4	3,9	63,5	26,7	115,6

Die Abweichung bei der Kohlenstoffbilanz lag bei allen Versuchen am Brennwertkessel zwischen 1,0 % und 3,9 % und somit konnte das Qualitätskriterium bezüglich der Kohlenstoffbilanz von unter 5 % stets eingehalten werden.

Die Effizienz des Kessels lag in der Regel zwischen 96,7 und 101,3 %, lediglich am zweiten Messtag fiel dieser Wert mit 93,9 % geringer aus. Die CO-Emissionen unterlagen leichten Schwankungen zwischen 80 und 114 mg/MJ. Vier von fünf Werte der NO_x-Emissionen liegen sehr dicht beieinander, lediglich der Wert mit 67,7 mg/MJ fällt hier etwas heraus, da die Effizienz an diesem Versuchstag am höchsten war, was auf eine eher niedrige Brennraumtemperatur und somit verringerte NO_x-Bildung hindeutet. Die org.-C-Emissionen lagen auf einem sehr niedrigen Niveau und konnten gut reproduziert werden.

4.4 Vergleich des Kesselzustands zu Beginn und am Ende des Ringversuchs

Beide Biomassekessel wurden zu Beginn des Ringversuchs durch einen Partner bei Nennlast, Teillast und mit der Lastzyklus-Methode vermessen. Um eventuelle Veränderungen oder Beschädigungen des Kessels während der Reise zu den verschiedenen Laboren aufzudecken, wurden die Messungen an beiden Kesseln vom jeweiligen Partner wiederholt.

Bei den Vergleichsmessungen am Brennwertkessel zeigen sich kaum Unterschiede zwischen der Anfangs- und Endmessung, Tabelle 15. Es wird jedoch deutlich, dass aufgrund

zahlreicher Versuche (auch an anderen Brennwertkesseln) mit der Lastzyklus-Methode die Kohlenstoffbilanz bei der Endmessung deutlich besser geschlossen werden konnte und die Anfangsmessung sogar außerhalb der Toleranz bezüglich der Methodenbeschreibung lag. Ergänzend sind die C-Bilanzen für die stationären Versuche bei Nenn- und Teillast mit aufgeführt, um aufzuzeigen, dass ein solches Überprüfungskriterium auch hier möglich wäre. Alle anderen Emissionswerte liegen auf einem vergleichbaren Niveau und zeigen somit, dass der Kessel keinerlei Schäden durch die zwischenzeitliche Benutzung oder während des Transports erlitten hat.

Tabelle 15: Vergleich der Messergebnisse zu Beginn und am Ende des Ringversuchs mit dem Brennwertkessel

Versuch	Effizienz in %	CO in mg/MJ	NO _x in mg/MJ	Org.-C in mg/MJ	Staub in mg/MJ	C-Bilanz in %
Nennlast-Anfang	102,0	5,9	78,1	0,2	3,1	-3,6
Nennlast-Ende	102,1	6,1	74,2	0,0	5,0	-2,7
Teillast-Anfang	104,8	11,2	61,6	0,5	2,5	-5,6
Teillast-Ende	100,9	9,3	66,9	0,0	3,8	7,5
Lastzyklus-Anfang	95,8	61,0	76,3	3,1	6,5	-9,4
Lastzyklus-Ende	96,7	83,6	73,0	1,1	2,8	1,5

Auch beim Heizwertkessel konnten vergleichbare Messwerte zu Beginn und am Ende des Ringversuchs ermittelt werden, Tabelle 16, und bestätigen eine Unversehrtheit des Kessels nach dem Herumschicken.

Tabelle 16: Vergleich der Messergebnisse zu Beginn und am Ende des Ringversuchs mit dem Heizwertkessel

Versuch	Effizienz in %	CO in mg/MJ	NO _x in mg/MJ	Org.-C in mg/MJ	Staub in mg/MJ	C-Bilanz in %
Nennlast Anfang	90,1	47,9	111,9	1,1	10,2	-1,9
Nennlast Ende	89,6	53,4	108,6	0,6	10,4	-0,1
Teillast Anfang	89,5	70,3	103,9	1,3	9,0	2,9
Teillast Ende	90,7	91,2	98,4	1,6	10,0	-4,4
Lastzyklus- Anfang	82,3	190,3	106,2	4,1	17,4	-4,3
Lastzyklus- Ende	84,2	187,3	98,9	3,4	20,8	-3,9

4.5 Zusammenfassung der Validierung der Lastzyklus-Methode

Die Validierung umfasste 12 Testreihen (2 Kessel, jeweils Nenn- und Teillastbetrieb sowie Lastzyklus-Methode) von sechs Ringversuchs-Partnern.

Die Ergebnisse im Hinblick auf Wirkungsgrad und Emissionen sind reproduzierbar - zumindest ist die Reproduzierbarkeit vergleichbar mit den stationären Versuchen.

Um die Anforderungen an die Datenqualität zu erfüllen, ist es wichtig, die Rahmenbedingungen hinsichtlich Versuchsaufbau und -ablauf präzise zu erfüllen. Das Auswertungstool verifiziert die Datenqualität.

- die Validierung der entwickelten Lastzyklus-Methode zeigt, dass deren Anwendung zur Bestimmung realitätsnaher Emissionen und des Nutzungsgrades für Pellet-Zentralheizungskessel empfohlen werden kann.
- Ein besonderes Augenmerk muss daraufgelegt werden, dass die durchführenden Prüfinstitute die besonderen Anforderungen im Hinblick auf Messtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsablauf vollständig einhalten.
- Die bisher vorliegenden Daten lassen bereits erkennen, dass die Lastzyklus-Methode eine verbesserte Differenzierung zwischen den Feuerungsanlagen ermöglicht.
- Die Lastzyklus-Methode wird vollständig in englischer Sprache dokumentiert und publiziert, so dass auch auf internationaler Ebene für die Wissenschaft, Industrie und Behörden eine kostenlose Dokumentation dauerhaft zur Verfügung steht.

5 Erstellung der Datengrundlage (Serienuntersuchung)

Um die Auswirkung einer realen Betriebsweise von automatisch beschickten Kesseln im Vergleich zu den stationären Versuchen nach der Typenprüfung zu untersuchen, wurden acht Pelletkessel mit einem einheitlichen Pelletbrennstoff betrieben. Zusätzlich kamen zwei Holzhackschnitzelkessel zum Einsatz, in welchen vier unterschiedliche Holzhackschnitzelqualitäten verbrannt wurden. Alle Daten wurden in einer Datenbank zusammengeführt. Neben dem realen Betrieb der automatisch beschickten Biomassekessel wurde auch die Anbindung an einen Pufferspeicher während der neuen Prüfmethode beurteilt.

5.1 Material

5.1.1 Eingesetzte Feuerungen

Die Anlagen wurden so ausgewählt, dass ein breites Spektrum abgedeckt werden konnte, z. B. technologische Reife, Verbrennungstechnik oder Regelungsstrategie. Um die Interessen der Kesselhersteller zu wahren, deren Produkte für die Erstellung der Datenbasis getestet wurde, erfolgt an dieser Stelle weder eine Auflistung der Modelle noch eine detaillierte Übersicht über Nennleistung, Technologie usw.

Im Jahr 2019 (Beginn des CycleTest Projektes) betrug der Anteil an Pellet- bzw. Pelletkombikessel 59 % ($n = 12.564$) der über das Marktanreizprogramm für Erneuerbare Energien (MAP) geförderten Holzheizungen ($n=21.365$), während der Anteil an Hackgutheizungen ($n = 2.069$) nur bei 10 % lag [14]. Da Pelletkessel somit für den Markt eine um den Faktor 10 höhere Bedeutung haben, entschied sich das Projektkonsortium dazu, den Hauptfokus für die Projektlaufzeit auf Pelletfeuerungen zu legen, zumal auch hier eine große Variantenvielfalt gegeben ist (z. B. Brennwert- und konventionelle Feuerungen ohne kondensierenden Betrieb). Zur Zielerreichung des Vorhabens – Validierung der Methodik – war es nicht zwingend erforderlich, jeweils fünf Pellet- und Holzhackschnitzelkessel für die Serienuntersuchung zu testen, sondern vielmehr, mit der Datenbasis die Geräte abzubilden, die in den Wohngebäuden am häufigsten installiert wurden. Daher kamen insgesamt acht Pelletkessel und zwei Holzhackschnitzelkessel zum Einsatz.

Der brennstoffseitige Einfluss von weitgehend homogenen Holzpellets, welche bereits im Ringversuch in Kapitel 4 zum Einsatz kamen, ist gering. Dadurch können die Unterschiede der Pelletfeuerungen (Konstruktion, Regelungstechnik) und deren Auswirkungen auf Messgrößen (Emissionen, Effizienz) besser dargestellt werden. Die prinzipielle Anwendbarkeit der Lastzyklus-Methode für Holzhackschnitzelfeuerungen wurde ebenfalls untersucht, indem die Versuchsdaten von zwei unterschiedlichen Holzhackschnitzelfeuerungen in die Serienuntersuchung aufgenommen werden, anhand derer auch der Einfluss von vier unterschiedlichen Holzhackschnitzelqualitäten untersucht wurden. Im Vergleich zu Holzpellets ist die Schwankungsbreite der am Markt erhältlichen Qualitäten deutlich größer. Um spezifische Anforderungen an den Versuchsaufbau identifizieren und im

Prüfstands-Handbuch berücksichtigen zu können, z. B. die Brennstoffzufuhr über Raumaustrag, wurden zwei Holzhackschnitzelkessel getestet.

Für den Anlagenvergleich wurden unterschiedliche Feuerungs-Technologien gewählt, um ein breites Spektrum an marktüblichen Heizungen abzudecken:

- Anzahl Betriebsstunden und Zustand
 - Fabrikneue Feuerung (ohne "Grundverschmutzung")
 - Feuerungen, die beim Hersteller bereits "eingefahren" wurden
 - Feuerungen, die seit mehreren Jahren in Betrieb waren
- Feuerungsprinzipien
 - Unterschubfeuerungen
 - Abwurffeuerungen
 - Anlagen mit beweglichem Rost
- Temperaturniveau
 - Konventionelle Feuerungen
 - Brennwertfeuerung
- Feuerung mit speziellen Eigenschaften, z. B.
 - Gluterhaltungsbetrieb
 - integrierte Abgasrezirkulation
 - integrierter, elektrostatischer Staubabscheider
 - Regelungskonzepte (siehe auch Abschnitt 2.1)
 - Betrieb nur mit angebundenem Pufferspeicher zulässig.

Insgesamt wurden drei Pelletkessel (01 bis 03) mit Brennwerttechnik getestet und fünf konventionelle Pelletkessel (04 bis 08), wobei Kessel 08 einen integrierten, elektrostatischen Staubabscheider besaß. Die beiden Holzhackschnitzelkessel waren die Kessel 09 und 10 in der weiteren Berichterstattung.

Zur generellen Einordnung der neuen Prüfmethode wurde der Vergleich der Typen- versus Lastzyklus-Methode außerdem auch an einem Heizölkessel (ohne Pufferspeicher) durchgeführt. Damit wurden nicht nur die prüftechnischen Grundlagen im Hinblick auf ihre Übertragbarkeit auf andere Anwendungsbereiche überprüft (für Ölkessel existieren ebenfalls keine realitätsnahen Norm-Prüfabläufe), sondern es wurde auch eine erste Einschätzung der grundsätzlichen Lastwechsel-Sensibilität zwischen den Heizungsarten ermöglicht (d. h. Vergleich Holzkessel mit bzw. ohne Pufferspeicher versus Ölkessel ohne Pufferspeicher).

Der im Projekt eingesetzte Ölkessel war schon älter als 25 Jahre und es handelt sich dabei nicht um einen Blaubrenner.

5.1.2 Pufferspeicher

Die Einbindung von Pufferspeichern ist seit Januar 2021 mit der neuen Förderrichtlinie zur Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG [6]) auch für Pelletheizungen relevant. Aus diesem Grunde wurde der ursprüngliche Versuchsplan erweitert, indem alle Biomassekessel, die für die Serienuntersuchung geprüft wurden, mit und ohne Pufferspeicher betrieben wurden. Dafür wurden zwei baugleiche Pufferspeicher (einer für das TFZ und einer für den Projektpartner BEST) mit diversen zusätzlichen Anschlüssen erworben, um eine flexible Anbindung an verschiedene Kessel mit unterschiedlicher Leistung zu ermöglichen. Gehrungsrohre verhelfen zu einer guten Durchströmung bei der Temperierung. Die Volumina der einzelnen Anschlusshöhen wurden durch Auslitern bestimmt (Abbildung 28).

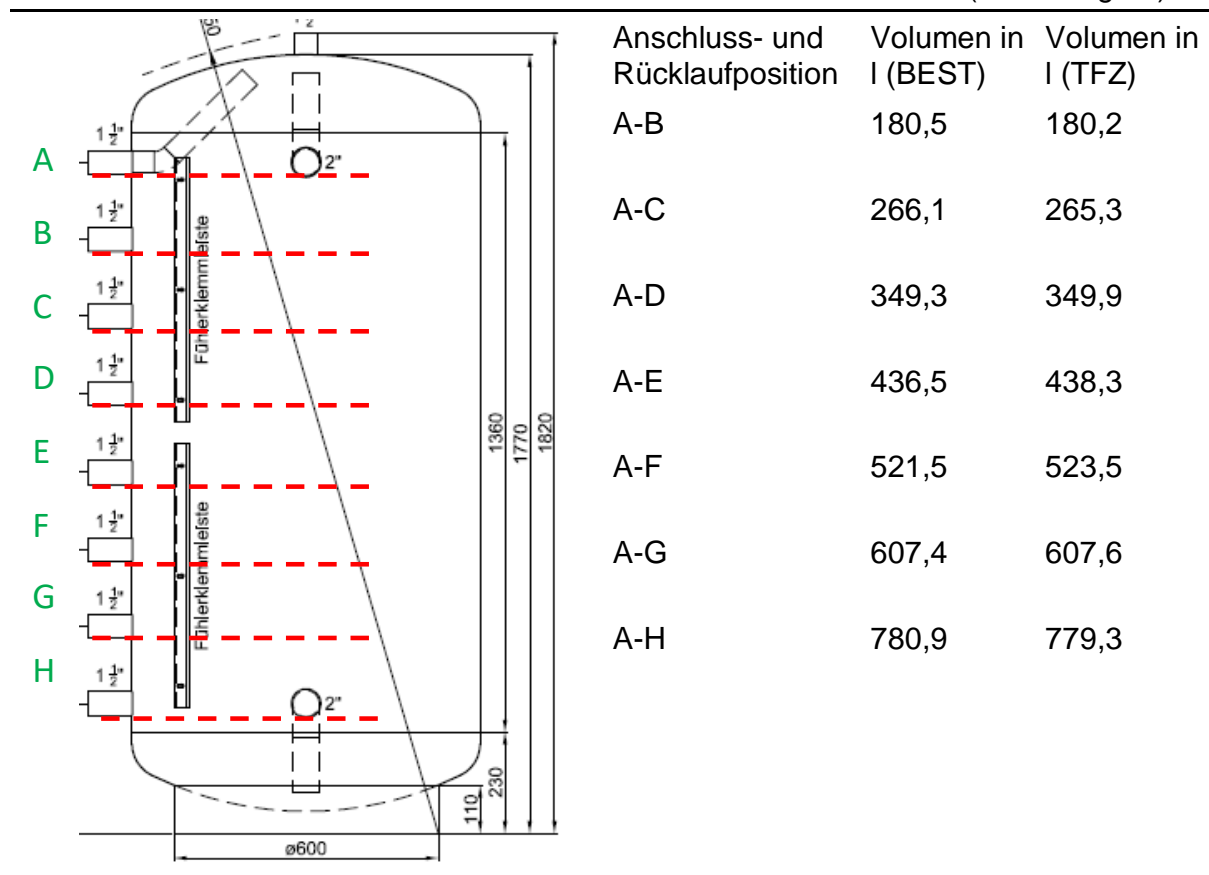


Abbildung 28: Konstruktions-Skizze des Pufferspeichers mit Volumina der einzelnen Anschlussmöglichkeiten. Bildquelle: TWL-Technologie GmbH

Durch die variablen Volumina kann ein breites Spektrum an Puffergrößen abgedeckt und die Vorgabe des BEG von einem Puffervolumen von 30 L/kW (Pelletkessel) mit relativ geringen Schwankungen eingehalten werden. Da von den Herstellern unterschiedliche Fühlertypen sowie unterschiedliche Anzahl an Fühlern verwendet werden, war bei der Auswahl relevant, dass die Klemmleiste zugänglich war. Aus diesem Grund konnte kein

Pufferspeicher der höchsten Dämmklasse mit Vakuumisolierung (Klasse A) verwendet werden. Die gewählte Isolierung ist abnehmbar und ermöglicht eine flexible Anbringung der Anlegefühler.

Da die Pufferspeicher speziell für die CycleTest-Versuche angefertigt wurden, kann der Hersteller nur einen Näherungswert für die Wärmeverluste angeben (73 W; Kategorie B). Die zusätzlich angebrachten Anschlüsse verändern den ursprünglich gemessenen Wert dieser Pufferkategorie.

Im Rahmen der Versuche mit und ohne Pufferanbindung wurde untersucht, wie sich Emissionen und Nutzungsgrad verändern, und ob eine Anbindung an einen Pufferspeicher zwangsläufig von Vorteil ist, oder ob man zwischen Technologien differenzieren muss. Es liegen bisher noch keine Untersuchungen vor, die nachweisen, dass der Schadstoffausstoß bei einem Betrieb mit Pufferspeicher signifikant geringer ist. Dieser Vorteil würde dann dem Nachteil eines höheren Wärmeverlusts und folglich dem geringeren Nutzungsgrad gegenüberstehen. Da die zehn Feuerungen, die für die Serienuntersuchung (Nennlast, Teillast, Lastzyklus) geprüft wurden, ohnehin auf dem Prüfstand installiert wurden, war der Mehraufwand (Lastzyklus-Versuche mit Pufferspeicher-Anbindung) vertretbar und ermöglicht nun den Vergleich von realitätsnahen Daten, d. h. unterschiedliche Feuerungen mit unterschiedlichem Ladeverhalten beim Betrieb mit und ohne Pufferspeicher.

5.1.3 Versuchsbrennstoffe

Holzpellets. Die eingesetzten Versuchsbrennstoffe wurden auf ihrer Brennstoffeigenschaften analysiert. Vorrangig kam das Pelletsortiment A zum Einsatz, hierbei handelt es sich um die homogenisierte Pelletcharge, welche auch im Ringversuch zum Einsatz kam. Das Pelletsortiment B kam lediglich bei den Versuchen am Kessel 06 zum Einsatz. Die Eigenschaften beider Pelletsortimente sind sehr ähnlich, Tabelle 17. Bei einer Vergleichsmessung an Kessel 06 unter Nennlastbedingungen zeigte sich, dass die NO_x-Emissionen mit den Pellets B um ca. 20 % geringer ausfielen, was auf einen geringeren Stickstoffgehalt im Brennstoff B zurückgeführt werden kann. Alle anderen Emissionswerte waren auf einem vergleichbaren Niveau.

Tabelle 17: *Relevante Brennstoff-Eigenschaften der Holzpellets (ar - im Anlieferungszustand "as received", d - trocken, n. b. - nicht bestimmt)*

Eigenschaft	Einheit	Pellets A (TFZ)	Pellets B (BEST)
Wassergehalt	m-%, ar	6,6 bis 7,3*	5,7 bis 5,9*
Aschegehalt	m-%, d	0,34	0,32
Heizwert	kJ/kg, d	18.843	18.590
Brennwert	kJ/kg, d	20.213	k. A.
Mechanische Abriebfestigkeit	m-%, ar	99,0	n. b.
Schüttdichte	kg/m ³ , ar	688	n. b.
Partikeldichte	kg/m ³ , ar	1209	n. b.
Kohlenstoff	m-%, d	50,5	49,6
Stickstoff	m-%, d	0,07	< 0,1
Wasserstoff	m-%, d	6,3	6,2
K-Gehalt	mg/kg, d	417	330
Si-Gehalt	mg/kg, d	217	39

*wurde bei jeder Versuchsreihe neu bestimmt

Holzhackschnittzel. Für die Untersuchung der Brennstoffqualität auf das Emissionsverhalten bei verschiedenen Versuchsbedingungen wurden vier Hackschnittzelsortimente beschafft. Hierbei handelt es sich um Fichten-Energierundholz (Fi-Erh), Fichten-Waldrestholz (Fi-Wrh), Buchen-Energierundholz (Bu-Erh) und Buchen-Waldrestholz (Bu-Wrh), Abbildung 29. Alle Brennstoffchargen wurden sortenrein hergestellt und am TFZ mit der vorhandenen Satz Trocknung [13] technisch auf einen Wassergehalt von ca. 15 m-% getrocknet. Damit sollte der Einfluss des Wassergehalts minimiert werden.





Abbildung 29: Untersuchte Holzhackschnitzel-Qualitäten. Buche Energierundholz (oben links), Buche Waldrestholz (oben rechts), Fichte Energierundholz (unten links), Fichte Waldrestholz (unten rechts).

Die wesentlichen Eigenschaften der vier Holzhackschnitzelsortimente sind in Tabelle 18 zusammengestellt. Die beiden Sortimente aus Waldrestholz überschreiten den Aschegehalt von 1,0 m-% (Tabelle 5), da diese Brennstoffe bereits vor der Festlegung der Eigenschaften der Testbrennstoffe ausgewählt wurden und somit eine etwas größere Bandbreite der Brennstoffqualität abgedeckt werden sollte.

Tabelle 18: Relevante Brennstoff-Eigenschaften der Holzhackschnitzel, Fi - Fichte, Bu - Buche, Erh - Energierundholz, Wrh - Waldrestholz, ar - im Anlieferungszustand "as received", d - trocken

Eigenschaft	Einheit	Fi-Erh	Fi-Wrh	Bu-Erh	Bu-Wrh
Wassergehalt	m-%, ar	16,3...17,8*	17,3...19,1*	14,5...17,5*	17,7...19,6*
Aschegehalt	m-%, d	0,57	1,63	0,57	1,31
Heizwert	kJ/kg, d	19.055	19.459	18.346	19.630
Brennwert	kJ/kg, d	20.298	20.700	19.590	19.842
Kohlenstoff	m-%, d	50,8	52,2	49,5	50,0
Stickstoff	m-%, d	0,14	0,37	0,17	0,29
Wasserstoff	m-%, d	5,7	5,7	5,7	5,7
Schüttdichte	kg/m ³ , ar	194,6	220,8	293,5	265,8
Feinanteil	m-%, ar	5,2	16,7	4,9	4,8
Partikelgrößenklasse	-	P31s	keine Klasse	P31s	P31s
Partikel < 16 mm	m-%, ar	57,8	79,1	52,0	54,8

*wurde bei jeder Versuchsreihe neu bestimmt

Öl für den Ölkessel. Für den Ölkessel wurde Diesel eingesetzt und ebenfalls analysiert. Die Ergebnisse können Tabelle 19 entnommen werden.

Tabelle 19: Relevante Eigenschaften des verwendeten Flüssigbrennstoffs, d - trocken

Eigenschaft	Einheit	Probe 1	Probe 2
Heizwert	kJ/kg, d	43.391	43.135
Kohlenstoff	m-%, d	85,5	85,0
Stickstoff	m-%, d	< 0.5	< 0.5
Wasserstoff	m-%, d	14,7	14,6

5.1.4 Prüfberichte mit Ergebnissen der Typenprüfung

Als weitere „Datenbasis für Gütesiegelanforderungen“ dient die Auswertung von offiziellen Prüfberichten (Typenprüfung nach EN 303-5). Die Werte dieser Prüfberichte dienen als Basis der Berechnung von „Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad“ und „Raumheizungs-Jahres-Emissionen“ nach der Ökodesign-Verordnung. Insgesamt liegen bislang

- 78 Berichte von Typenprüfungen von Pelletfeuerungen (Zeitraum: 2010 bis 2015) und
- 63 Berichte von Typenprüfungen von Holzhackschnitzelfeuerungen (Zeitraum: 2005 bis 2015)

vor. Die jeweiligen Ergebnisse wurden von BEST in eine Datenbank eingepflegt.

Die Messwerte der relevanten Emissionen CO, org. Kohlenstoff, NO_x und Staub wurden in die Einheit mg/Nm³ bei 10 % Restsauerstoff umgerechnet, um die entsprechenden Werte nach den in der Ökodesign-Verordnung genannten Formeln ermitteln zu können.

5.2 Ergebnisse für die Serienuntersuchung ohne und mit Pufferspeicheranbindung

Mit allen acht Pelletkesseln sowie den beiden Holzhackschnitzelkesseln wurde folgendes Versuchsprogramm durchgeführt:

- Nennlast nach EN 303-5 (NL),
- Teillast nach EN 303-5 (TL),
- Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicheranbindung (LC) und
- Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung (LCP).

Jede Versuchsvariante beanspruchte mindestens einen Arbeitstag. Bei den beiden Mess-tagen mit dem Lastzyklus lag am Ende für jeden Prüfparameter jeweils ein Messwert für die gesamte Methode vor. Bei den beiden stationären Versuchen wurden die Werte fünf-bis sechsmal über je eine halbe Stunde ermittelt und zu einem Mittelwert

zusammengefasst. Auf die Darstellung dieser Einzelwerte und auf deren Reproduzierbarkeit bei Nennlast und Teillast wird hier verzichtet.

Am TFZ wurden fünf von acht Pelletkessel sowie die beiden Holzhackschnitzelkessel untersucht. Drei von acht Pelletkessel kamen beim Projektpartner BEST zum Einsatz. Nachfolgend werden alle erzielten Ergebnisse grafisch dargestellt und bewertet.

5.2.1 Feuerungsseitiger Einfluss bei acht Pelletkesseln

Für alle Versuche wurde stets die gleiche homogenisierte Pelletcharge verwendet, außer bei Pelletkessel 06. Jeder Pelletkessel verfügte über einen integrierten Vorratsbehälter, so dass keine externe Brennstoffzufuhr aus einem Bunker oder anderen Vorratsbehälter erforderlich war. Die Pelletkessel standen jeweils auf einer Plattformwaage, wobei sichergestellt wurde, dass der Versuchsaufbau möglichst gut entkoppelt wurde, damit eine zuverlässige Brennstoffmengenerfassung erfolgte.

Die Pelletkessel wurden bei Nennlast, Teillast und nach der Lastzyklus-Methode ohne und mit Pufferspeicheranbindung betrieben. Bei der dynamischen Prüfmethode ohne und mit Pufferspeicheranbindung kam es bei einigen Kesseln zu Neustarts, was in Tabelle 20 zusammengefasst ist.

Tabelle 20: Anzahl der Pelletkesselstarts (ohne Kaltstart) während der Lastzyklus-Methode ohne (LC) und mit Pufferspeicheranbindung (LCP)

Kessel	01	02	03	04	05	06	07	08
LC	0	0	1	6	1	1	2	5
LCP	0	0	0	0	0	1	0	1

CO-Emissionen. Der Vergleich der gemessenen CO-Emissionen bei den unterschiedlichen Betriebszuständen der acht Pelletkessel ist in Abbildung 30 zusammengestellt. Erwartungsgemäß fallen die CO-Emissionen bei allen Pelletkesseln unter Nennlastbedingungen (NL) am geringsten aus und liegen zwischen 4 und 74 mg/MJ. Zum Teil deutlich höhere CO-Emissionen wurden während des Teillastbetriebs (TL) bei circa 30 Prozent Kesselleistung ermittelt. Die höchsten CO-Emissionen traten fast immer im Lastzyklus (LC) auf (außer Kessel 01) und lagen zwischen 84 und 626 mg/MJ. Das liegt vor allem in der Berücksichtigung des Kesselstarts zu Beginn, der Leistungsveränderungen, aber auch an den ggf. erforderlichen Neustarts während dieser achtstündigen Lastzyklus-Messung. Die Kessel 01 und 02 starteten während der Lastzyklus-Methode nicht neu. Im Gegensatz dazu war ein Neustart bei Kessel 05 und Kessel 06, zwei Neustarts bei Kessel 07, fünf Neustarts bei Kessel 08 und sechs Neustarts bei Kessel 04 notwendig. Diese Ergebnisse spiegeln das reale Kesselverhalten wider. Werden die Pelletkessel an einen Pufferspeicher mit ca. 30 l/kW angebunden (Variante LCP), so reduzierte sich die Anzahl an Kesselneustarts deutlich auf null bzw. auf einen einzigen Neustart bei Kessel 06 und 08. Somit

konnte aufgrund der Pufferspeicheranbindung die CO-Emission um bis zu 80 % (Kessel 04) reduziert werden, sie lag zwischen 35 und 240 mg/MJ.

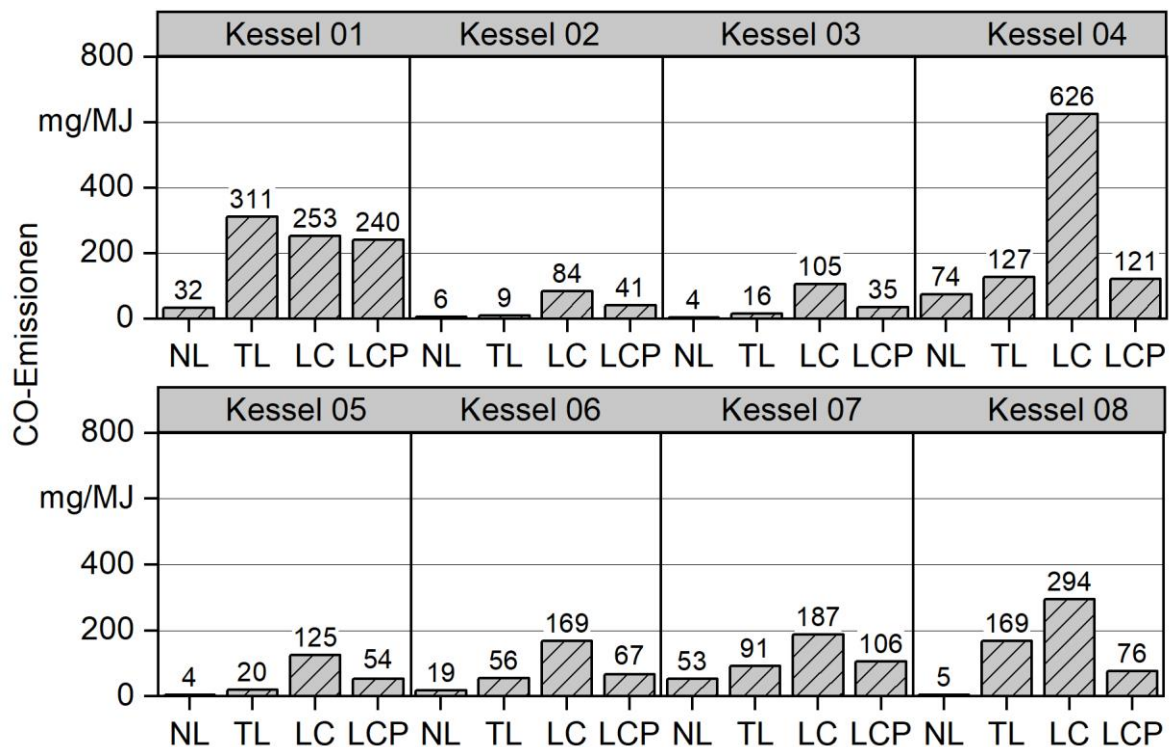


Abbildung 30: CO-Emissionen von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung

Org.-C-Emissionen. Erwartungsgemäß liegen die Emissionen an organischen Kohlenwasserstoffen (org.-C) für automatisch beschickte Pelletkesseln auf einem niedrigen Niveau im stationären Betrieb zwischen 0 und 5 mg/MJ, Abbildung 31. Da bei der Lastzyklus-Methode die Zündphase und die Lastwechsel mitberücksichtigt werden, fallen die org.-C-Emissionen unter Anwendung der neuen Methode mit Werten zwischen 1 und 39 mg/MJ am höchsten aus. Lediglich Pelletkessel 02 scheint sehr gut auch auf Lastwechsel zu reagieren und setzt die geringsten org.-C-Emissionen frei, aufgrund einer optimalen Einstellung auf den eingesetzten Brennstoff. Auch bezüglich der org.-C-Emissionen wirkt sich eine Pufferspeicheranbindung während des Ablaufs der Lastzyklus-Methode positiv aus, denn diese Emissionen sinken deutlich, vor allem bei den Kesseln, welche häufig während der Lastzyklus-Messung ohne Pufferspeicheranbindung neu starteten. Somit konnten z. B. die org.-C-Emissionen bei Kessel 04 von 39 auf 3 mg/MJ bzw. bei Kessel 08 von 17 auf 3 mg/MJ verringert werden und liegen damit nur noch leicht über den Werten bei Nennlast. Erneut schneidet der Kessel 02 am besten ab und verursacht die niedrigsten org.-C-Emissionen in allen Versuchsvarianten.

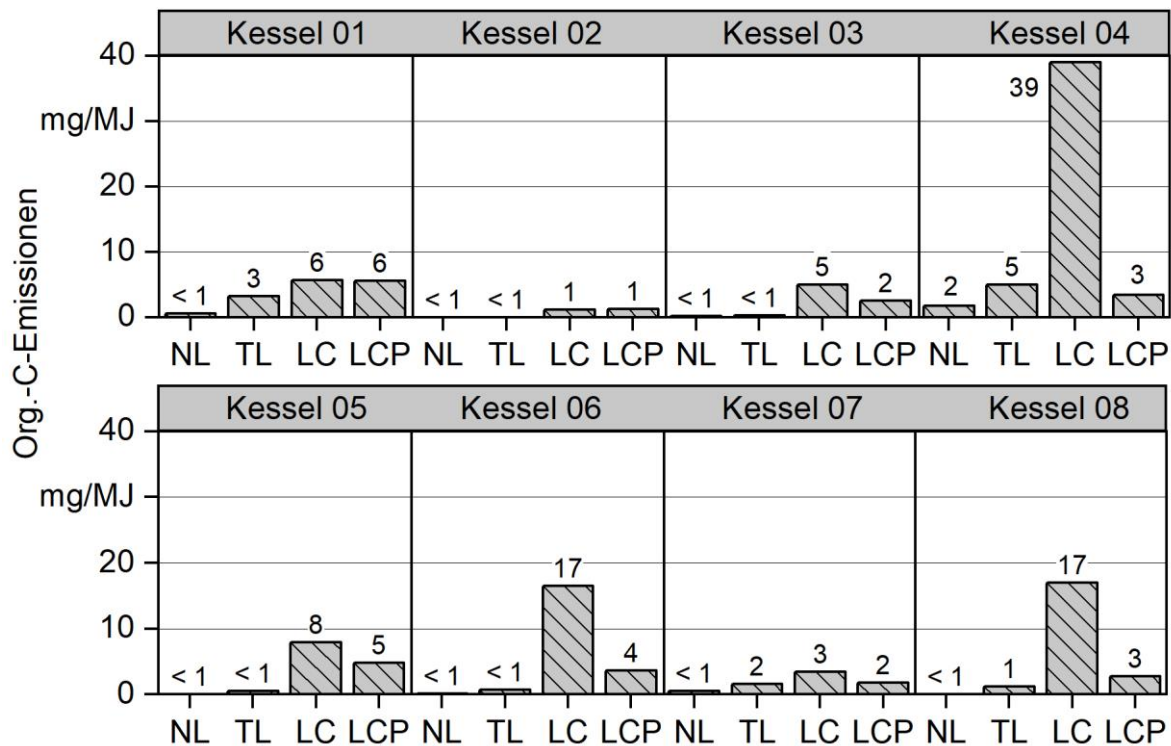


Abbildung 31: Org.-C-Emissionen von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung

NO_x-Emissionen. Im Gegensatz zu den CO- und org.-C-Emissionen wurden beim Vergleich der NO_x-Emissionen (Abbildung 32) unter Nennlastbetrieb erwartungsgemäß die höchsten Werte (74 bis 109 mg/MJ) und im Teillastbetrieb die geringsten Werte (65 und 98 mg/MJ) gemessen. Bei Kessel 06 wirkt sich der geringere Stickstoffgehalt der Pellets B aus und liegt allgemein auf einem geringen Niveau. Die NO_x-Emissionen während der Lastzyklus-Methode liegen zwischen den beiden stationären Versuchsbedingungen und betragen zwischen 71 und 99 mg/MJ. Werden die Pelletkessel an den Pufferspeicher angeschlossen, so fallen die NO_x-Emissionen während der Lastzyklus-Methode etwas höher aus, außer bei Kessel 06. Die Zunahme der NO_x-Emissionen beruht auf der Tatsache, dass die Kesselsteuerung bei einer Pufferspeicherladung meist so konfiguriert ist, dass der Puffer bei hoher Kesselauslastung und somit höheren Verbrennungstemperaturen in der Brennkammer geladen wird.

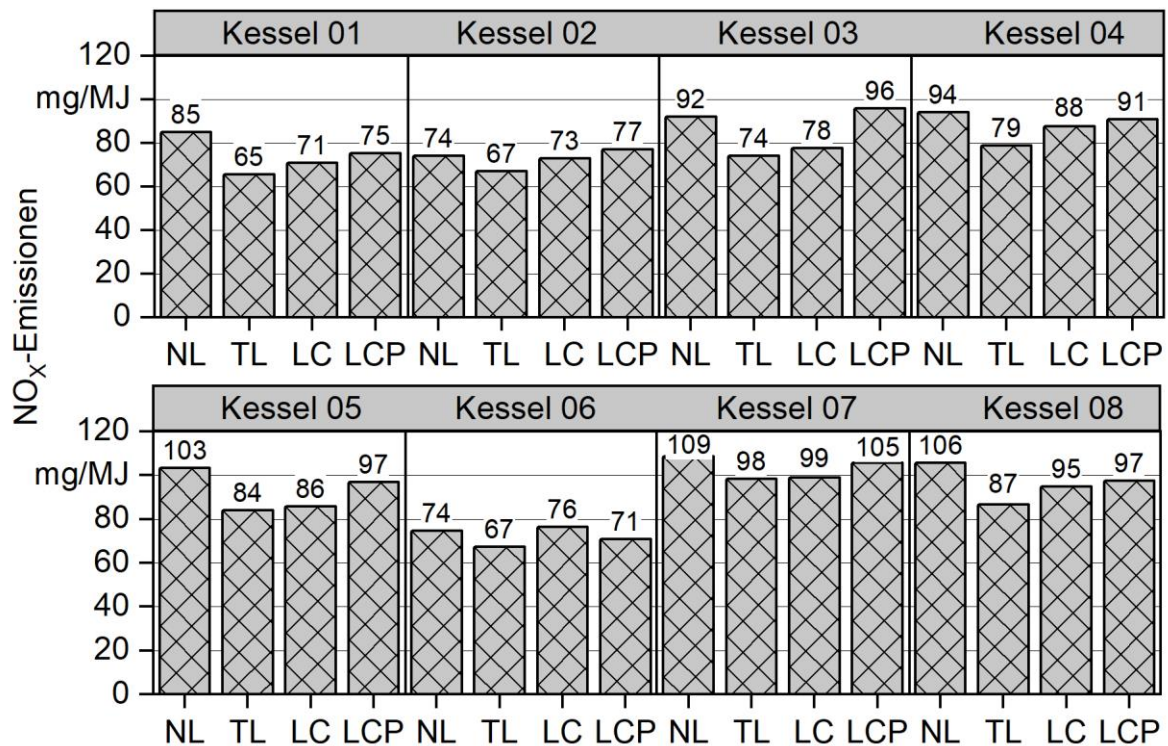


Abbildung 32: NO_x -Emissionen von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung

Staubemissionen. Die Staubemissionen waren während des stationären Nennlastbetriebs meist am geringsten im Vergleich zu den anderen Versuchsvarianten, sie lagen zwischen 1 und 20 mg/MJ, Abbildung 33. Bei Kessel 01 und Kessel 04 waren die Staubemissionen während des Teillastbetriebs auffällig hoch, was zum einen an einer schlechten Kesseleinstellung und zum anderen an der Tatsache lag, dass Kessel 04 nicht für einen Teillastbetrieb ohne Pufferspeicheranbindung vorgesehen war. Somit lagen die Staubemissionen im Teillastbetrieb zwischen < 1 und 45 mg/MG. Generell lagen die Staubemissionen während der Lastzyklus-Methode mit Werten zwischen 3 und 54 mg/MJ am höchsten, außer bei Kessel 02, der in allen Betriebszuständen sehr niedrige Staubemissionen erzielte. Fast kaum nachweisbare Staubemissionen wurden bei Kessel 08 im Nenn- und Teillastbetrieb aufgrund des integrierten elektrostatischen Staubabscheiders festgestellt. Lediglich während der Lastzyklus-Methode mit dem Kaltstart kommt es zu Staubemissionen in Höhe von 14 mg/MJ, vermutlich aufgrund der Tatsache, dass elektrostatische Staubabscheider erst ab einer Mindesttemperatur in Betrieb gehen wodurch der ungünstige Betriebszustand während der Startphase hier ins Gewicht fällt. Die Anbindung der Pelletkessel an den Pufferspeicher verringerte die Staubemissionen teilweise deutlich, da die Kessel dann wieder weniger Neustarts während der Lastzyklus-Methode durchführten. Bei Kessel 03 lagen die Staubemissionen erneut auf einem sehr niedrigen Bereich bei 3 mg/MJ und erzielte somit die gleichen Werte wie ohne Pufferspeicheranbindung.

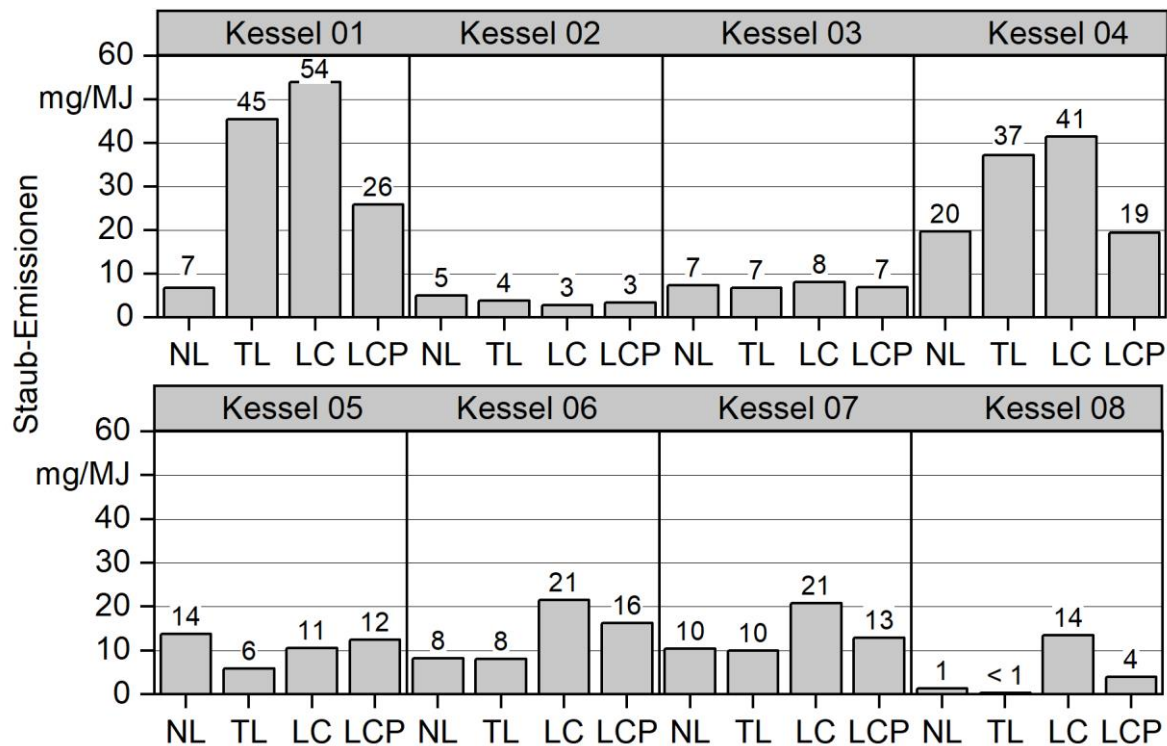


Abbildung 33: Staub-Emissionen von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung

Effizienz und Nutzungsgrad. Abschließend soll die brennwertbezogene Effizienz, d. h. der Wirkungs- (im stationären Betrieb) bzw. der Nutzungsgrad der Kessel während der verschiedenen Prüfmethode beurteilt werden. Erwartungsgemäß liegt die Effizienz bei den drei Brennwertfeuerungen (Kessel 01, 02 und 03) mit Werten zwischen 94 und 95 % in Nennlastbetrieb bzw. mit ca. 93 % im Teillastbetrieb am höchsten, Abbildung 34. Die konventionellen Pelletkessel ohne Brennwerttechnik erreichten Effizienzen zwischen 80 und 85 % bei Nennlast und zwischen 75 und 84 % bei Teillast. Während der Lastzyklus-Methode verringerte sich die Effizienz bei allen Kesseln auf Werte zwischen 65 und 92 %, wobei der Abfall der Effizienz bei den Brennwertkesseln weniger stark ausgeprägt war. Im Lastzyklus zeigten aber vor allem die Kessel 04 und 08 einen klaren Abfall der Effizienz zur Nenn- und Teillast, hier war die Energieausbeute um 12 bis 15 Prozent niedriger. Die Anbindung an einen Pufferspeicher wirkte sich vor allem bei den Brennwertkesseln nachteilig aus und verringerte die Effizienz um 5 bis 9 % was durch die verringerte Kondensation zu begründen ist. Auch bei den konventionellen Pelletkesseln verringerte sich die Effizienz in 3 von 5 Fällen, wobei die Pufferspeicheranbindung vor allem bei Kessel 04 vorteilhaft war. Dieser Kessel 04 sollte laut Herstellerangaben ohnehin niemals ohne einen angebundenen Pufferspeicher betrieben werden.

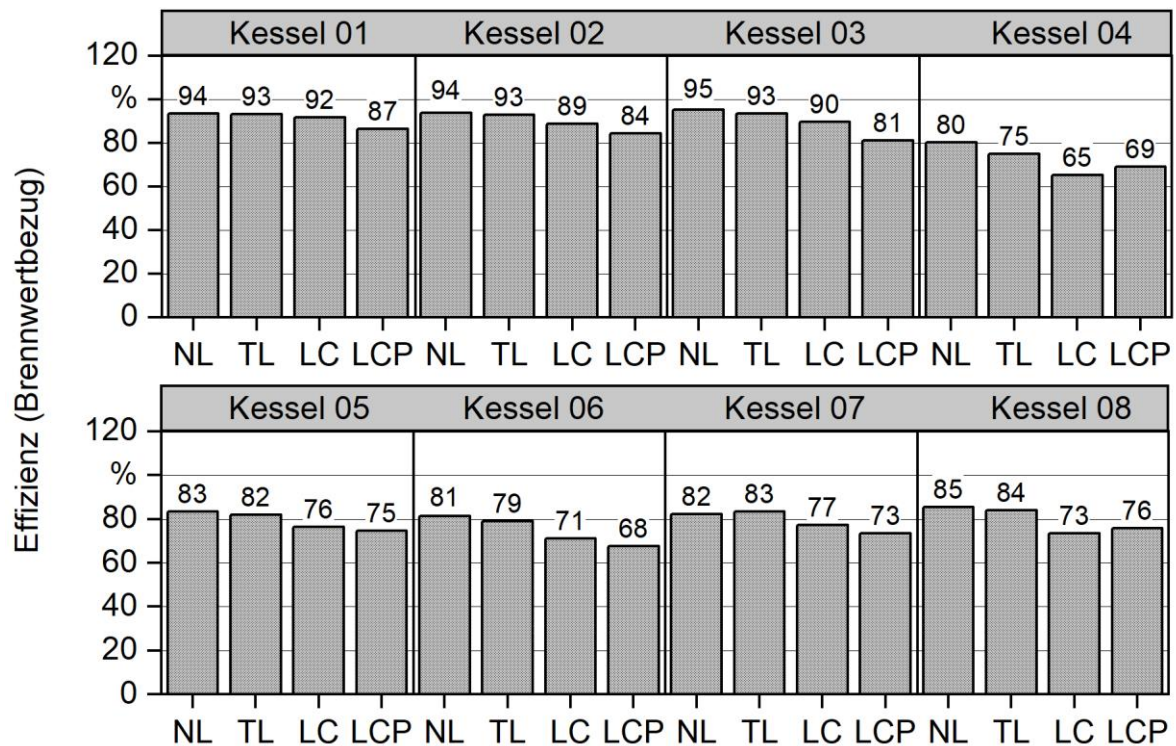


Abbildung 34: Effizienz von acht Pelletkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung

Zusammenfassung. Der Betrieb der Pelletkessel bei stationären Nennlastbedingungen führte in der Regel zu den niedrigsten CO-, org.-C- und Staubemissionen, während die NO_x-Emissionen am höchsten ausfielen. Erwartungsgemäß stiegen meist die Emissionen im Teillastbetrieb an, außer bei den NO_x-Emissionen. Während des realen Kesselbetriebs unter Anwendung der Lastzyklus-Methode stiegen die CO-, org.-C- und Staubemissionen meist an, wobei Kessel 03 in allen Betriebszuständen die geringsten Emissionen erzielte. Eine Pufferspeicheranbindung reduzierte zwar die Emissionen in den meisten Fällen deutlich im Vergleich zu einer Lastzyklusmessung ohne Pufferspeicheranbindung, jedoch sank die Effizienz in den meisten Fällen. Vor allem bei den Brennwertkesseln erwies sich die Anbindung an einen Pufferspeicher als nachteilig in Bezug auf die Effizienz, da dann die Abgaskondensation nicht mehr so wirksam erfolgen konnte. Sehr gut eingestellte und regelnde Pelletkessel lieferten in allen Versuchsvarianten niedrige Emissionen und eine hohe Effizienz, jeweils ohne Pufferanbindung. Eine generelle Verpflichtung zu Anbindung an einen Pufferspeicher kann somit bei diversen Kesseltypen hinderlich sei und durchweg zu Nachteilen führen. Mit einer breiteren Anwendung der Lastzyklus-Methode könnten derartig optimierte Kesseltypen zukünftig identifiziert werden.

5.2.2 Brennstoffseitiger Einfluss bei zwei Holzhackschnitzelfeuerungen

Der Einfluss der Brennstoffeigenschaften auf die Emissionen und die Effizienz wurde anhand von Verbrennungsversuchen mit zwei unterschiedlichen Holzhackschnitzelkesseln (moderner Kessel 09 und mehr als 10 Jahre alter Kessel 10) untersucht. Bei beiden

Holzhackschnitzelfeuerungen erfolgte die Brennstoffzufuhr über einen externen Austragsbehälter, welcher auf einer Plattformwaage positioniert war für die kontinuierliche Gewichtserfassung. Dabei wurde die Austragsschnecke von der Kesselregelung gesteuert. Hauptunterschied zwischen den beiden Feuerungen ist, dass die Kommunikation von Kessel 09 mit dem externen Austragsmotor automatisch kommuniziert und die Brennstoffzufuhr entsprechend angepasst werden konnte. Bei Kessel 10 erfolgte dies nur teilweise automatisiert, eine zusätzliche manuelle Justierung der Drehzahl war teilweise auch während der Versuche notwendig.

Alle vier Holzhackschnitzelsortimente aus Kapitel 5.1.3 wurden bei den unterschiedlichen Versuchsbedingungen (Nennlast, Teillast, Lastzyklus ohne und mit Pufferanbindung) verbrannt und bewertet. Lediglich bei Kessel 10 mit den Holzhackschnitzeln aus Fichten-Waldrestholz (Fi-Wrh) konnte die Lastzyklus-Methode mit angeschlossenem Pufferspeicher aufgrund von diversen technischen Ausfällen und dann aufgrund von Brennstoffmangel nicht durchgeführt werden (n. b.).

CO-Emissionen. Die CO-Emissionen liegen bei Kessel 09 im Teillastbereich niedriger bzw. auf einem gleichen Niveau wie im Nennlastbereich für alle vier Holzhackschnitzelsortimente zwischen 16 und 67 mg/MJ, Abbildung 35. Während der Anwendung der Lastzyklus-Methode verzehnfachen sich die CO-Emissionen, wenn der Kessel ohne Pufferspeicher betrieben wird, sie liegen dann zwischen 378 und 602 mg/MJ. Dies könnte u. a. am Gluterhaltungsbetrieb liegen, da der Kessel während der Lastzyklus-Methode nicht neu startete. Ist der Kessel an einen Pufferspeicher während der Lastzyklus-Methode angeschlossen, so sinken die CO-Emissionen um bis zu den Faktor 3 (Fichte-Energierundholz). Der ältere Holzhackschnitzel, Kessel 10, bildet nur im Nennlastbetrieb vergleichsweise niedrige CO-Emissionen, sie liegen jedoch vor allem mit Buchenhackschnitzeln über denen von Kessel 09. Ein deutlicher Anstieg um den Faktor 10 ist im Teillastbetrieb zu sehen. Beim Ablauf der Lastzyklus-Methode steigen die CO-Emissionen weiter an und betragen zwischen 616 und 1.150 mg/MJ. Dieser weitere Anstieg der CO-Emissionen ist in den häufigen Kesselneustarts zu begründen, denn der Kessel muss vier- bis siebenmal während der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicheranbindung neu starten. Wird Kessel 10 an einen Pufferspeicher angeschlossen, so ist lediglich für den Brennstoff „Bu-Wrh“ noch ein Neustart erforderlich, bei den anderen Brennstoffen wird ein Neustart vermieden. Daher sinken die CO-Emissionen bei einer Pufferspeicheranbindung deutlich und die CO-Emissionen liegen unter den Emissionen im Teillastbetrieb.

Ein eindeutiger Einfluss der Brennstoffqualität auf die CO-Emissionen ist nicht ersichtlich. Bei Kessel 09 scheinen jeweils die Sortimente aus Waldrestholz Vorteile zu haben. Auch bei den beiden Fichten-Sortimenten bei Kessel 10 schneidet das Waldrestholz etwas schlechter ab als das Energierundholz. Bei den Buchen-Sortimenten in Kessel 10 zeichnet sich kein klares Bild ab, denn während bei den stationären Versuchen das Buchen-Waldrestholz besser abschnitt, wurden bei der Lastzyklus-Methode höhere CO-Emissionen festgestellt. Der Brennstoff "Fichte-Waldrestholz" kam bei Kessel 10 während der Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung nicht zum Einsatz, da nicht mehr ausreichend Brennstoff vorhanden war.

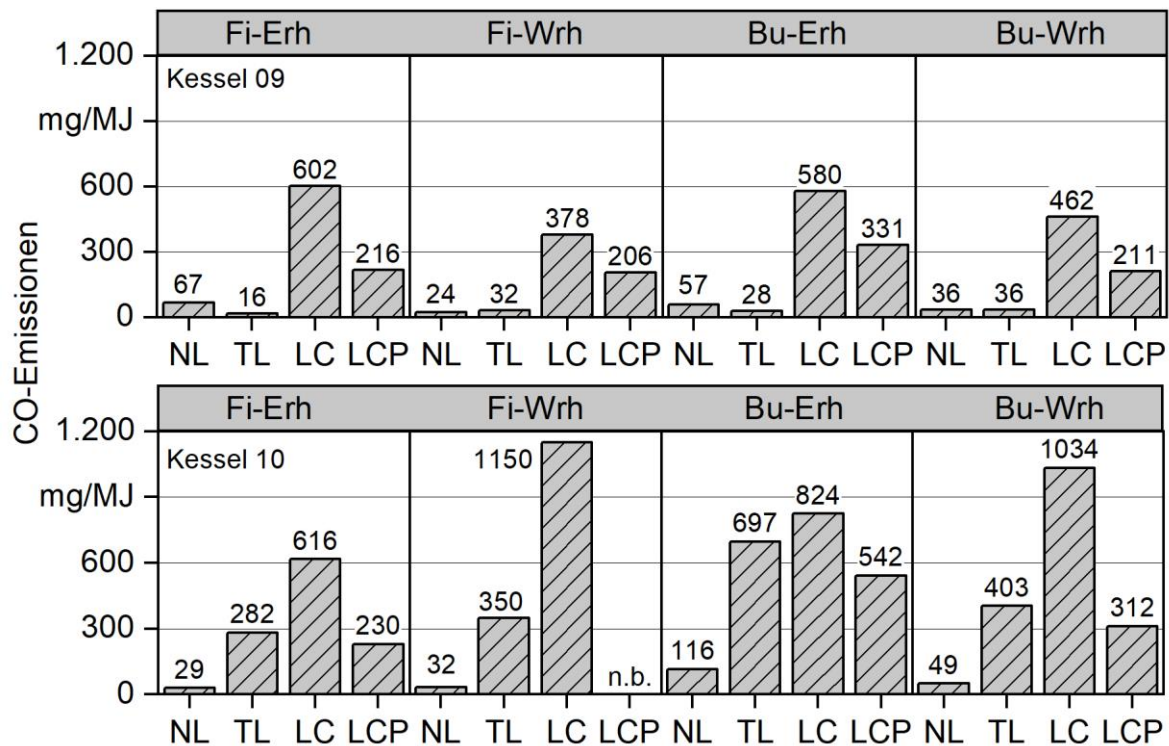


Abbildung 35: CO-Emissionen von zwei Holzhackschnitzelkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte, Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.

Org.-C-Emissionen. Die org.-C-Emissionen für Kessel 09 liegen während des stationären Betriebs in Nennlast und Teillast auf einem zu vernachlässigenden Niveau, Abbildung 36. Während der Lastzyklus-Methode werden zwischen 11 und 17 mg/MJ an organischen Kohlenwasserstoffen gebildet. Eine Anbindung des Kessels an einen Pufferspeicher reduziert diese Emissionen wieder auf 5 bis 9 mg/MJ. Ein Einfluss des eingesetzten Brennstoffs ist nicht ersichtlich. Bei Kessel 10 sind während des Nennlastbetriebs ebenfalls kaum org.-C-Emissionen festzustellen. Im Teillastbereich steigen diese leicht auf Werte zwischen 3 und 15 mg/MJ. Die mit Abstand höchsten org.-C-Emissionen wurden während der Lastzyklus-Methode mit den beiden Fichten-Sortimenten erreicht und liegen zwischen 235 und 660 mg/MJ. Ein geringer Anstieg konnte bei den beiden Buchen-Sortimenten auf Werte zwischen 68 und 90 mg/MJ im Lastzyklus-Betrieb ohne Pufferanbindung nachgewiesen werden. Auch bei diesem Kessel erweist sich die Anbindung an einen Pufferspeicher bezüglich der org.-C-Emissionen als vorteilhaft, so dass diese Emissionen dann zwischen 15 und 48 mg/MJ betragen.

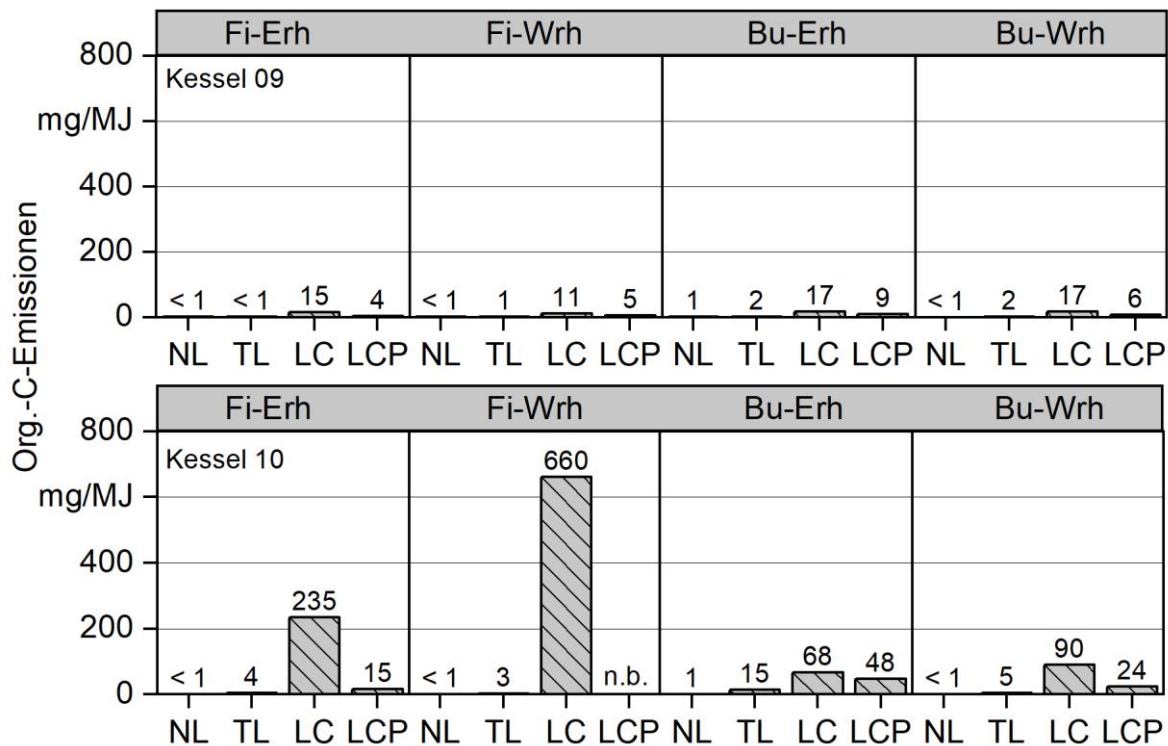


Abbildung 36: Org.-C-Emissionen von zwei Holzhackschnitzelkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte, Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.

NO_x-Emissionen. Ein eindeutiger Brennstoffeinfluss ist bei den NO_x-Emissionen beider Holzhackschnitzelkessel erkennbar, denn die Sortimente aus Waldrestholz haben einen höheren Stickstoffgehalt im Brennstoff als die Sortimente aus Energierundholz, Abbildung 37 und Tabelle 5. Wie bereits bei den Pelletkesseln zu beobachten war, fallen die NO_x-Emissionen bei Nennlast höher aus als im Teillastbetrieb. Meist zwischen diesen beiden Emissionswerten sortieren sich die Ergebnisse bei Verwendung der Lastzyklus-Methode ein.

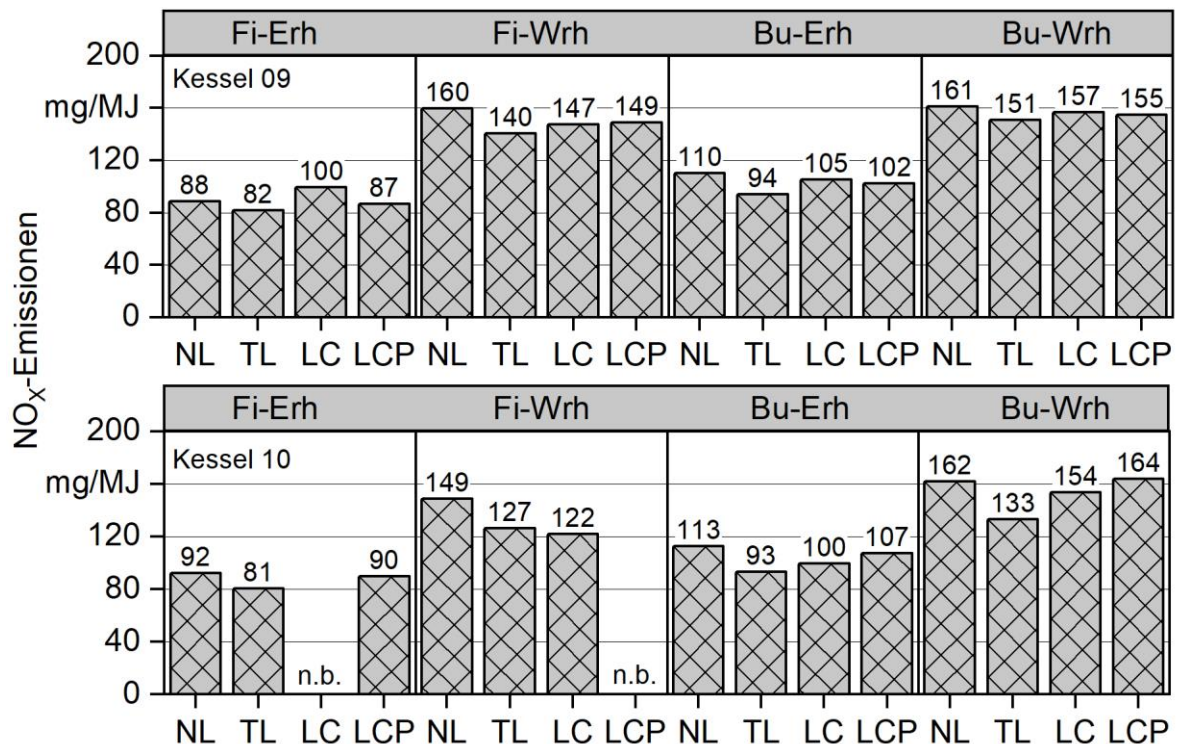


Abbildung 37: NO_x-Emissionen von zwei Holzhackschnitzelkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte, Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.

Staub-Emissionen. Die Staubemissionen liegen bei Kessel 09 mit allen Brennstoffsortimenten auf einem niedrigen Niveau, Abbildung 38. Meist wurden die geringsten Staubemissionen während des Teillastbetriebs mit Werten zwischen 6 und 8 mg/MJ erzielt und im Nennlastbetrieb bei leicht höheren Staubwerten zwischen 8 und 11 mg/MJ. Etwas überraschend fallen die Staubemissionen während der Anwendung der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher aus und liegen zwischen 14 und 17 mg/MJ. Eine Pufferspeicheranbindung erhöht die Staubemissionen minimal bei Kessel 09. Es ist bei diesem Kessel kein Einfluss der Brennstoffqualität zu erkennen. Deutlich höhere Staubemissionen wurden bei Kessel 10 ermittelt, wobei die Versuche unter Nennlastbedingungen noch die geringsten Staubemissionen zwischen 36 und 55 mg/MJ ergaben. Insgesamt liegen sie aber um den Faktor 4 höher als bei Kessel 09. In der Regel wurden die höchsten Staubemissionen bei Kessel 10 während des Lastzyklus ermittelt, wobei es bei der Verbrennung von Buchen-Waldrestholz zu einem Ausfall der Gesamtstaubbestimmung kam und somit keine Werte dargestellt werden konnten. Ein leichter Brennstoffeinfluss bei Kessel 10 ist zu erkennen, denn die Staubemissionen fallen meist etwas höher aus, wenn Waldrestholz verbrannt wurde, im Vergleich zum höherwertigen Energierundholz.

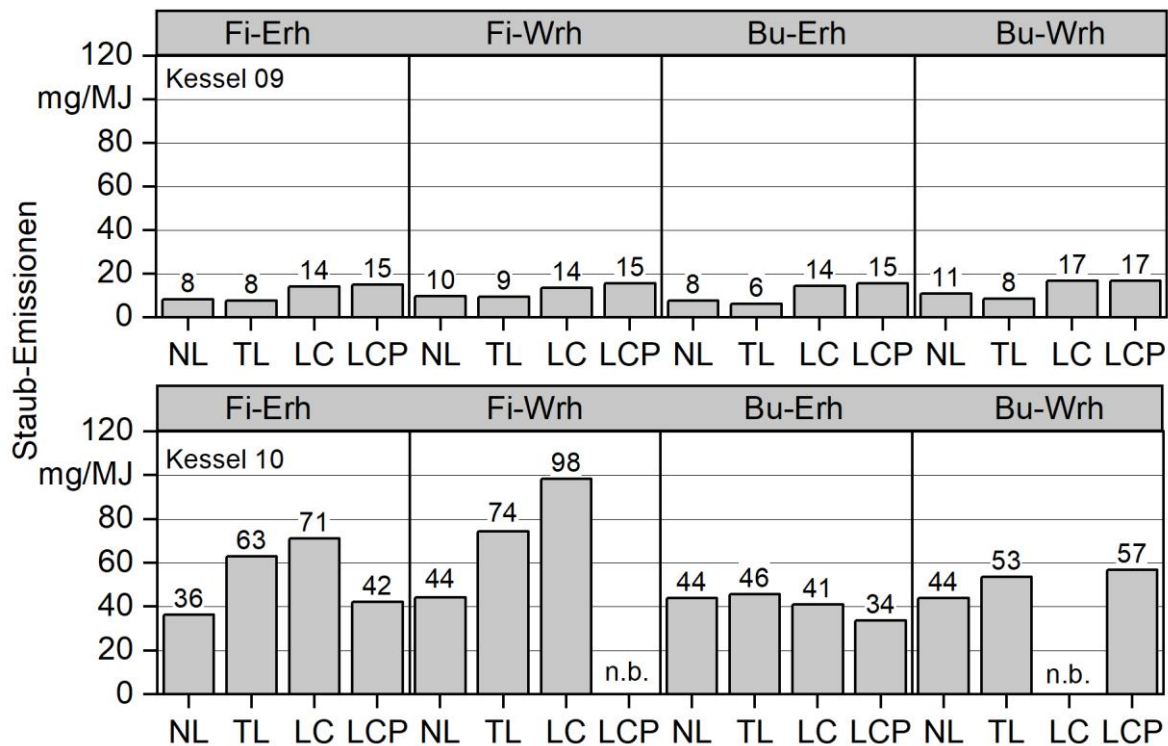


Abbildung 38: Staub-Emissionen von zwei Holzhackschnitzelkesseln. NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte, Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.

Effizienz. Die brennwertbezogene Effizienz des modernen Kessels 09 liegt auf einem höheren Niveau als von Kessel 10 für alle Brennstoffsortimente und alle Versuchsvarianten, Abbildung 39. Die Effizienz ist während der Nennlastversuche bei Kessel 09 stets höher als im Teillastbereich und liegt zwischen 82 und 83 % bzw. 75 und 85 %. Bei Anwendung der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicheranbindung liegt die Effizienz lediglich zwischen 65 und 70 %. Kaum Effizienzvorteile liefert die Pufferanbindung bei Kessel 09. Ein ähnliches Verhalten zeigt Kessel 10, wobei es stets zu einer Verringerung der Effizienz um 3 bis 5 % kam, sobald der Kessel an einen Pufferspeicher angeschlossen und nach der Lastzyklus-Methode geprüft wurde.

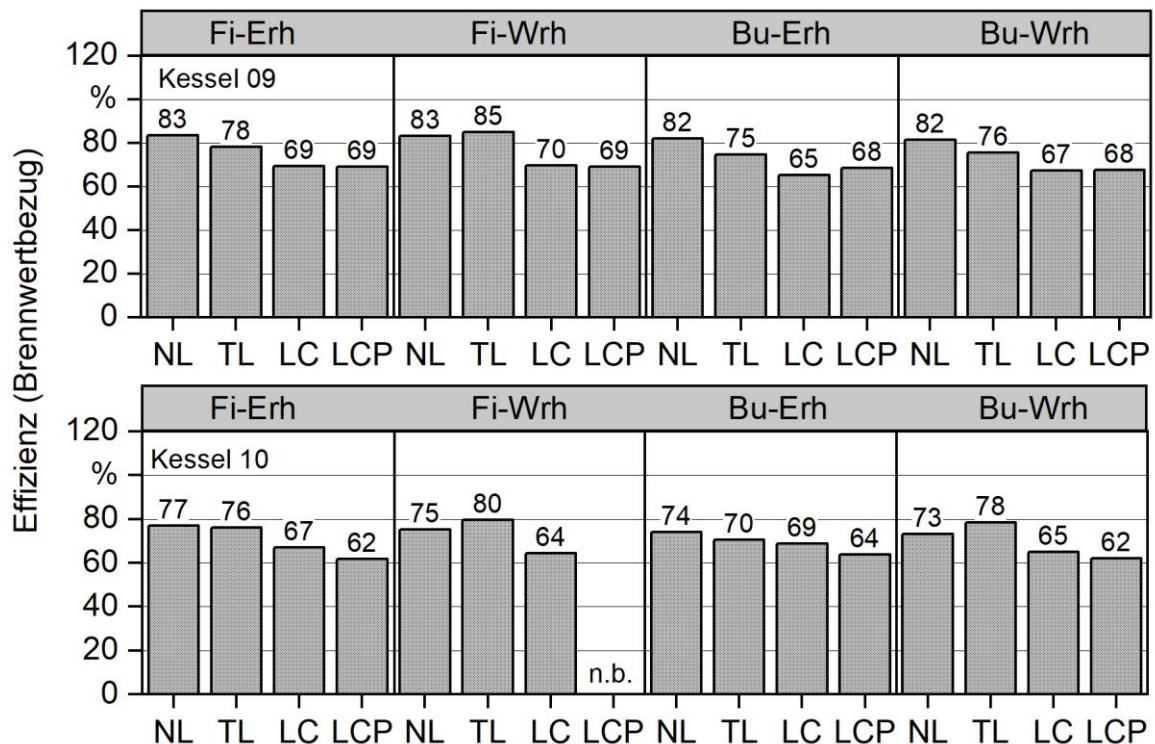


Abbildung 39: Effizienz (brennwertbezogen) von zwei Holzhackschnitzelkesseln.
 NL = Nennlastbetrieb, TL = Teillastbetrieb, LC = Lastzyklus-Methode,
 LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, Fi = Fichte,
 Bu = Buche, Erh = Energierundholz, Wrh = Waldrestholz.

Zusammenfassung. Zwei Holzhackschnitzelkessel wurden mit jeweils vier verschiedenen Brennstoffsorimenten bei Nennlast, Teillast, mit der Lastzyklus-Methode ohne und mit Pufferspeicheranbindung betrieben. Der modernere Holzhackschnitzelkessel, Kessel 09) reagierte relativ unempfindlich auf die verschiedenen Brennstoffqualitäten. Generell lag das Emissionsniveau im Teillastbetrieb niedriger als im Nennlastbetrieb. Im realen Kesselbetrieb nach der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicheranbindung kam es zu einem deutlichen Anstieg der Emissionen und einen Abfall der Effizienz. Die Pufferspeicheranbindung konnte das teilweise wieder kompensieren und die Emissionen fielen niedriger auch, jedoch lagen diese stets über den Werten, die bei stationären Versuchsbedingungen gemessen wurden. Der etwas ältere Holzhackschnitzelkessel, Kessel 10, bildet in vielen Versuchsvarianten höhere Emissionen als Kessel 09. Besonders hohe Emissionen wurden während der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicheranbindung freigesetzt, diese konnten jedoch bei einer Speicheranbindung teilweise kompensiert werden. Die brennwertbezogene Effizienz fiel bei einer Pufferanbindung am niedrigsten aus. Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass die Anbindung an einen Pufferspeicher zwar die Emissionen aufgrund der geringeren Anzahl Neustarts reduziert, dieser Vorteil geht jedoch zu Lasten der Effizienz.

5.2.3 Ergebnisse mit dem Ölkessel

Um die Anwendbarkeit der entwickelten Lastzyklus-Methode auch bei anderen Feuerungstypen zu überprüfen, wurde ein Ölkessel mit 25 kW Leistung am Feuerungsprüfstand des TFZ aufgebaut und bei Nennlast, Teillast und während der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicheranbindung gemessen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 21 zusammengestellt. Die CO- und NO_x-Emissionen liegen auf einem sehr niedrigen Niveau, ebenso die Staubemissionen. Lediglich die org.-C-Emissionen waren im Vergleich zu den Versuchen an den Pelletkesseln deutlich höher und zum Teil auch höher als bei den beiden Holzhackschnitzelkesseln. Während der Lastzyklus-Methode lagen die Emissionen im Bereich der Nennlast- und Teillastmessungen. Lediglich bei der Effizienz kam es zu einer deutlichen Verringerung von 81,7 % bei Nennlast auf 74,9 % im realen Kesselbetrieb (hier bei Brennwertbezug). Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Lastzyklus-Methode auch bei Ölkesseln angewendet werden kann.

Tabelle 21: Emissionen und Effizienz des untersuchten Ölkessels

Parameter	Einheit	Nennlast	Teillast	Lastzyklus-Methode
CO-Emissionen	mg/MJ	0,6	1,6	0,9
Org.-C-Emissionen	mg/MJ	70,8	65,3	65,4
NO _x -Emissionen	mg/MJ	0,4	3,0	1,1
Staub-Emissionen	mg/MJ	0,07	1,1	0,02
Effizienz (Heizwertbezug)	%	87,8	85,1	80,5
Effizienz (Brennwertbezug)	%	81,7	79,2	74,9

5.3 Vergleich mit Daten nach Ökodesign-Verordnung

Die Auswertung von Typenprüfberichten zeigt, dass eine Berechnung nach der Ökodesign-Verordnung in vielen Fällen zu einer Besser-Bewertung der Feuerung führt, insbesondere hinsichtlich der Staub- und NO_x-Emissionen, Tabelle 22. Kaum ein Unterschied ist hingegen bei den CO- und org.-C-Emissionen eingetreten.

Die Berechnung der Emissionswerte nach der Ökodesign-Verordnung ergibt sich aus der prozentuellen Wichtung der Ergebnisse aus der Typenprüfung, wobei die Nennlastergebnisse zu 15 % und die Teillastergebnisse zu 85 % einfließen. Weitaus komplexer und teilweise nicht machbar war die Berechnung des Jahresnutzungsgrades auf Basis der Typenprüfergebnisse, da dazu der Hilfsstromverbrauch in Nenn- und Teillastbetrieb erforderlich ist, der bei der Typprüfung in der Regel nicht erfasst bzw. ausgewiesen wird. Die Berechnungsvorschrift wichtet zwar die Nennlast- zu 15 % und die Teillastergebnisse zu 85 %, jedoch werden noch weitere Parameter wie der Hilfsstromverbrauch oder Verluste durch eine Temperaturregelung abgezogen [11].

Laut Ökodesign-Verordnung sind - soweit anwendbar - die Werte des Brennstoff-Wirkungsgrades η_n , η_p sowie die Werte der Nutzwärme P_n , P_p zu messen [11].

Der Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad η_s wird als Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad im Betriebszustand η_{son} berechnet und um Beiträge berichtigt, mit denen die Temperaturregelung und der Hilfsstromverbrauch berücksichtigt werden. Der Stromverbrauch wird mit einem Umrechnungskoeffizienten CC von 2,5 multipliziert.

Der Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad η_s ist definiert als:

$$\eta_s = \eta_{son} - F(1) - F(2) + F(3)$$

η_{son} ist der Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad im Betriebszustand, angegeben in % und berechnet gemäß

$$\eta_{son} = 0,85 \cdot \eta_p + 0,15 \cdot \eta_n$$

bei manuell befeuerten Festbrennstoffkesseln, die dauerhaft bei 50 % der Nennwärmeleistung betrieben werden können, sowie bei automatisch befeuerten Festbrennstoffkesseln.

F(1) steht für einen Verlust des Raumheizungs-Jahresnutzungsgrades aufgrund der angepassten Beiträge der Temperaturregelung:

$$F(1) = 3 \%$$

F(2) steht für einen negativen Beitrag zum Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad durch den Hilfsstromverbrauch, angegeben in % und berechnet gemäß

$$F(2) = 2,5 \cdot (0,15 \cdot e_{l_{max}} + 0,85 \cdot e_{l_{min}} + 1,3 \cdot P_{SB}) / (0,15 \cdot P_n + 0,85 \cdot P_p) \cdot 100$$

P_{SB} bezeichnet die elektrische Leistungsaufnahme eines Festbrennstoffkessels im Bereitschaftszustand

F(3) steht für einen positiven Beitrag zum Raumheizungs-Jahresnutzungsgrad durch den elektrischen Wirkungsgrad von Festbrennstoffkesseln mit Kraft-Wärme-Kopplung, angegeben in % und wie folgt berechnet:

$$F(3) = 2,5 \cdot \eta_{el,n}$$

Die Raumheizungs-Jahres-Emissionen von Staub, gasförmigen organischen Verbindungen, Kohlenmonoxid und Stickstoffoxiden werden in standardisierter Form bezogen auf trockenes Rauchgas mit einem Sauerstoffgehalt von 10 % und unter Normbedingungen bei 0 °C und 1.013 Millibar angegeben.

Die Raumheizungs-Jahres-Emissionen E_s von Staub, gasförmigen organischen Verbindungen, Kohlenmonoxid und Stickstoffoxiden werden wie folgt berechnet:

Bei manuell befeuerten Festbrennstoffkesseln, die dauerhaft bei 50 % der Nennwärmeleistung betrieben werden können, sowie bei automatisch befeuerten Festbrennstoffkesseln:

$$E_s = 0,85 \cdot E_{s,p} + 0,15 \cdot E_{s,n}$$

$E_{s,p}$: jeweils bei 30 % oder 50 % der Nennwärmeleistung gemessene Emissionen von Staub, gasförmigen organischen Verbindungen, Kohlenmonoxid und Stickstoffoxiden

$E_{s,n}$: bei Nennwärmeleistung gemessene Emissionen von Staub, gasförmigen organischen Verbindungen, Kohlenmonoxid und Stickstoffoxiden

Alle Gleichungen können in der Ökodesign-Verordnung nachgeschlagen werden [11].

Tabelle 22: *Besser-Bewertung der Kessel, wenn die Berechnung nach Ökodesign-Verordnung im Vergleich zur Nennlastmessung erfolgt*

Parameter	Besserbewertung nach Öko- design in % aller Fälle, bei Pelletkesseln	Besserbewertung nach Ökodesign in % aller Fälle, bei Holzhackschnitzelkesseln
CO-Emissionen	6	19
Org.-C-Emissionen	6	11
NO _x -Emissionen	99	92
Staub-Emissionen	56	67

Beispielhaft sind die Ergebnisse der Bewertung der Staubemissionen in Abbildung 40 dargestellt. Während bei einer Beurteilung der Staubemissionen unter Nennlastbedingungen 67 Kessel unter 15 mg/m^3 freisetzen, sind es bei einer Bewertung nach Ökodesign bereits 81 Kessel.

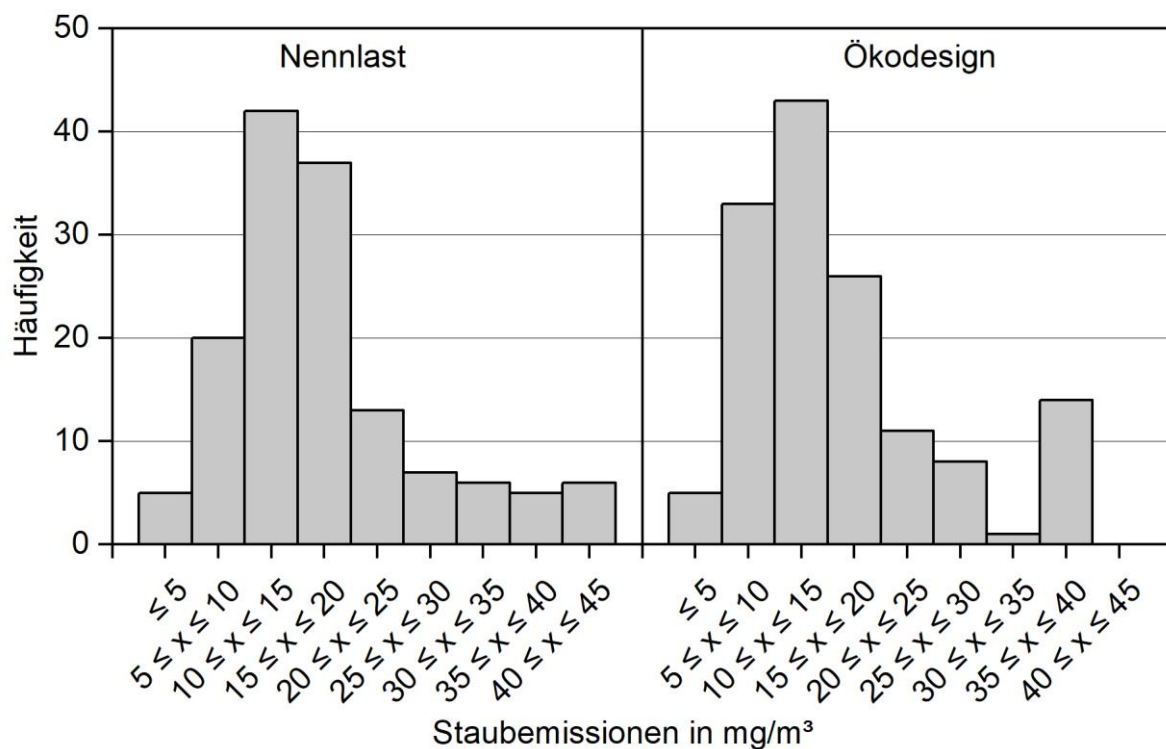


Abbildung 40: *Staubemissionen bei Nennlast und nach Ökodesign als Beispiel für die Besser-Bewertung. Daten von BEST, Auswertungen von TFZ*

Diese Bewertung zeigt, dass sich die Verhältnisse nach der Ökodesignbewertung im Vergleich zur Realität offenbar umkehren, was bei der Lastzyklus-Methode jedoch nicht zu erwarten ist. Die Daten der zehn Feuerungen, die für den Anlagenvergleich nach der Lastzyklus-Methode untersucht werden, werden ebenfalls in Bezug auf Ergebnisse der Typenprüfung sowie Bewertung nach Ökodesign-Verordnung verglichen, um Informationen für ein mögliches Gütesiegel für automatisch beschickte Kessel zu erhalten.

Die Daten, die aus den Verbrennungsversuchen stammen (Abschnitt 5.2), wurden mit den Daten, die im Rahmen der Typenprüfungen der einzelnen Feuerungen ermittelt wurden, verglichen, wobei hier nicht die Typenprüfergebnisse der einzelnen Kessel bei Nennlast und Teillast ausgewiesen werden, sondern es wird nur der direkt nach der Ökodesign-Verordnung berechnete Wert aufgezeigt, um die Anonymität der Kesselhersteller zu wahren. Die Werte der "Nominal annual emission factors" und die Werte der einzelnen Prüfberichte wurden in mg/MJ umgerechnet sofern nicht bereits entsprechend ausgewiesen. Die Wirkungs- und Nutzungsgrade (hier zusammenfassend als „Effizienz“ bezeichnet) wurden auf den Brennwert bezogen. Für die beiden Holzhackschnitzelkessel wurden jeweils die Ergebnisse aus den Versuchen mit dem Fichten-Energierundholz (Fi-Erh) herangezogen, da auch während einer Typenprüfung meist qualitativ hochwertige und somit aschearme Brennstoffe verwendet werden.

CO-Emissionen. Bei allen Pelletkesseln (01 bis 08) fallen die CO-Emissionen bei der Verrechnung der offiziellen Typenprüfwerte nach der Ökodesign-Verordnung (ÖDTP) am niedrigsten aus, Abbildung 41. Erfolgt diese Verrechnung mit den Werten aus dem Projekt (ÖDPD), so wurden meist deutlich höhere CO-Emissionen ermittelt, außer bei Kessel 05 und 07. Bei beiden Holzhackschnitzelkesseln liegen die CO-Emissionen niedriger, wenn die Daten aus diesem Projekt herangezogen werden. Auffällig ist ebenfalls, dass die CO-Emissionen der Lastzyklus-Messung meist deutlich höher ausfallen als die nach Ökodesign verrechneten Werte aus Nennlast und Teillast.

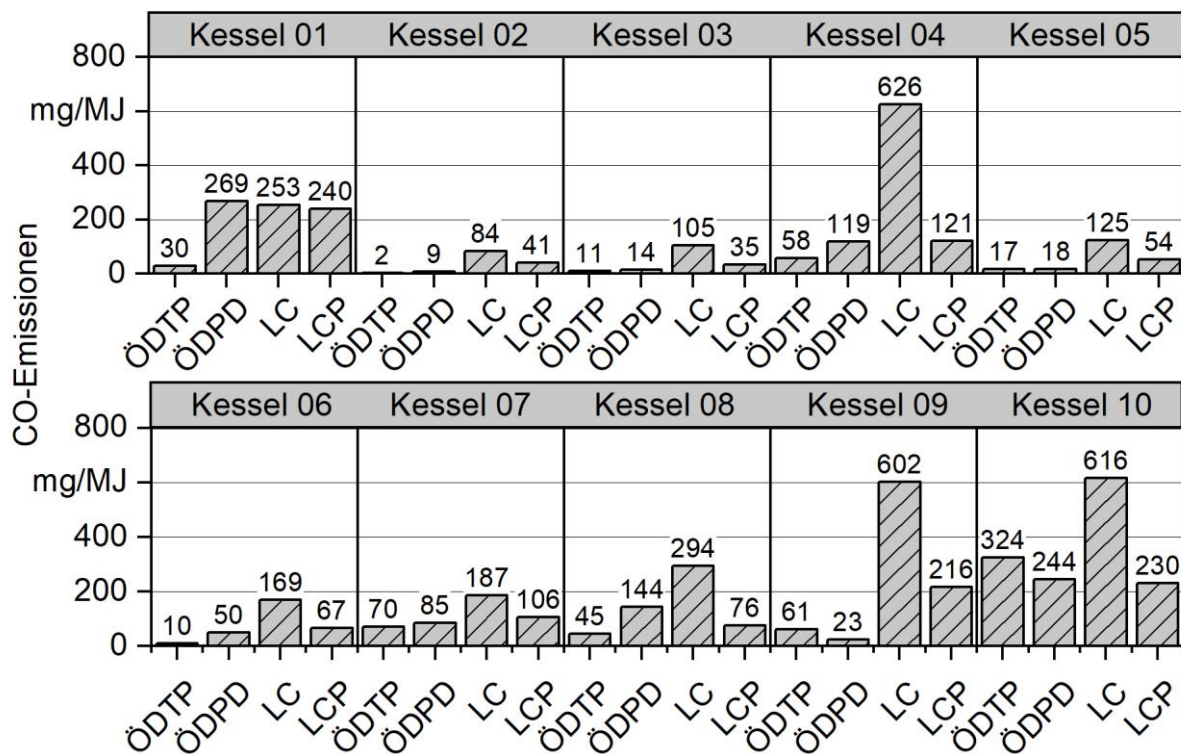


Abbildung 41: Vergleich der CO-Emissionen nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicher (LCP)

Für die Bewertung der Reihenfolge der Kessel untereinander nach den verschiedenen Berechnungs- und Messmethoden wurde eine sogenannte Heatmap erstellt, Tabelle 22. Hierbei zeigt die Farbe grün jeweils den besten Wert und die Farbe rot jeweils den schlechtesten Wert an. Alle Farben dazwischen zeigen die Abstufungen der Kessel auf. Während beispielsweise Kessel 06 nach der Verrechnung der offiziellen Typenprüfwerte den 2. Platz mit lediglich 10 mg/MJ belegt, fällt dieser Kessel bei einer Bewertung nach der Lastzyklus-Methode auf den 4. Platz mit 169 mg/MJ zurück. Im Gegensatz dazu verbessert sich Kessel 07 vom 9. Platz mit 70 mg/MJ auf den 5. Platz mit 187 mg/MJ während der Lastzyklus-Methode. Die Reihenfolge der Verbrennungsqualität der Biomassekessel ändert sich somit, wenn verschiedene Bewertungsmethoden zugrunde gelegt werden.

Tabelle 23: *Heatmap der CO-Emissionen bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerten, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in mg/MJ*

Kessel	Ökodesign mit Typenprüfwerten	Nennlast	Teillast	Ökodesign berechnet	Lastzyklus ohne Puffer	Lastzyklus mit Puffer
Kessel 01	30	32	311	269	253	240
Kessel 02	2,3	6	9	9	84	41
Kessel 03	11	4	16	14	105	35
Kessel 04	58	74	127	119	626	121
Kessel 05	17	4	20	18	125	54
Kessel 06	10	19	56	50	169	67
Kessel 07	70	53	91	85	187	106
Kessel 08	45	5	169	144	294	76
Kessel 09	61	67	16	23	602	216
Kessel 10	324	29	282	244	616	230

Org.-C-Emissionen. Die org.-C-Emissionen fielen während der offiziellen Typenprüfung sehr niedrig aus und lagen nach der Umrechnung gemäß der Ökodesign-Verordnung für nahezu alle Pelletkessel bei unter 1 mg/MJ, Abbildung 42. Somit ist anhand dieses Parameters keine Unterscheidung der Kessel möglich. Diese treten vor allem dann auf, wenn die Ergebnisse der Lastzyklus-Methode verglichen werden mit Werten zwischen 1 und 39 mg/MJ für Pelletkessel bzw. zwischen 15 und 235 mg/MJ für die beiden Holzhackschnitzelkessel.

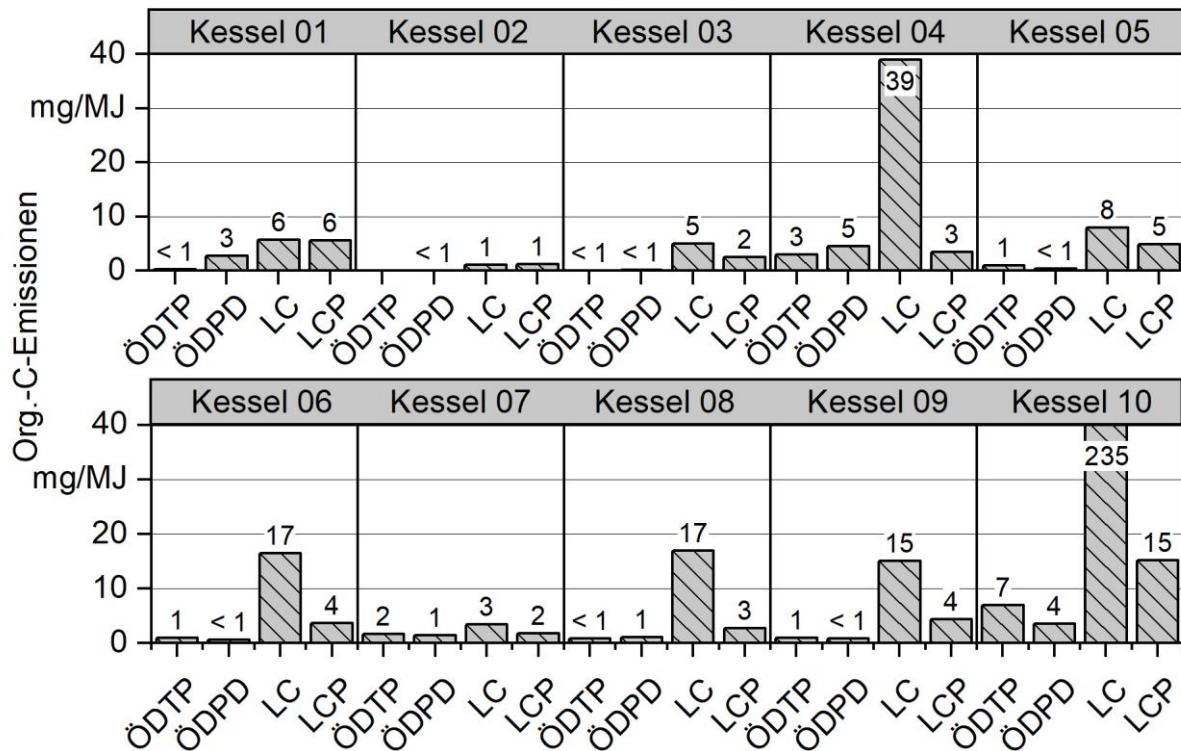


Abbildung 42: Vergleich der Org.-C-Emissionen nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicher (LCP)

Analog zu den CO-Emissionen wurde mit den org.-C-Emissionen eine Heatmap erstellt, um die Reihenfolge der Kessel schneller beurteilen zu können, Tabelle 24. Dabei belegt Kessel 01 den 1. Platz mit 0,3 mg/MJ bei der Verrechnung der Typenprüfwerte, fällt jedoch auf den 7. Platz zurück, wenn die im Projekt ermittelten Daten aus der Nenn- und Teillastmessung verwendet werden. Erfolgt die Bewertung jedoch nach der Lastzyklus-Methode, so rangiert Kessel 01 auf Platz 4 mit 5,7 mg/MJ, fällt jedoch bei der Bewertung mit der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung wieder auf Platz 9 zurück, obwohl fast das gleiche Ergebnis erzielt wurde wie bei der Methode ohne Pufferanbindung.

Tabelle 24: *Heatmap der org.-C-Emissionen bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerten, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in mg/MJ*

Kessel	Ökodesign mit Typenprüfwerten	Nennlast	Teillast	Ökodesign berechnet	Lastzyklus ohne Puffer	Lastzyklus mit Puffer
Kessel 01	0,3	0,6	3,2	2,8	5,7	5,6
Kessel 02	k. A.	0,0	0,0	0,0	1,1	1,2
Kessel 03	0,0	0,1	0,2	0,2	5,0	2,5
Kessel 04	3,0	1,7	5,0	4,5	39,0	3,5
Kessel 05	1,0	0,0	0,5	0,4	7,9	4,8
Kessel 06	1,0	0,1	0,7	0,6	16,5	3,7
Kessel 07	1,7	0,6	1,6	1,4	3,4	1,8
Kessel 08	0,8	0,0	1,2	1,1	17,0	2,7
Kessel 09	1,0	0,5	0,9	0,8	15,1	4,4
Kessel 10	7,0	0,4	4,1	3,5	234,9	15,2

NO_x-Emissionen. Die NO_x-Emissionen fallen in der Regel bei der Verrechnung der Typenprüfwerte nach der Ökodesign-Verordnung am niedrigsten aus, da im Rahmen von Typenprüfungen vorzugsweise stickstoffarme und somit auch rindenfreie Holzpellets eingesetzt werden. Auffällig sind hier die beiden NO_x-Werte bei den Kesseln 03 und 09 mit Werten von 35 bzw. 40 mg/MJ. Sie liegen somit nur halb so hoch wie die Ergebnisse, die mit den Brennstoffen aus dem vorliegenden Projekt bestimmt wurden, Abbildung 43. Da der Teillastbetrieb mit einer 85 %-igen Gewichtung in das Ergebnis eingeht, fallen die Werte für die Bewertung nach Ökodesign-Verordnung mit Werten zwischen 68 und 100 mg/MJ meist niedriger aus als die NO_x-Emissionen der Lastzyklus-Methode ohne oder mit Pufferspeicheranbindung.

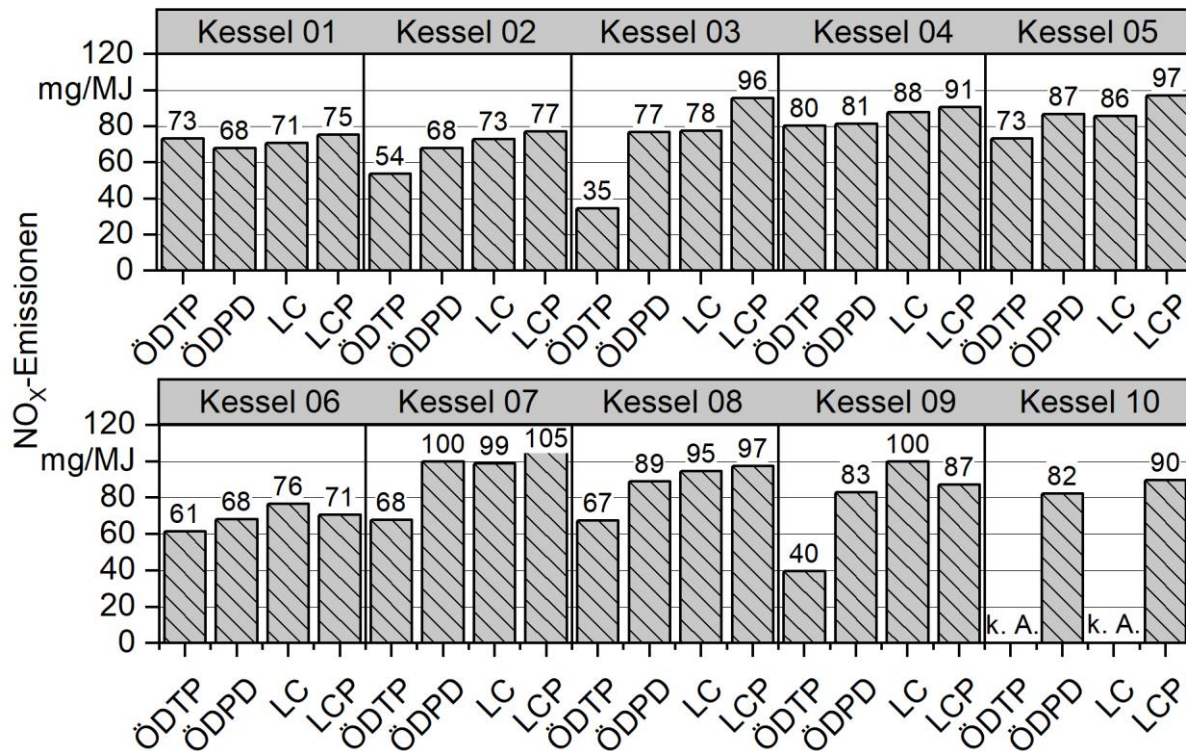


Abbildung 43: Vergleich der NO_x-Emissionen nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicher (LCP)

Die Heatmap für die NO_x-Emissionen ist in der nachfolgenden Tabelle zu sehen. Werden nur die Ergebnisse der offiziellen Typenprüfung herangezogen (Spalte 1), so würden die Kessel 03 und 09 am besten abschneiden und Kessel 04 würde die höchsten NO_x-Emissionen von 80 mg/MJ freisetzen, Tabelle 25. Vergleicht man aber die Werte aus der Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung untereinander, so rutscht Kessel 03 vom ersten auf den siebenten Platz ab.

Tabelle 25: *Heatmap der NO_x-Emissionen bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerten, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in mg/MJ*

Kessel	Ökodesign mit Typenprüfwerten	Nennlast	Teillast	Ökodesign berechnet	Lastzyklus ohne Puffer	Lastzyklus mit Puffer
Kessel 01	73,1	85	65	68	71	75
Kessel 02	53,7	74	67	68	73	77
Kessel 03	34,5	92	74	77	78	96
Kessel 04	80,2	94	79	81	88	91
Kessel 05	73,2	103	84	87	86	97
Kessel 06	61,3	74	67	68	77	71
Kessel 07	67,6	109	98	100	99	106
Kessel 08	67,3	106	87	89	95	98
Kessel 09	39,7	88,5	81,8	83	100	87
Kessel 10	k. A.	92,4	80,5	82	k. A.	89,6

Staub-Emissionen. Bei den Staubemissionen wurden die niedrigsten Werte bei der Verrechnung der Werte aus der Typenprüfung erzielt, Abbildung 44. Lediglich bei Kessel 05 waren die Staubemissionen mit den im Projekt gewonnenen Messdaten geringer. Meist waren die Staubemissionen bis um das 10-fache (Kessel 01) höher, wenn die Messergebnisse mit dem einheitlichen Versuchsbrennstoff des Projekts erzielt wurden, im Vergleich zur offiziellen Typprüfung. Für die Kessel 02 und 03 kam es auf sehr niedrigem Emissionsniveau nur zu einem geringfügigen Anstieg der Staubemissionen, wenn die Lastzyklus-Methode ohne und mit Pufferspeicher bewertet wurde.

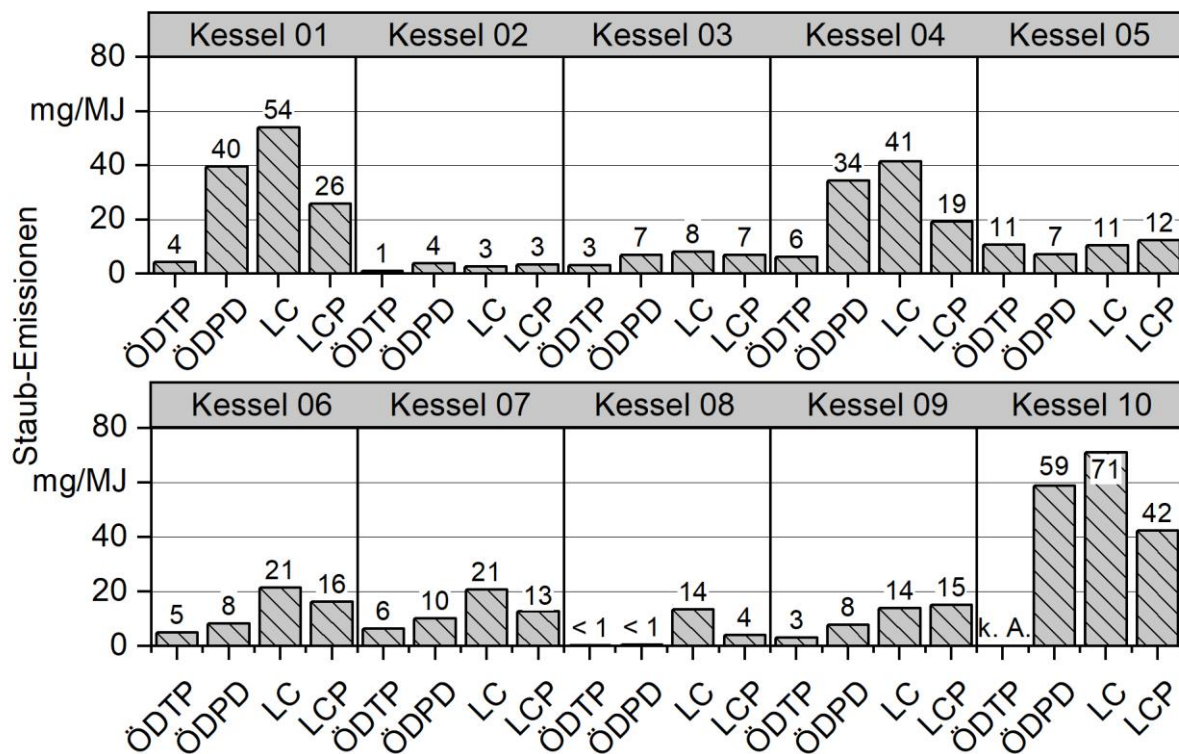


Abbildung 44: Vergleich der Staub-Emissionen nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicher (LCP)

Für die Staubemissionen wurde ebenfalls eine Heatmap erstellt, in welcher die Reihenfolge der Kessel zu sehen ist, Tabelle 26. Am deutlichsten ist eine Veränderung der Platzierung für Kessel 05 zu erkennen. Dieser belegt mit ca. 11 mg/MJ den 9. Platz, wenn die Typenprüfwerte nach Ökodesign-Verordnung verrechnet werden. Werden die Werte der nachgestellten Typenprüfung herangezogen, so schneidet der Kessel mit Platz 4 ab. Eine nochmalige Verbesserung zeigt der Kessel 05, wenn die Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicheranbindung durchgeführt wird. Die höchsten Staubemissionen lieferte stets Kessel 10 (alter Holzhackschnitzelkessel) gefolgt von Kessel 01, einem Pelletkessel mit Brennwerttechnik.

Tabelle 26: *Heatmap der Staub-Emissionen bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerten, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in mg/MJ*

Kessel	Ökodesign mit Typenprüfwerten	Nennlast	Teillast	Ökodesign berechnet	Lastzyklus ohne Puffer	Lastzyklus mit Puffer
Kessel 01	4,3	7	45	39,6	54	26
Kessel 02	1,1	5	4	3,9	3	3
Kessel 03	3,2	7	7	6,9	8	7
Kessel 04	6,2	20	37	34,5	41	19
Kessel 05	10,7	14	6	7,1	11	12
Kessel 06	4,9	8	8	8,2	21	16
Kessel 07	6,3	10	10	10,1	21	13
Kessel 08	0,3	1	0,3	0,5	14	4
Kessel 09	3,0	8	8	7,7	14	15
Kessel 10	k. A.	36,3	62,9	58,9	71	42,3

Effizienz (brennwertbezogen). Bei der Effizienz erzielen die drei Brennwertkessel die höchsten Effizienzen. Da die Effizienz auf den Brennwert bezogen ist, liegen die ausgewiesenen Nutzungsgrade durchweg unter 100 %, Abbildung 45. Es ist hierbei anzumerken, dass einige Nutzungsgrade aus den offiziellen Typenprüfwerten aufgrund fehlender Informationen nicht umgerechnet werden konnten bzw. diese Ergebnisse nicht in den Prüfberichten enthalten waren, daher konnte keine Angabe erfolgen (k. A.). Alle anderen Effizienzen sind brennwertbezogen aufgeführt. Für die Kessel 02, 03 und 05 sind kaum Unterschiede zwischen den Nutzungsgraden basierend auf den Typenprüfergebnissen und der Lastzyklus-Methode ersichtlich. Lediglich bei Kessel 08 sinkt der Nutzungsgrad deutlich von 81 % auf lediglich 73 %.

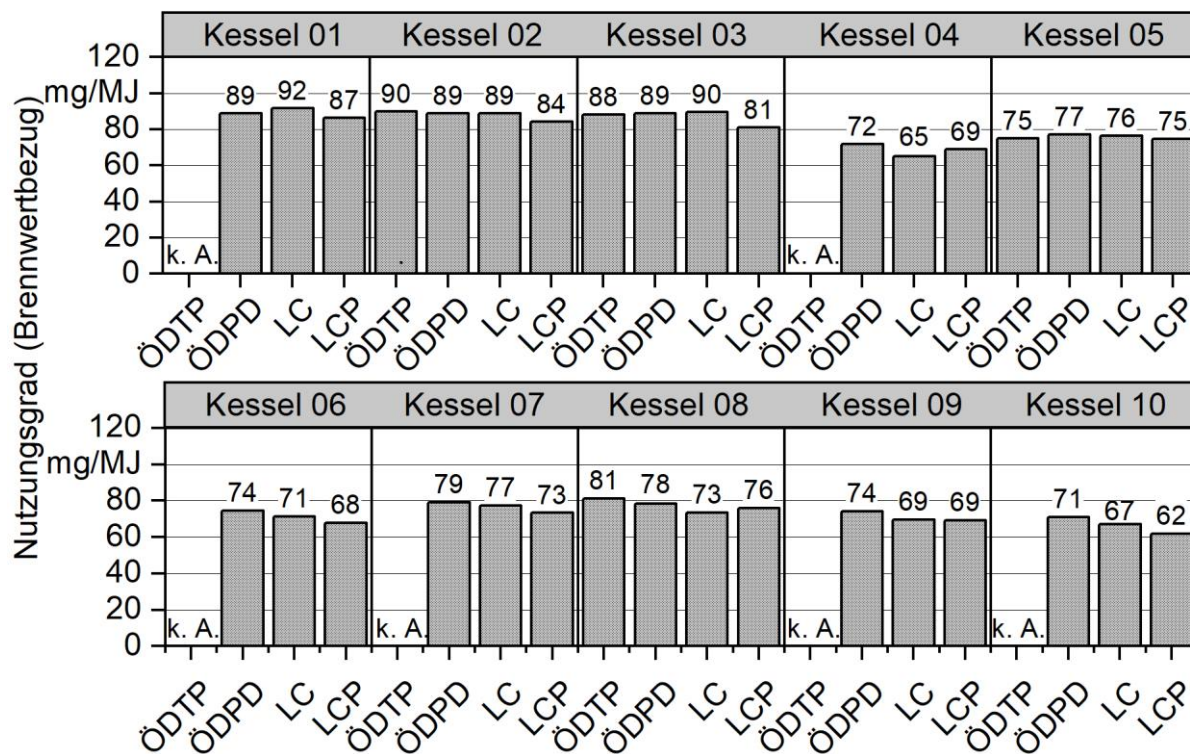


Abbildung 45: Vergleich der Nutzungsgrade nach Ökodesign-Verordnung mit den Typenprüfwerten (ÖDTP), mit den Projektdaten (ÖDPD), mit der Lastzyklus-Methode ohne Pufferspeicher (LC) und der Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicher (LCP)

Bei der Zusammenstellung der Nutzungsgrade in der Heatmap wird deutlich, dass die Brennwertkessel stets die höchsten Nutzungsgrade erzielen (grün hinterlegte Werte), Tabelle 27.

Tabelle 27: Heatmap der brennwertbezogenen Nutzungsgrade bei nachgestellten Nennlast- und Teillastbedingungen nach EN 303-5 und den daraus berechneten Ökodesign-Werten, den Ökodesign-Werten unter Verwendung der offiziellen Typenprüfwerte, der Lastzyklus-Methode und der Lastzyklus-Methode mit Pufferanbindung. Werte in %, k. A = keine Angaben dazu im Typenprüfbericht

Kessel	Ökodesign* mit Typenprüfwerten	Nennlast	Teillast	Ökodesign berechnet	Lastzyklus ohne Puffer	Lastzyklus mit Puffer
Kessel 01	k. A.	93,5	93,3	88,8	91,6	86,5
Kessel 02	90,0	93,8	92,7	88,9	88,9	84,4
Kessel 03	88,3	95,3	93,9	89,0	89,6	81,1
Kessel 04	k. A.	80,1	75,1	71,8	65,2	69,0
Kessel 05	75,0	83,3	81,9	77,1	76,3	74,7
Kessel 06	k. A.	81,3	79,1	74,3	71,2	67,6
Kessel 07	k. A.	82,3	83,3	79,0	77,3	73,4
Kessel 08	81,0	85,3	84,1	78,3	73,4	75,8
Kessel 09	k. A.	83,4	78,3	74,1	69,4	69,1
Kessel 10	k. A.	77,0	76,0	71,0	67,1	61,9

5.4 Zusammenfassung der Serienuntersuchung

Für die Erstellung der Serienuntersuchung wurden acht Pelletkessel und zwei Holzhackschnitzelkessel unter Typenprüfbedingungen sowie mit der neu entwickelten Lastzyklus-Methode ohne und mit Pufferspeicheranbindung getestet. Bei den Pelletkesseln kam fast in allen Kesseln ein einheitlicher Brennstoff zum Einsatz, während bei den beiden Holzhackschnitzelkesseln vier verschiedene Holzhackschnitzelqualitäten eingesetzt wurden.

Es zeigte sich, dass die Emissionen (CO, org.-C und Staub) unter stationären Bedingungen, wie sie in der Typenprüfung gefordert sind, am niedrigsten ausfallen. Weiterhin war auffällig, dass die Emissionen bei zwei der drei Brennwertkessel am niedrigsten waren. Wurde die Lastzyklus-Methode angewendet, stiegen die Emissionen zum Teil deutlich an, da nun auch ungünstige Betriebszustände wie der Kesselstart, verschiedene Lastwechsel, aber auch Kesselneustarts, die vor allem in der 13 %-Lastphase auftreten. Wurden die Kessel an einen Pufferspeicher angeschlossen, so verringerten sich die Emissionen wieder deutlich, erreichten jedoch nicht das Niveau einer Messung bei konstanter Nennlast nach Typenprüfungsvorgabe. Der Grund der Emissionsreduzierung mit Pufferspeicher ist in der verringerten Anzahl an Kesselneustarts während einer Lastzyklus-Prüfung zu finden.

Die Effizienz war in allen Messungen während der konstanten Nennlast am höchsten und sank leicht während des Teillastbetriebs. Eine weitere Verringerung der Effizienz wurde während der Lastzyklus-Methode ermittelt. Wie erwartet sank die Effizienz, wenn der Kessel an einen Pufferspeicher angeschlossen wurde. Dies ist mit den zusätzlichen Wärmeverlusten des Pufferspeichers und der Leitungsverluste zu begründen. Die Pufferverluste könnten durch Wahl eines Pufferspeichers der Klasse A verringert werden (hier kam die Effizienzklasse B zum Einsatz). Am stärksten sank die mit Pufferspeicher gemessene Effizienz bei den Brennwertkessel, da die Kondensation des Abgases vermindert wird, im Vergleich zum Betrieb ohne Pufferspeicheranbindung während der Lastzyklus-Methode.

Ein Vergleich der Ökodesign-Werte basierend auf den offiziellen Typenprüfungen und den nachgestellten Typenprüfungen im Rahmen des Projekts zeigt wieder einmal, dass die niedrigen Emissionswerte einer offiziellen Typenprüfung oft nicht reproduziert werden können und die nachgestellte Typprüfung meist höher ausfällt. Es zeigte sich in den meisten Fällen, dass die Emissionen unter Anwendung der Lastzyklus-Methode nochmals höher ausfallen als die bereits höheren Emissionen der nachgestellten Typenprüfung.

Ein Vergleich der brennwertbezogenen Effizienz mit den Ergebnissen aus der Typenprüfung nach Ökodesign war nicht immer möglich, da relevante Kenngrößen nicht im Typenprüfbericht der verwendeten Kessel enthalten waren. Generell zeigt sich, dass die Effizienz während des realen Betriebs im Lastzyklus niedriger ausfällt als bei der Verrechnung der Nennlast- und Teillastergebnisse nach Ökodesign, Ausnahmen ergeben sich aber bei den Brennwertkesseln.

Zusammenfassung

Für die Beschreibung eines realen Betriebs von Biomassekesseln sollte eine neuartige Methode erarbeitet, erprobt, validiert und angewendet werden. Diese neue Methode sollte nicht, wie bisher, den stationären Betrieb bei 100 % bzw. 30 % Leistung erfassen, sondern auch den Kesselstart aus dem kalten Zustand, die Laständerungen, verschiedene Lastzustände, aber auch ggf. den taktenden Betrieb bei niedriger Leistungsanforderung berücksichtigen.

In einem ersten Schritt wurde der Ablauf der Lastzyklus-Methode mit verschiedenen Wärmeanforderungsstufen über einen festgelegten Zeitraum definiert und alle notwendigen Parameter und Randbedingungen auch an die Messtechnik festgelegt. Hierzu wurde eine Vielzahl von experimentellen Untersuchungen vorgenommen, um beispielsweise eine möglichst korrekte Brennstofffassung oder eine zuverlässige Bestimmung von Gesamtstaubemissionen zu gewährleisten. Ebenso wurde die Anwendbarkeit für Brennwertfeuerungen getestet sowie eine Pufferspeichereinbindung erprobt. Für die Vergleichbarkeit der Messergebnisse wurden strengere und erweiterte Kriterien an den Pelletbrennstoff sowie an Holzhackschnitzel erstellt. Alle Erkenntnisse wurden in einem englischsprachigen Prüfstandshandbuch festgeschrieben, damit dieser auch international Anwendung finden kann.

Für die Beurteilung und Übertragbarkeit der Lastzyklus-Methode war es erforderlich, dass die Ergebnisse wiederholbar und reproduzierbar sind. Daher wurde ein Ringversuch mit insgesamt sechs erfahrenen Prüfstellen mit einem Brennwertkessel und einem konventionellen Kessel durchgeführt. Um Brennstoffeinflüsse auszuschließen, wurde ein homogener Pelletbrennstoff allen Prüfstellen zur Verfügung gestellt. Alle Ringversuchspartner wurden vor Beginn der Messungen im Rahmen eines Workshops hinsichtlich der teilweise neuen Messaufgaben und Anforderungen an die Prüfstellenausstattung geschult. Es zeigte sich, dass die Befolgung der Messmethode akribisch erfolgen muss und die Anforderung an die Messinfrastruktur unbedingt einzuhalten sind, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Die Validierung der Methode hat aber gezeigt, dass deren Anwendung zur Bestimmung realitätsnaher Emissionen und des Nutzungsgrades für Pellet-Zentralheizungskessel empfohlen werden kann. Die vorliegenden Daten lassen bereits erkennen, dass die Lastzyklus-Methode eine bessere Differenzierung zwischen den Feuerungsanlagen ermöglicht. Die Lastzyklus-Methode wurde vollständig in englischer Sprache dokumentiert und publiziert, so dass auch auf internationaler Ebene für die Wissenschaft, Industrie und Behörden eine kostenlose Dokumentation dauerhaft zur Verfügung steht.

Abschließend wurde die neu entwickelte Lastzyklus-Methode an acht Pelletkesseln, zwei Holzhackschnitzelkesseln und einem Ölkessel angewendet. Für eine bessere Beurteilung der Messergebnisse wurde an allen Kesseln die Typenprüfung bei Nennlast und Teillast nachgestellt. Ebenso wurde die Lastzyklus-Methode ohne und mit Pufferspeicheranbindung durchgeführt und ausgewertet.

Es zeigte sich, dass die Emissionen (CO, org.-C und Staub) unter den stationären Bedingungen, wie sie in einer Typenprüfung gefordert sind, am niedrigsten ausfallen. Weiterhin

war auffällig, dass die Emissionen bei zwei der drei Brennwertkesseln am niedrigsten waren, im Vergleich zu Heizwertkesseln. Wurde die Lastzyklus-Methode angewendet, stiegen die Emissionen zum Teil deutlich an, da nun auch ungünstige Betriebszustände wie der Kesselstart, verschiedene Lastwechsel, aber auch Kesselneustarts, die vor allem in der 13 %-Lastphase auftreten. Wurden die Kessel an einen Pufferspeicher angeschlossen, so verringerten sich die Emissionen wieder deutlich, erreichten jedoch nicht das Niveau einer Messung bei konstanter Nennlast nach Typenprüfungsvorgabe. Der Grund der Emissionsreduzierung mit Pufferspeicher ist in der verringerten Anzahl an Kesselneustarts während einer Lastzyklus-Prüfung zu finden. Bei der Effizienz zeigte sich, dass diese im realen Betrieb niedriger ausfällt als bei stationären Bedingungen. Wie erwartet verringerte sich die Effizienz bei einer Pufferspeicheranbindung des Kessels, was auf Wärmeverluste des Pufferspeichers und der Zufuhrleitungen zurückzuführen ist. Vor allem beim Betrieb der drei Brennwertkessel sank die Effizienz mit einer Pufferspeicheranbindung nochmals deutlich, da die Kondensation nicht mehr optimal erfolgen konnte.

Wenn die Kessel anhand der verschiedenen Prüfmethoden untereinander verglichen werden, so verändert sich die Rangfolge. Somit kann ein Kessel, der in der Typenprüfung die niedrigsten Emissionen erzielt, während der Lastzyklus-Methode höhere Emissionen freisetzen als andere Kessel. Ohne eine solche realitätsnahe Kesselprüfung wie nach der Lastzyklus-Methode besteht die Gefahr, dass vielfach Kessel positiv hervorgehoben oder ausgezeichnet werden, die eine solche Auszeichnung wegen ihrer im Anlagenvergleich höheren Emissionen im Realbetrieb eigentlich nicht verdienen.

Die Lastzyklus-Methode konnte auch erfolgreich bei einem Ölkessel angewendet werden. Für diesen Ölkessel zeigte sich auch eine deutlich geringere Effizienz im realen Betrieb als unter stationären Versuchsbedingungen.

Für die Zukunft steht mit der hier erarbeiteten Lastzyklusprüfung eine validierte und gut dokumentierte Prüfmethode zur Verfügung, durch die eine zuverlässige Bewertung von Kesseln im realen Betrieb ermöglicht wird. Eine solche realitätsnahe Anlagenbeurteilung kann für viele Anwendungen interessant sein, hierzu zählt unter anderem die Vergabe eines Gütesiegels für automatisch beschickte Holzzentralheizungen. Die Methode ermöglicht aber auch einen Einstieg in eine direkte versuchstechnische Bestimmung des Anlagennutzungsgrads bzw. der Emissionsfaktoren für Zentralheizungskessel, wie sie beispielsweise für die Erfüllung luftreinhaltungsbezogener Meldepflichten erforderlich sind. Nicht zuletzt ist die Methode auch für Entwickler und Werksprüfstände interessant, die Optimierungsmaßnahmen an ihrer Kesselsteuerung einer praxisähnlichen Überprüfung unterziehen möchten.

Quellenverzeichnis

- [1] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2008): VDI 4655 - Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK-Anlagen, Mai 2008. 40 Seiten
- [2] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (2019): VDI 4655-Blatt 1 Entwurf - Referenzlastprofile von Wohngebäuden für Strom, Heizung und Trinkwasser sowie Referenzerzeugungsprofile für Fotovoltaikanlagen, September 2019. 36 Seiten
- [3] HECKMANN, M.; FRIEDL, G.; SCHWARZ, M.; ROSSMANN, P.; HARTMANN, H.; BAUMGARTNER, H.; LASSELSBERGER, L.; THEMESSEL, A. (2010): Bestimmung von Jahresnutzungsgrad und Emissionsfaktoren von Biomasse-Kleinfeuerungen am Prüfstand - Endbericht. Bioenergy2020+, 163 Seiten
- [4] BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE (2018): Förderübersicht Biomasse (Basis-, Innovation- und Zusatzförderung), Stand 02.01.2018
- [5] BUNDESAMT FÜR WIRTSCHAFT UND AUSFUHRKONTROLLE (2020): Merkblatt zu den technischen Mindestanforderungen - Heizen mit Erneuerbaren Energien. Stand 08.06.2020
- [6] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ (2022): Richtlinie für die Bundesförderung für effiziente Gebäude - Wohngebäude (BEG-WG), Bundesanzeiger vom 25.01.2022. 19 Seiten
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2018): DIN EN Entwurf 303-5: Heizkessel – Teil 5: Heizkessel für feste Brennstoffe, manuell und automatisch beschickte Feuerungen, Nennwärmeleistung bis 500 kW – Begriffe, Anforderungen, Prüfungen und Kennzeichnung; deutsche und englische Fassung prEN 303-5:2018; Mai 2018. Berlin: Beuth, 195 Seiten
- [8] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2020): DIN EN ISO 17225-2 Entwurf: Biogene Festbrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 2: Klassifizierung von Holzpellets (ISO/DIS 17225-2:2020); deutsche und englische Fassung prEN ISO 17225-2:2020; April 2020. Berlin: Beuth, 31 Seiten
- [9] DEUTSCHES PELLETINSTITUT GMBH (DEPI); PROPELLETS AUSTRIA; PROPELLETS.CH; EUROPEAN PELLET COUNCIL (2015): ENplus Qualitätszertifizierung für Holzpellets. ENplus-Handbuch für Deutschland, Österreich und die Schweiz. Version 3.0, August 2015. Gesamtausgabe. Berlin: Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI), 100 Seiten
- [10] MACK, R.; SCHÖN, C.; HARTMANN, H.; BRUNNER, T.; OBERNBERGER, I. (2022): Erweiterte Holzpelletcharakterisierung - Einfluss bekannter und neuer Brennstoffparameter auf die Emissionen aus Pelletöfen und -kesseln. Berichte aus dem TFZ, Nr. 74. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 420 Seiten, ISSN 1614-1008
- [11] EUROPÄISCHE UNION (2015): Verordnung (EU) 2015/1189 der Kommission zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Festbrennstoffkesseln. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R1189>, Stand 21.07.2015

- [12] SCHÖN, C.; HARTMANN, H. (2018): Status on PM emission measurement methods and new developments - Technical Report. IEA Bioenergy, Task 32, July 2018, 50 pages, https://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/24/2018/09/IEA-Paper_PM_determination.pdf
- [13] KUPTZ, D.; HOFMANN, N.; MENDEL, T.; LESCHE, S.; RIEBLER, M.; SCHULMEYER, F.; SCHÖN, C.; BURGER, F.; BORCHERT, H.; HARTMANN, H. (2020): Effiziente Lagerungs- und Aufbereitungsverfahren für Holzhackschnitzel. Berichte aus dem TFZ, Nr. 70. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe (TFZ), 328 Seiten, ISSN 1614-1008
- [14] ZECH, D.; ULLRICH, S.; WÜLBECK, H-F.; STUIBLE, A.; WAPLER, J.; AMENDT, L.; MIARA, M.; OLTERSDORF, T.; WERNER, F.; OROZALIEV, J.; VAJEN, K.; SCHRÖDER, G.; HARTMANN, H. (2020): Evaluation und Perspektiven des Marktanreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2019 bis 2020. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Evaluationen/Foerdermassnahmen/evaluation-marktanreizprogramms-2019.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- [15] FELDMEIER, S.; SCHWARZ, M.; ROßMANN, P.; HARTMANN, H.; SCHÖN, C. (2022): Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers - Manual for test stands. To be published at <https://www.tfz.bayern.de/festbrennstoffe/projekte/229191/index.php>.
- [16] CARLON, E.; VERMA, VK.; SCHWARZ, M.; GOLICZA, L.; PRADA, A.; BARATIERI, M; HASLINGER, W.; SCHMIDL, C. (2015): Experimental validation of a thermodynamic boiler model under steady state and dynamic conditions. Applied Energy 138, p. 505-516
- [17] ZECH, D.; ULLRICH, S.; WÜLBECK, H-F.; STUIBLE, A.; WAPLER, J.; AMENDT, L.; MIARA, M.; OLTERSDORF, T.; WERNER, F.; OROZALIEV, J.; VAJEN, K.; SCHRÖDER, G.; HARTMANN, H.: Evaluation des Marktanreizprogramms zur Förderung von Maßnahmen zur Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt im Förderzeitraum 2015 bis 2017, Oktober 2018. https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/evaluierung-marktanreizprogramm-2018.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [18] VERMA, V.; SCHWARZ, M.; CARON, EL; KERSCHBAUM, M.; ROßMANN, P.; KARAMPINIS, M.; CHIESA, M.; TRIGO, A.; BÜCHNER, D. (2014): BioMaxEff: Cost efficient biomass boiler systems with maximum annual efficiency and lowest emissions. Final publishable summary report, 41 pages.

6 Anhang: Weitere Messwerte

*Tabelle 28: Emissions- und Effizienzwerte der acht untersuchten Pelletkessel - Teil 1.
NL = Nennlast, TL = Teillast, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, HW = heizwertbezogen, BW = brennwertbezogen, n. b. = nicht bestimmt*

Kessel	Pellet	Versuch	CO in mg/MJ	NO _x in mg/MJ	Org.-C in mg/MJ	Staub in mg/MJ	Effizienz (HW) in %	Effizienz (BW) in %
01	A	NL	32,3	84,9	< 1	6,7	101,7	93,5
01	A	TL	310,7	65,5	3,2	45,4	101,5	93,3
01	A	LC	252,8	70,9	5,7	53,9	99,7	91,6
01	A	LCP	240,0	75,3	5,6	25,8	94,2	86,5
02	A	NL	6,1	74,2	< 1	4,9	102,1	93,8
02	A	TL	9,4	66,9	< 1	3,8	100,9	92,7
02	A	LC	83,6	73,0	1,1	2,8	96,7	88,9
02	A	LCP	40,9	77,0	1,2	3,3	91,8	84,4
03	A	NL	4,1	91,9	< 1	7,3	103,7	95,3
03	A	TL	15,5	74,0	< 1	6,8	101,6	93,3
03	A	LC	105,1	77,5	5,0	8,1	97,4	89,6
03	A	LCP	34,7	95,7	2,5	6,9	88,3	81,1
04	A	NL	73,8	94,0	1,7	19,7	86,9	80,1
04	A	TL	127,4	78,9	5,0	37,1	81,4	75,1
04	A	LC	625,9	87,7	39,0	41,4	70,6	65,2
04	A	LCP	121,2	90,8	3,4	19,3	74,7	69,0

Tabelle 29: Emissions- und Effizienzwerte der acht untersuchten Pelletkessel - Teil 2.
 NL = Nennlast, TL = Teillast, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, HW = heizwertbezogen, BW = brennwertbezogen, n. b. = nicht bestimmt

Kessel	Pellet	Versuch	CO in mg/MJ	NO _x in mg/MJ	Org.-C in mg/MJ	Staub in mg/MJ	Effizienz (HW) in %	Effizienz (BW) in %
05	A	NL	4,4	103,1	< 1	13,8	90,6	83,3
05	A	TL	19,8	84,1	< 1	5,9	89,0	81,9
05	A	LC	124,8	85,7	7,9	10,5	83,0	76,3
05	A	LCP	53,7	96,9	4,8	12,5	81,3	74,7
06	B	NL	18,8	74,5	< 1	8,3	88,5	81,3
06	B	TL	55,8	67,3	< 1	8,1	86,1	79,1
06	B	LC	168,9	76,4	16,5	21,5	78,4	71,2
06	B	LCP	66,6	70,7	3,6	16,3	74,4	67,6
07	A	NL	53,4	108,6	< 1	10,4	89,6	82,3
07	A	TL	91,2	98,4	1,6	10,0	90,7	83,3
07	A	LC	187,3	98,9	3,4	20,8	84,2	77,3
07	A	LCP	105,6	105,5	1,8	12,8	80,0	73,4
08	A	NL	4,9	105,5	< 1	1,3	92,9	85,3
08	A	TL	168,6	86,7	1,2	< 1	91,5	84,1
08	A	LC	294,2	94,7	17,0	13,5	80,0	73,4
08	A	LCP	76,0	97,5	2,7	3,9	82,6	75,8

Tabelle 30: Emissions- und Effizienzwerte von Kessel 09, einem Holzhackschnitzelkessel. NL = Nennlast, TL = Teillast, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, HW = heizwertbezogen, BW = brennwertbezogen, n. b. = nicht bestimmt

Kessel	Brennstoff	Versuch	CO in mg/MJ	NO _x in mg/MJ	Org.-C in mg/MJ	Staub in mg/MJ	Effizienz (HW) in %	Effizienz (BW) in %
09	Fi-Erh	NL	67,0	88,5	< 1	8,2	91,4	83,4
09	Fi-Erh	TL	15,8	81,8	< 1	7,6	85,8	78,3
09	Fi-Erh	LC	602,4	99,5	15,1	14,1	75,9	69,4
09	Fi-Erh	LCP	215,9	86,6	4,4	14,9	75,6	69,1
09	Fi-Wrh	NL	24,16	159,9	< 1	9,6	91,3	83,3
09	Fi-Wrh	TL	32,1	140,3	1,4	9,2	93,2	85,0
09	Fi-Wrh	LC	378,4	147,3	10,9	13,6	76,3	69,8
09	Fi-Wrh	LCP	205,7	149,1	5,0	15,4	75,4	69,0
09	Bu-Erh	NL	56,7	110,0	1,4	7,7	90,3	82,1
09	Bu-Erh	TL	27,8	94,1	1,8	6,0	82,1	74,6
09	Bu-Erh	LC	579,5	105,1	17,1	14,4	71,3	65,2
09	Bu-Erh	LCP	331,1	102,3	8,7	15,4	74,7	68,3
09	Bu-Wrh	NL	35,7	161,1	< 1	10,9	89,9	81,5
09	Bu-Wrh	TL	36,0	150,8	1,8	8,5	83,3	75,6
09	Bu-Wrh	LC	461,8	156,9	16,7	16,7	73,9	67,3
09	Bu-Wrh	LCP	211,1	154,7	6,4	16,7	74,3	67,7

Tabelle 31: Emissions- und Effizienzwerte von Kessel 10, einem Holzhackschnitzelkessel. NL = Nennlast, TL = Teillast, LC = Lastzyklus-Methode, LCP = Lastzyklus-Methode mit Pufferspeicheranbindung, HW = heizwertbezogen, BW = brennwertbezogen, n. b. = nicht bestimmt

Kessel	Brennstoff	Versuch	CO in mg/MJ	NO _x in mg/MJ	Org.-C in mg/MJ	Staub in mg/MJ	Effizienz (HW) in %	Effizienz (BW) in %
10	Fi-Erh	NL	29,2	92,4	< 1	36,3	84,5	77,0
10	Fi-Erh	TL	281,9	80,5	4,1	62,9	83,3	76,0
10	Fi-Erh	LC	616,2	n. b.	234,9	71,0	73,5	67,1
10	Fi-Erh	LCP	230,1	89,6	15,2	42,3	67,7	61,9
10	Fi-Wrh	NL	32,2	148,8	< 1	44,2	82,5	75,2
10	Fi-Wrh	TL	349,8	126,5	3,1	74,3	87,3	79,6
10	Fi-Wrh	LC	1150,3	121,7	660,4	98,4	70,5	64,4
10	Fi-Wrh	LCP	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
10	Bu-Erh	NL	115,9	112,7	1,4	43,9	81,1	74,2
10	Bu-Erh	TL	697,2	93,0	15,1	45,7	77,0	70,5
10	Bu-Erh	LC	824,4	99,6	67,5	41,0	75,6	68,8
10	Bu-Erh	LCP	542,0	107,5	47,9	33,8	70,0	63,7
10	Bu-Wrh	NL	49,3	161,8	< 1	43,9	80,4	73,2
10	Bu-Wrh	TL	402,7	133,0	4,7	53,5	86,0	78,3
10	Bu-Wrh	LC	1033,9	153,7	89,6	n. b.	70,9	64,9
09	Bu-Wrh	LCP	311,5	163,8	24,1	56,9	67,9	62,2

7 Anhang - Erarbeitetes Methodenhandbuch

Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers - Manual for test stands

Load cycle test method for the assessment of real-life performance of automatically stoked biomass boilers – Manual for test stands

Authors

Sabine Feldmeier (1)
Markus Schwarz (2)
Paul Roßmann (1)
Hans Hartmann (1)
Claudia Schön (1)

(1) Technology and Support Centre in the Centre of Excellence of Renewable Resources (TFZ)

(2) Bioenergy and Sustainable Technologies (BEST)

This manual was developed within the CycleTest project and funded by the German Ministry of Food and Agriculture (BMEL) on behalf of a decision of the German Bundestag. Funding was administrated by the FNR (Grant number: 22409818)

Straubing, December 2022

Content

1	Introduction and field of application	5
2	Terms and definition	7
3	Normative reference.....	9
4	Boiler assembly and test setup	11
4.1	Ambient conditions.....	11
4.2	Hydraulic configuration.....	11
4.3	Accumulator storage tank requirements	13
4.4	Determination of fuel consumption	14
4.5	Heat transfer system.....	15
4.6	Flue gas measuring section.....	16
4.7	Measuring accuracy.....	20
5	Requirements on test fuel properties	21
5.1	Wood pellets	21
5.2	Wood chips	21
5.3	Required fuel analysis data	22
6	Test procedure	23
6.1	Standard load pattern	23
6.2	Boiler condition and settings	23
6.3	Procedure of the Load Cycle Test.....	24
6.4	Data acquisition.....	28
7	Data evaluation and calculations	31
7.1	Determination of heat output and boiler efficiency	31
7.1.1	Determination of fuel mass and fuel energy input.....	31
7.1.2	Determination of heat output.....	32
7.1.3	Calculation of nominal annual efficiency (η_{NEA}).....	33
7.2	Determination of emission factors	33
7.2.1	Calculation of aggregated emission load over the Load Cycle (m_{EM}).....	34
7.2.2	Calculation nominal annual emission factors (NAEF)	35
7.3	Assessment of data quality	35
7.3.1	Reference temperature requirements.....	36
7.3.2	Carbon balance criterion	36
7.3.3	Flow deviation criterion	37
7.3.4	Setpoint temperature criterion.....	38
7.3.5	General requirements	38

7.4	Evaluation of measurements using the evaluation software.....	39
7.4.1	Interpolation of data points	39
7.4.2	Preparation for the evaluation	39
7.4.3	Excel evaluation tool.....	41
8	Test report.....	43
	Literature	45

1 Introduction and field of application

The objective of the CycleTest project was the further development of a method to determine efficiency and emissions of biomass boilers. In contrast to existing test methods the Load Cycle Test is conducted under real-life operation conditions.

The Load Cycle Test simulates the operation of a boiler which is either directly connected to a building's heating circuit or connected via an accumulator storage tank. Therefore, the heat output of the boiler shall vary according to a standard load pattern. The boiler operation duration of each dynamic test is 8 hours with an additional 12-hour standby phase at the end of each test run followed by a short period of time to reach a defined equilibrium temperature.

Due to dynamic measurements, the test stand setup is an enhanced version of the setup necessary for type test method according to EN 303-5:2021 [1]. It requires additional measurement infrastructure, particularly in terms of determination of flue gas velocity, a transient way of particulate matter (PM) sampling, and a heat transfer system which controls a defined and variable heat demand (i. e. capable of water flow rate variation).

In order to cover particular implementation requirements of the manufacturer, the Cycle Test Method optionally allows to perform the test in combination with an accumulator storage tank or a configuration with a hydraulic separator to enable a higher range of return temperature.

The test procedure covers the measurement of several pollutant emissions and the annual system efficiency under varying operational conditions of the boiler. In contrast to the type testing procedure of EN 303-5:2021 [1] non-stationary operational conditions are also measured and evaluated.

Overall, some enhanced accuracy requirements need to be met for the Load Cycle Test and special measuring devices are required (e. g. accurate flow meters, sample gas pumps with highly variable flow amplitude, high precision balance for fuel mass determination, additional electric power meter etc.).

As the volume flow rate of the flue gas varies during dynamic operation it is necessary to determine pollutant emissions proportionally to the dynamics of the flue gas flow as well. This volume flow undergoes quite some changes throughout the load cycle, e. g., when the boiler performs an on-and-off operation in order to achieve the heat output of the given load phase.

Method specifications are even more demanding for determination of particle emission. Not only the total particle mass shall be determined over a long period of time without any major interruptions, but also the volume flow of the extracted gas for PM sampling shall be synchronized with the simultaneously measured dynamic volume flow in the flue gas duct.

The entire test cycle includes all the phases of boiler operation (cold start, warm start, varying heat demand, steady-state operation at different loads, shutdown, and standstill) and allows the measurement of the annual standard efficiency and the annual standard

emission factors in a short period of time. Each load change in the resulting 8-hour Load Cycle Test is provided with defined gradients.

2 Terms and definition

For the purpose of this method the following terms and definitions apply:

Accumulator storage tank

Container which stores excess heat (resulting from the difference between the boiler heat output and the actual heat load to the heating system)

Nominal annual efficiency

The nominal annual efficiency is equivalent to the value measured for the rate of efficiency throughout the test cycle. It considers electricity demand of the boiler as well. It is related to the sum of energy supplied in the form of fuel and auxiliary electric energy consumed

Nominal annual emission (level) (mass)

Nominal annual emission (level) corresponds to the emission freight of the boiler over a one-year period. It is the absolute level of emissions emitted by the boiler having a thermal energy output of 2000 full load hours.

Quality criteria

Results of additional calculations to rate the quality of measurement, on one hand how well balances are closed on the other hand if test stand fulfils the requirements of the Load Cycle Test.

Standard reference conditions, standard temperature, and pressure (STP)

According to DIN 1343 [2] standard reference conditions of temperature and pressure for expressing gas volumes are 0 °C and 101,325 kPa.

Flue gas measuring section

Flue gas pipe with reduced diameter to increase flue gas velocity to reach better performance in flue gas velocity measurement.

Reference Temperature

This is the temperature to which the test setup is tempered prior to and after the Load Cycle Test. Furthermore, it is the set temperature of the return flow.

The reference temperature is 45 °C for conventional and 25 °C for condensing boiler.

Setpoint Temperature

The setpoint temperature for operation is 70 °C for conventional and 50 °C for condensing boiler.

Standard load pattern

The standard load pattern considers the reference load profiles provided by VDI guideline 4655:2019 [20]. Varying heat demand profile during day.

3 Normative reference

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

Table 1: References needed for load cycle test method

Normative reference	Title of normative reference
DIN 1343:1990	Reference conditions, normal conditions, normal volume; concepts and values
DIN EN 303-5:2021	Heating boilers - Part 5: Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW - Terminology, requirements, testing and marking
DIN EN 304:2018	Heating boilers - Test code for heating boilers for atomizing oil burners
OIML R 75-1 Edition 2002 (E)	Heat meters - Part 1: General requirements
OENORM A 6403:2010	Rounding of numbers and results of measurements
VDI 4655-1:2019	Reference load profiles of residential buildings for power, heat and domestic hot water as well reference generation profiles for photovoltaic plants
DIN EN 12619:2013	Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of total gaseous organic carbon - Continuous flame ionisation detector method
VDI 2066-1:2021	Particulate matter measurement dust measurement in flowing gases gravimetric determination of dust load
ISO 13284-1:2018	Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: Manual gravimetric method
ISO 15456:2008	Heating boilers - Electrical power consumption for heat generators - System boundaries – Measurements
ISO 17829:2016	Solid biofuels - Determination of length and diameter of pellets
ISO 18122:2015	Solid biofuels - Determination of ash content
ISO 18134-1:2015	Solid biofuels - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Total moisture - Reference method
ISO 17831-1:2015	Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes - Part 1: Pellets

ISO 18846:2016	Solid biofuels - Determination of fines content in samples of pellets
ISO 21404:2020	Solid biofuels - Determination of ash melting behaviour
ISO 18125:2017	Solid biofuels - Determination of calorific value
ISO 17828:2015	Solid biofuels - Determination of bulk density
ISO 18847:2016	Solid biofuels - Determination of particle density of pellets and briquettes
ISO 16948:2015	Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen
ISO 16967:2015	Solid biofuels - Determination of major elements - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na and Ti
ISO 17225-4:2021	Solid biofuels - Fuel specification and classes - Part 4: Graded wood chips
ISO 17827-2:2018	Solid biofuels - Determination of particle size distribution for uncompressed fuels
DIN EN ISO/IEC 17025:2018	General requirements for the competence of testing and calibration laboratories

4 Boiler assembly and test setup

To conduct the standard Load Cycle Test (see section 6.3) a specific infrastructure and further requirements are necessary, they are described in the following.

4.1 Ambient conditions

The ambient temperature in the test facilities shall be between 15 °C and 30 °C. Changes in ambient temperature during the performance of tests shall not exceed 2 K/h. The test assembly is to be protected against any direct impact from other potential (external) heat or cold sources, e. g. adjacent test assemblies, sunlight, or accidentally left open doors. Ambient temperature shall be determined continuously throughout the Load Cycle Test. Atmospheric pressure shall be determined at least once. If significant fluctuations can be expected repeated or continuous measurements should be conducted.

4.2 Hydraulic configuration

To consider different boiler systems the setup includes several options for connecting the boiler with the heat transfer system (see section 4.5):

- If the boiler manufacturer requires the operation with accumulator storage tank → integration of accumulator storage tank (see section 4.3).
- The manual of the manufacturer allows an operation of the boiler with a return temperature of 45 °C for conventional boilers and to 25 °C for condensing boilers → direct connection to heat transfer system.
- The boiler requires a higher return temperature and is equipped with an internal circulation pump and a mixer → a hydraulic separator shall be installed to connect the boiler.
- The boiler requires an increase of return temperature but is not equipped with an internal circulation pump → a hydraulic separator, an external circulation pump and a mixer shall be installed to connect the boiler.
- If the boiler manufacturer recommends the integration of a device (mixer and circulation pump) for increasing the return temperature when an accumulator storage tank is connected → this device shall be installed independent of temperature ranges.

Before designing the setup, the manuals and instructions shall be checked to answer the questions according to the boiler setup flow chart (Figure 1):

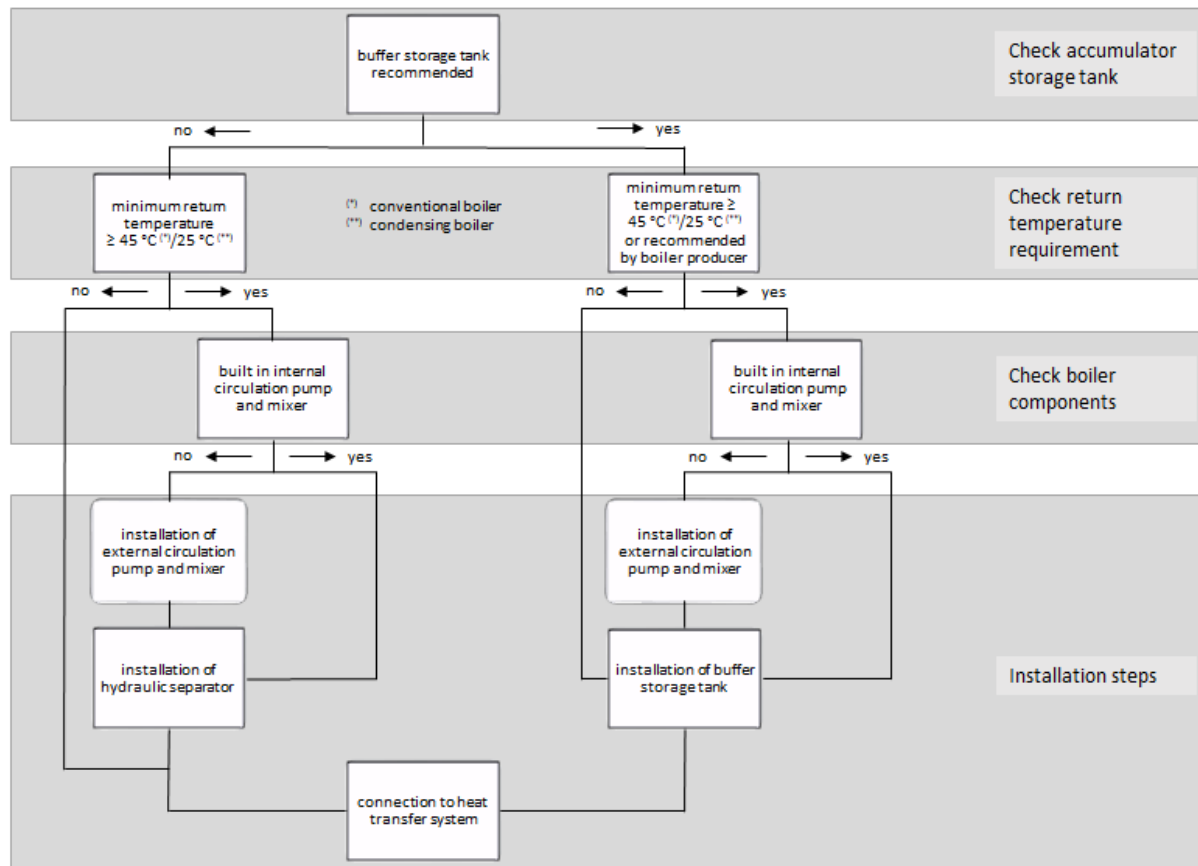


Figure 1: Flow chart boiler setup.

The hydraulic separator enables the boiler to operate more independently by controlling the flow rate (circulation pump) and the temperature (mixer) of the return water. Thus, it decouples the mass flow of the primary circuit (boiler, within system boundaries) and the mass flow of the secondary circuit (heat transfer system). In this case additional sensors for flow and return temperature of the boiler circuit are necessary.

Figure 2 shows these two options, i. e. with and without hydraulic separator, and indicates the respective system boundaries. For installation setup with an accumulator storage tank additional specifications are given in section 4.3.

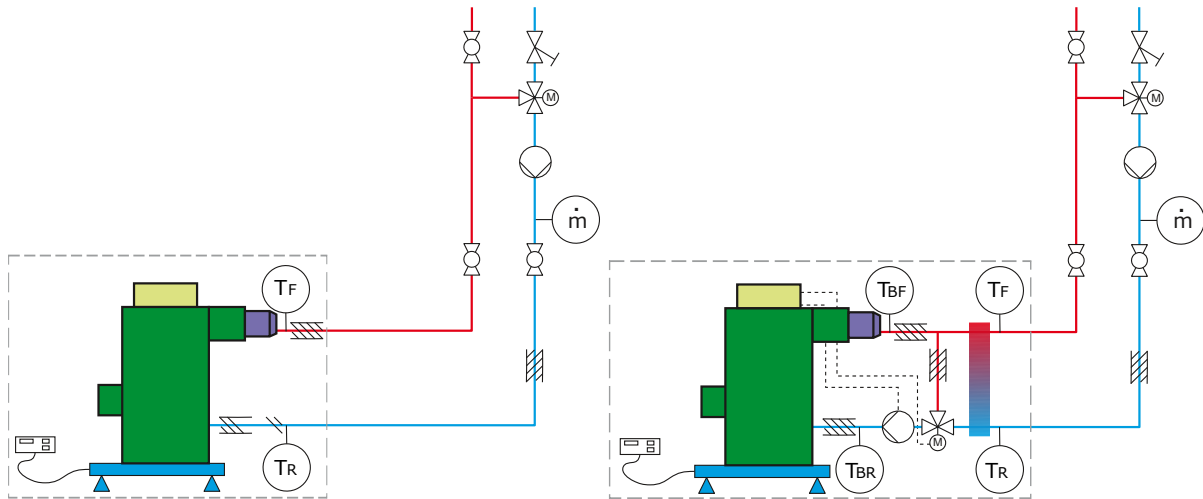


Figure 2: *Boiler system without (left) and with hydraulic separator, external circulation pump and mixer (right) on the test stand, the system boundaries are indicated. T_F = flow temperature, T_R = return temperature, T_{BF} = flow temperature at boiler, T_{BR} = return temperature at boiler, \dot{m} = water mass flow.*

The insulation of the surfaces within the system boundary as shown in Figure 2. For pipe diameters of 25 mm it shall use material with a thickness of the insulation layer of 30 mm given that the thermal conductivity is 0.035 W/(m·K). For other materials the minimum thickness of the insulation layer shall be adapted accordingly¹.

4.3 Accumulator storage tank requirements

The volume of the accumulator storage tank shall be 25...35 L/kW nominal load. It shall fulfil the requirements of energy labelling category A or B according to EU Regulation 812/2013 [24]. When the installation of a device for increasing the return temperature is recommended by the boiler manufacturer or the required return temperature is higher than the reference temperature (see section 6.3) the integration of an additional mixer and a circulation pump is necessary.

The diameter of the connecting pipes shall be minimum 25 mm and the length of the flow and return temperature shall be 3 meters and 5 meters, respectively. The thermal insulation of the hoses or pipes shall meet the requirements as specified in section 4.2. Suitable insulation layer thicknesses are 20 mm (inner diameter up to 22 mm), 30 mm (inner diameter more than 22 mm), or 35 mm (inner diameter more than 35 mm) if material specifications are met. In the setup an expansion vessel may be required.

The mode of operation shall be based on the settings of the boiler control, i. e. temperature range of accumulator storage tank, circulation pump etc. Therefore, the boiler

¹ This is in line with the German energy act for buildings (Gebäudeenergiegesetz – GEG [22]; which implements the EU Directive on the energy performance of buildings - 2010/31/EU, [23]).

manufacturer shall provide suitable temperature sensors. These sensors shall be installed according to the boiler manufacturer's guideline.

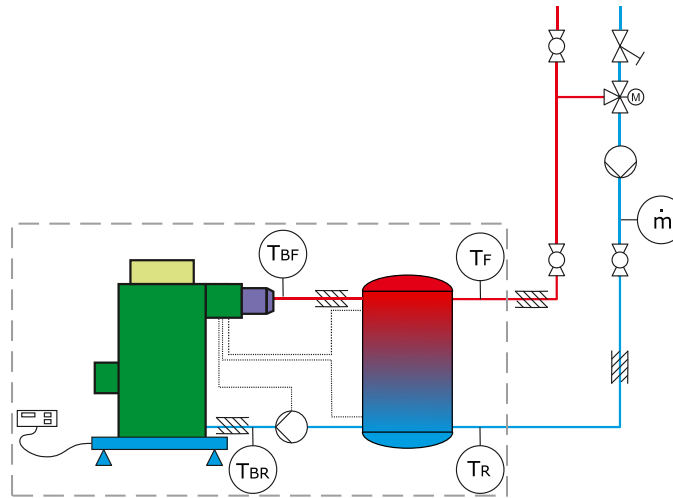


Figure 3: *Boiler system with accumulator storage tank and buffer charge pump on the test stand, the system boundaries are indicated, the expansion vessel is not shown. T_F = flow temperature, T_R = return temperature, T_{BF} = flow temperature at boiler, T_{BR} = return temperature at boiler, \dot{m} = water mass flow. This setup shows the installation with direct connection to the accumulator storage tank without increase of the return temperature.*

4.4 Determination of fuel consumption

An accurate determination of fuel consumption is one of the most crucial tasks of the method. Fuel consumption shall be determined continuously and recorded over the complete observation period. Following methods are permitted²:

Setup A) The boiler is placed on a balance (Figure 4, left). The minimization of frictional connections via the flue gas ducts and water hoses (mass decoupling) shall be realized with great care³ in order to meet the accuracy requirement in Table 2.

Further inaccuracies may occur due to the density differences of the boiler water, they are compensated by the fact that the observation period of the whole cycle begins and ends at a uniform temperature level.

Setup B) The fuel supply container is placed on a balance (Figure 4, right).

² A fuel consumption determination by recording the mass to refill the fuel supply container to the initial level is regarded inaccurate.

³ It is strongly recommended to ensure that all connections (flue gas, water, electricity) are in a positioned horizontally in order to prevent any impact from occurring forces on the balance. Be aware that heating and cooling of flue gas duct and water hoses cause length variation that would in a vertical position be severely violating the measurement accuracy.

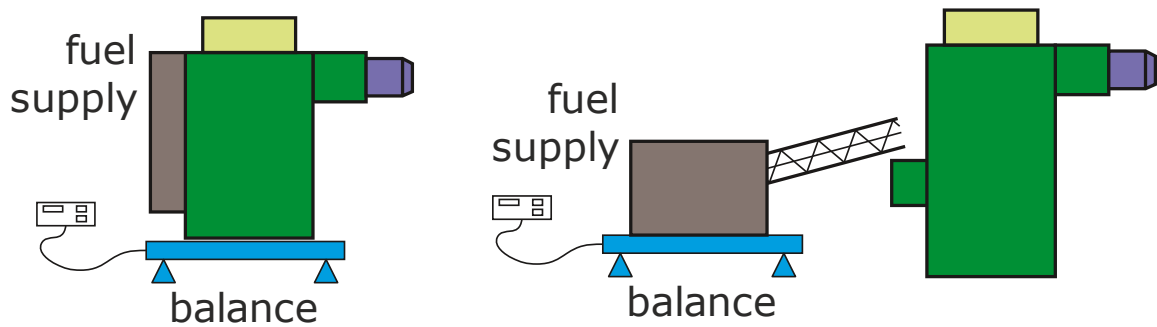


Figure 4: Boiler system with integrated fuel supply container (left) and boiler system with separate fuel supply container (right) on the test stand.

It shall be possible to determine the efficiency during stationary operation as well as through the standard load cycle within a tolerance threshold of $\pm 3\%$ as also specified under EN 303-5:2021 [1].

For boiler which are installed on a balance a correction for the remaining ash is required. The amount of ash formed during the test is calculated via the ash content and the combusted fuel (equation in section 7.1.1). The evaluation software (Annex A) considers this correction automatically. For boilers which are equipped with an external fuel supply container no correction for ash content is required.

4.5 Heat transfer system

The configuration of the heat transfer system shall allow a continuous, sufficiently fast, and exact control of heat transfer. The facilities for the measurement of the following parameters shall be provided: flow temperature, return temperature and mass flow rate of the water. The hydraulic configuration is described in section 4.2 and section 4.3.

Flow and return temperatures shall be measured, using appropriate sensors, right at the boundaries of the system (Figure 2). The determination of water mass flow rate, or alternatively the calculation via volume flow and water density, is required.

The return temperature from the heat transfer system shall be set at $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ for conventional boilers or $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ for condensing boilers. In case the boiler control system requires a higher return temperature, the temperature increase should be controlled by the boiler system (installation with hydraulic separator, see section 4.2) if possible. The heat output is calculated according to EN 304:2018 [3].

Requirements regarding heat output variation. The heat transfer system shall be fitted with suitable controls allowing the continuous adjustment of heat output according to set values of the load cycle. This adjustment should preferably be performed automatically by variations of water mass flow proportional to the standard load pattern (Figure 6, see section 6.3). The test stand shall provide an appropriate infrastructure that allows to follow the

standard load pattern accurately. The spread between flow and return temperatures at rated capacity shall be held constant at 25 K. Therefore, the return temperature shall increase if boiler temperature is above 70 °C or 50 °C for condensing boilers but shall not fall below the defined return temperatures. The heat output delivered by the boiler system shall correspond to the target heat demand specified by the standard load pattern. This criterion shall be verified by the evaluation of the mass flow dynamics.

The Flow Deviation Criterion:

The variable heat demand is controlled by variation of water mass flow. The dynamics shall be proportional to the standard load pattern ($dQ \sim dT \cdot dm/dt$). The proportionality shall be realized and proven by the test stand.

The normalized average deviation of realized mass flow shall deviate by maximum 2 % compared to the corresponding target mass flow values as defined by the standard load pattern.

For calculation see section 7.3.3.

Preheating of boiler water. To enable the compilation of an energy balance between the initial and final state, the initial and final conditions shall be comparable. Thus, prior to and upon completion of testing the whole test setup (= system boundary) including boiler water shall be heated up to 45 °C for conventional boilers and to 25 °C for condensing boilers. A suitable heating device (e. g. electrical heating cartridge or hot water storage tank) should be used for this purpose. The procedure is described in section 6.3.

Determination of auxiliary electric energy supply. The auxiliary electric energy required by the boiler, e. g. for ignition, forced draught fan or fuel supply is also determined. Additionally, the electricity demand of any boiler-installed circulation pump and/or external feeding system (e. g. fuel supply container for wood chips) shall be recorded separately in order to allow for corrections of the measured total electricity requirement and achieve compatible results for different boiler types (see section 4.7).

4.6 Flue gas measuring section

The inner diameter at the entrance to the flue gas measuring section shall correspond to the outside diameter of the flue gas socket of the boiler system, as required by EN 304:2018 [3]. The flue gas duct shall be connected in compliance with the requirement to avoid frictional connections from the balance, in accordance with section 4.2⁴. Examples for measuring sections are shown by Figure 5.

⁴ Pre-tests showed that a temperature-resistant textile hose has proven to be an appropriate solution for this purpose.

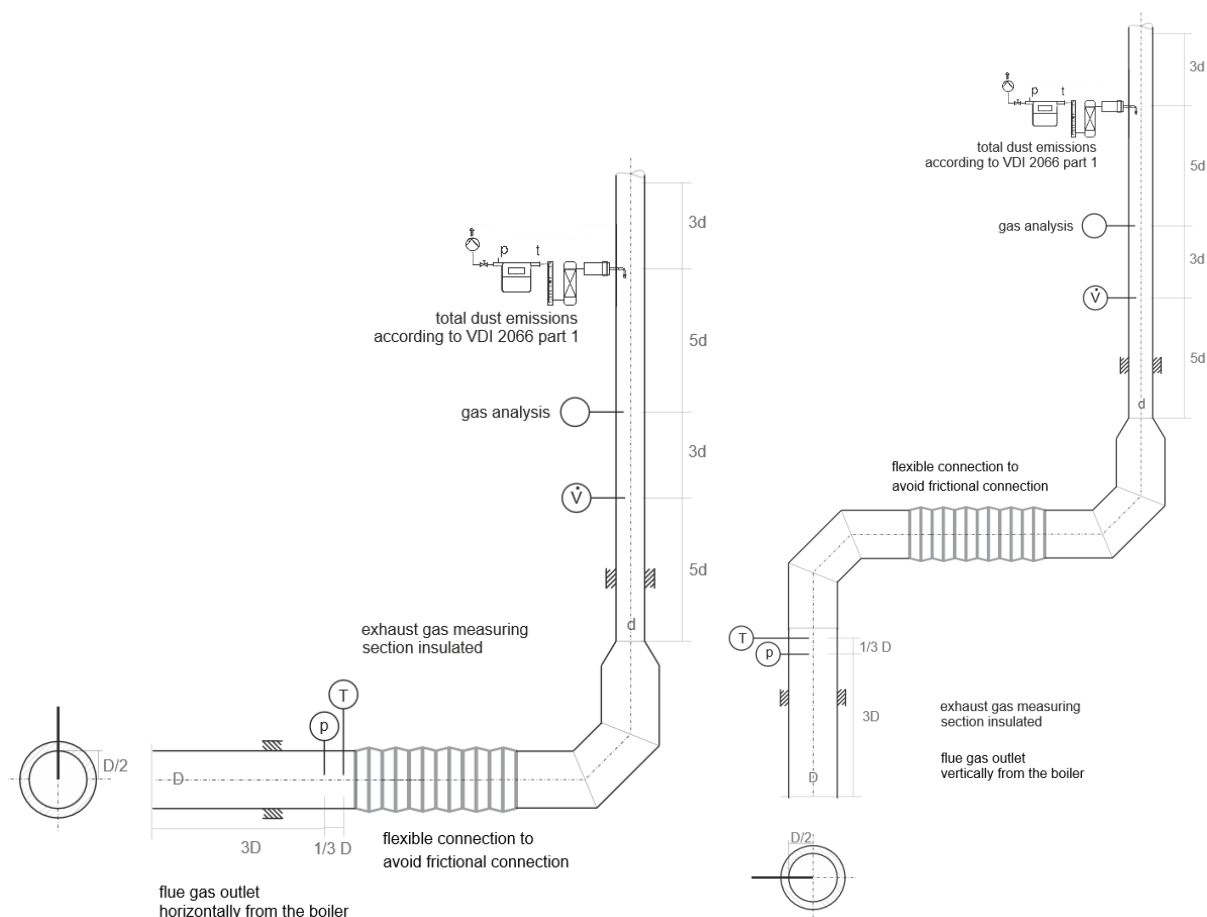


Figure 5: Examples for flue gas measuring section: Connection socket either at the back (left) or at the upper side (right) of the boiler. D = diameter of connection socket, d = diameter of measuring section, p = chimney draught, T = flue gas temperature, \dot{V} = flue gas volume flow.

It may be necessary to reduce the diameter of the measuring section (i. e. below the diameter of the boiler's flue gas socket) in order to increase the velocity of the flue gas flow and thus to achieve a better accuracy of flow meter measurements. Such tapering however shall not cause any hindrance for the easy installation and disassembly of the particle sampling units and other measuring devices (e. g. flow rate measuring instruments). No measurements by way of extraction shall be taken upstream of the measuring point for the determination of the volume flow rate since this would affect the measurement of flue gas flows⁵. The flue gas measuring section should be completely encased for insulation with a 40 mm layer of mineral fibre material (thermal conductivity: 0.035 W/(m·K)) or similar materials. The connecting piece should be encased with the same thermal insulation material as used for the measurement section.

For the determination of the chimney draught a pipe with an inner diameter of 6 mm should be inserted in the flue gas measuring section, as specified under EN 304:2018 [3]. Controls

⁵ An extraction of flue gas would reduce the volume flow of the remaining gas in the measuring section and would lead to wrong results.

for the adjustment of the draught system should be installed in order to maintain a constant chimney draught (e. g. exhaust fan controls). The chimney draught at the measuring point shall be set according to the boiler manufacturer's specifications. If corresponding specifications are not available, the required chimney draught shall be specified according to EN 303-5:2021 [1].

The chimney draught shall be controlled during the complete Load Cycle Test. The actual chimney draught should not vary by more than max. ± 3 Pa on average from the rated value specified according to EN 303-5:2021 [1].

Flue gas temperature shall be determined continuously in accordance with EN 304:2018 [3].

Flue gas volume flow rate can be measured directly, or alternatively be determined by measuring flue gas velocity and calculating the nominal volume flow rate. Depending on the applied device the measurement of flue gas temperature and atmospheric pressure, as well as other values at the point of measurement, may additionally be considered to enable the determination of the standard volume flow (in m³/h). It shall be ensured that the selected test equipment is applicable to determine flue gas velocity as low as 0.5 m/s and that the utilized equipment fulfils the accuracy requirements in accordance with section 4.7 also during operational conditions with very low flue gas velocity.

The analysis of the flue gas components CO, O₂, CO₂, H₂O, NO_x and OGC (organic gaseous carbon) shall be performed continuously. For data evaluation the OGC values shall be converted to C1 equivalent values, corresponding to DIN EN 12619:2013 [4]⁶.

⁶ Conversion and reporting of C1 values are essential to provide the data in a correct format for uniform data evaluation.

Carbon Balance Criterion:

The total deviation of all carbon input to all carbon output shall not exceed 5 % in each Load Cycle Test.

The total carbon which is released to the gas phase or is remaining as residue in the ash shall be equal to the total carbon input via the fuel. Deviations are due to inaccuracies along the measurement process. In order to assess the overall accuracy and data quality of each Load Cycle Test a carbon balance calculation is introduced as a novel quality criterion.

Several individual measurement parameters contribute to the total deviation from a perfect carbon balance. These parameters are fuel analysis (carbon and moisture content), fuel consumption, flue gas analysis (CO₂, CO, OGC, H₂O), flue gas volume flow and temperature. Other minor parameters can be neglected: inorganic and unburnt carbon in the ash residues and inorganic and unburnt carbon in particle emissions.

The equation for calculating the carbon balance is given in section 7.3.2.

The volume flow extracted for PM sampling shall be proportionally (preferably in an isokinetic way) controlled in relation to the nominal flue gas volumetric flow rate throughout the whole of the measuring cycle. Continuous sampling can be performed through alternating operations of two PM sampling devices arranged in tandem. If only one sampling unit is available, and the load threshold of the filtration medium has been exceeded, it is also possible to perform a quick change of filtration media during phases of constant boiler operation. In this case periods of interruption may not exceed 4 % in total of the overall sampling duration. The PM sampling installation shall be configured in accordance with VDI 2066-1 [5] or EN 13284-1 [6]; i. e. the required sampling temperature is $(180 \pm 10) ^\circ\text{C}$. The same temperature⁷ shall also be applied for pre- and post-conditioning of filters. Drying shall be done over minimum 1 hour and desiccator cooling over minimum 8 hours.

The suction of PM samples is done at the centre of the cross-section of measurement section. If there is a lower limit for the volumes which can be extracted by the measuring device the minimum amount will be extracted continuously from this point forward. The selection of the appropriate nozzle diameter can be a useful measure to adapt to phases with higher or low flue gas velocity. If flue gas flow is below the measurement range of the used metering device, measurement shall be continued at the flue gas flow that corresponds to the threshold value of the device.

According to EN 13284-1 [6] the probe shall be rinsed once, i. e. after the Load Cycle Test is completed.

⁷ The sampling temperatures of OGC and particles shall be equal to prevent that any organic substances can be determined twice, i. e. in solid and in volatile phase.

4.7 Measuring accuracy

The applied measurement devices shall be selected in such way that the requirements concerning uncertainty of measurement (Table 2) are met.

The demand for electric power during start, stand-by and normal operations is to be determined in accordance with DIN EN 15456:2008 [7]. The boiler circulation pump (if installed, see 4.2 for hydraulic configuration) serves the heat distribution. Thus, the energy consumption of the circulation pump shall not be considered when determining the auxiliary electric power. Analogously the energy consumption for external feeding system (e. g. fuel supply container for wood chips) shall not be considered as auxiliary energy demand, too.

Table 2: *Maximum uncertainty of measurement of the test method.*

Measurement value	Unit	Max. uncertainty of measurement or range
Atmospheric pressure	mbar	± 10 mbar
Ambient temperature	$^{\circ}\text{C}$	± 1 K
Flue gas water vapour content	vol-%	± 0.5 vol-%
Flue gas temperature	$^{\circ}\text{C}$	± 1 K
Chimney draught (static pressure)	Pa	± 1 Pa
Flue gas volume flow	$\text{m}^3\text{stp/s}$	± 10 % for the lowest recorded value
Min. measurement range of flue gas velocity	m/s	max. 0.5 m/s
CO concentration	ppm	± 10 % of measured value but with a maximum of ± 10 ppm at a measuring range of 500 ppm; ± 45 ppm at a measuring range of 3,000 ppm
O ₂ and CO ₂ concentration	vol-%	± 5 % of measured value but max. ± 0.4 vol-%
NO _x concentration	ppm	± 5 % of measured value but maximum ± 15 ppm
OGC concentration	ppm	± 10 % of measured value but maximum ± 5 ppm
Particle concentration	mg/m^3	± 15 % of measured value but max. 10 mg/m^3
PM sampling gas volume flow		Suitable to fulfil the flue gas velocity requirement above
Fuel mass	kg	± 0.2 % of the total fuel consumption
Generated heat output	kW	± 1.5 % of measured value
Auxiliary electric power (active power)	W	± 1.0 % of measured value
Water volume of the boiler	L	± 1 %

5 Requirements on test fuel properties

5.1 Wood pellets

The properties of pellet fuels were defined according to ENplus certification [8] or within the ISO 17225-2 [26]. Further limitations are based on pre-tests during the development process of the Load Cycle Test method, see Table 3. The energy density (bulk density multiplied by net calorific value of the fuel may require an adaption of the boiler settings regarding fuel supply and fuel-to-air-ratio (depending on control strategy). This affects particularly the transient behaviour of the combustion appliance. Quality-related parameters (ash content, content of fines, K, Si) were defined to eliminate the fuel-related influence on the combustion process and the release of emissions.

Table 3: Properties of pellet test fuel, d = dry basis, ar = as received.

Parameter	Standard	Unit	Range of value
Diameter	ISO 17829:2016 [9]	mm	6 ± 0.5
Distribution of length	ISO 17829:2016 [9]	mm	$< 20 \text{ m-\%} \leq 10 \text{ mm}$
Ash content	ISO 18122:2015 [10]	w-%, d	0.2 ... 0.45
Moisture content	ISO 18134-1:2015 [11]	w-%, ar	5 ... 10
Mechanical durability	ISO 17831-1:2015 [12]	w-%, ar	≥ 99.0
Content of fines	ISO 18846:2016 [13]	w-%, ar	< 0.5
Ash deformation temperature (DT)	ISO 21404:2020 [14]	°C	$\geq 1,300$
Net calorific value	ISO 18125:2017 [15]	kWh/kg, ar	≥ 4.8
Bulk density	ISO 17828:2015 [16]	kg/m ³ , ar	660 ... 720
Particle density	ISO 18847:2016 [17]	kg/dm ³ , ar	$\geq 1,250$
Nitrogen content	ISO 16948:2015 [18]	w-%, d	≤ 0.15
Potassium content	ISO 16967:2015 [19]	mg/kg, d	≤ 500
Silicon content	ISO 16967:2015 [19]	mg/kg, d	≤ 300

5.2 Wood chips

The fuel quality of wood chips varies strongly depending on raw material and as-delivered condition. Thus, properties of the test fuels were further limited to reduce the effect on the combustion process. Basis for these limitations are combustion tests and a resulting sensitivity analysis.

*Table 4: Properties of wood chips test fuel, d = dry basis, ar = as received, *Particle size and moisture content shall be chosen by the boiler manufacturer.*

Parameter	Standard	Unit	Range
Origin and source	ISO 17225-1 [27]	-	1.1.3.2 and 1.2.1.2 (coniferous with bark) and 1.2.1.3 (Broad-leaf without bark) and 1.2.1.4 (coniferous without bark)
Particle size 1*	ISO 17225-4:2021 [25]	mm	P31s; additional requirement: $\leq 40 \text{ w-\%} < 16 \text{ mm}$
Particle size 2*	ISO 17225-4:2021 [25]	mm	P45s; additional requirement: $\leq 40 \text{ w-\%} < 31 \text{ mm}$
Content of fines	ISO 17827-2:2016 [28]	w-%, ar	≤ 5
Ash content	ISO 18122:2015 [10]	w-%, d	≤ 1.0
Moisture content 1*	ISO 18134-1:2015 [11]	w-%, ar	≥ 10 to ≤ 25
Moisture content 2*	ISO 18134-1:2015 [11]	w-%, ar	≥ 30 to ≤ 45
Nitrogen content	ISO 16948:2015 [18]	w-%, d	≤ 1.0
Net calorific value	ISO 18125:2017 [15]	kWh/kg, ar	≥ 4.7

* Particle size and moisture content shall be chosen by the boiler manufacturer.

5.3 Required fuel analysis data

The compilation of an energy balance requires additionally fuel analysis with regard to moisture content [11] and carbon and hydrogen content by way of CHN analysis [18].

6 Test procedure

6.1 Standard load pattern

During the Load Cycle Test the boiler's heat output shall follow a standard load pattern representing a varying heat demand. The Load Cycle Test is based on reference load profiles as provided by VDI 4655:2019 [20]. The standard load pattern is presented in Figure 6 whereby 100 % utilization of boiler capacity is equivalent to the nominal heat output of the boiler specified by the manufacturer.

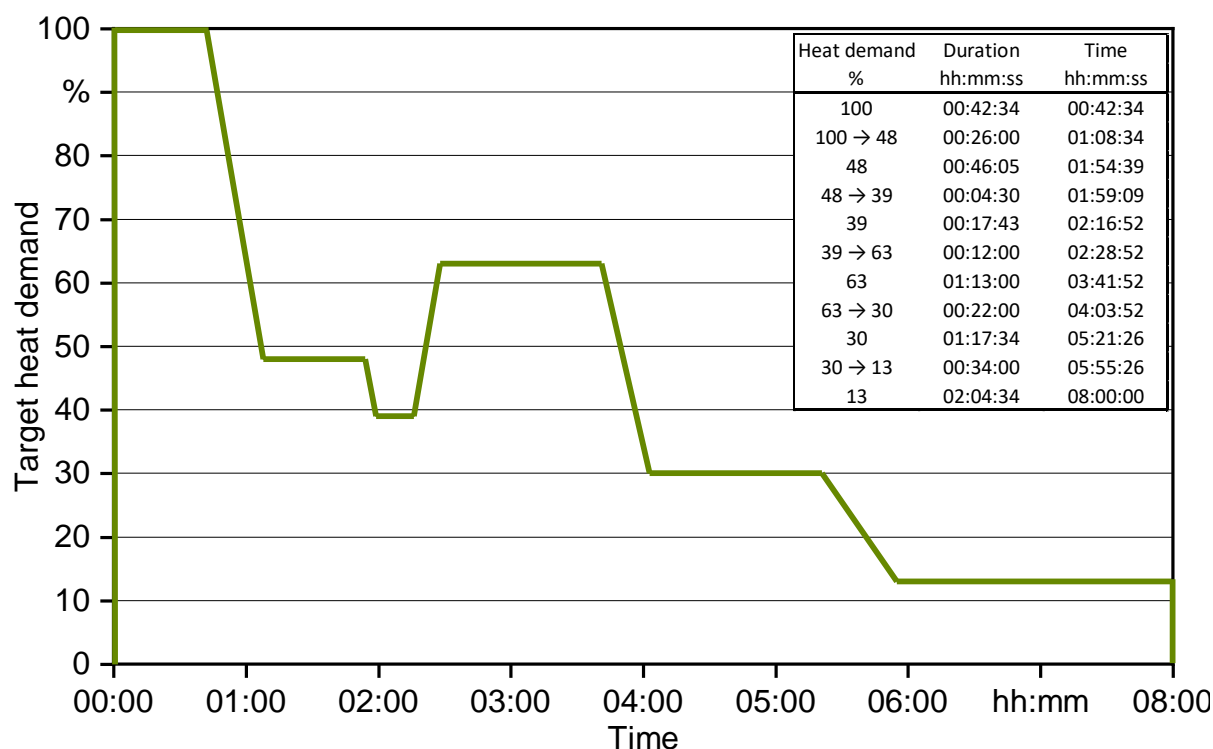


Figure 6: Standard load pattern of the Load Cycle Test method (without 12 hours of standby phase).

6.2 Boiler condition and settings

The type label shall indicate the nominal load of the boiler as declared by the manufacturer. The boiler shall be prepared according to the manufacturer's specification and the pre-use time of the boiler shall be minimum 20 hours before performing a Load Cycle Test. Prior to the Load Cycle Test boiler (grate, combustion chamber, and heat exchanger) shall not be cleaned to avoid resuspension of ash and residues⁸.

⁸ Some boilers are designed to use the formed bottom ash to seal the ash container and to use the formed grate ash to improve the ignition behaviour.

The heat exchanger of a condensing boiler shall be rinsed with fresh water prior to the test. To avoid differences in mass caused by refilling or evaporation care shall be taken that the filling level of any condensate containers is equal before and after the test. Determination of the amount of condensate is not necessary.

When performing the Load Cycle Test the boiler controls shall be set to set temperature of 70 °C (for conventional boilers) or 50 °C (for condensing boilers) (see section 4.5) or higher.

Setpoint Temperature Criterion

Flow temperature at boiler exit (T_{BF}) shall remain above the setpoint temperatures over a minimum of 60 % of the testing duration for all hydraulic configurations (i. e. directly connection, hydraulic separator, or accumulator storage tank).

Flow temperatures at boiler exit are:

- for conventional boilers: 70 °C
- for condensing boilers: 50 °C

For calculation see section 7.3.4.

The process of method development has shown that there is a considerable effect of specific control settings (hysteresis, shut down criteria as boiler temperature, flue gas temperature, inertia of control parameters, ...) on the transient behavior. The control settings shall be chosen by the manufacturer.

6.3 Procedure of the Load Cycle Test

The boiler should be tested in the condition and configuration as intended for normal use. Operating and assembly instructions shall be followed. All phases and associated times of the Load Cycle Test are defined in Table 5 and are visualized in Figure 7 and Figure 8.

Identical conditions for the initial and final state are a prerequisite for accurate weight measurements.

Reference temperature requirement

At the start of a test and at the end the reference temperature shall be:

- for conventional boilers: 45.0 °C
- for condensing boilers: 25.0 °C

The equations in section 7.3.1 define the tolerances in terms of reference temperature. The conformity with this requirement is relevant for energy and carbon balance.

Adjustment to start temperature: The water in the whole test system needs to be tempered to a temperature of 45.0 °C for conventional and 25.0 °C for condensing boilers with the assistance of an external source of heat. At the start time of the Load Cycle Test the circulation pump is switched on and by external heating the boiler is brought to a stable initial starting temperature (t_0), with both flow and return temperatures set at 45 °C/25 °C (in case of conventional boilers/condensing boilers). Measurements respectively data recording will be started at this point, at the latest. Practical trials have shown that a suitable starting and end point is achieved when the average of flow and return temperature is close to 45 °C (or 25 °C) and when the difference between flow and return temperature is below 0.5 K.

Start of load cycle operation: After the required chimney draught has been set by the regulated exhaust fan, the boiler is started simultaneously with the load cycle. Emission measurement and PM sampling shall begin at this point as well. During heat up phase of the boiler the external heating device shall be switched on until the boiler's heat production is higher than the test stands heat losses. Typically, the external heater can be switched off as soon as the flow temperature exceeds 55 °C for conventional or 35 °C for condensing boilers (i. e. 10 K above the initial state).

Load Cycle Operation: The heat output of the boiler shall follow the standard load pattern of the CycleTest method, according to the profile and the corresponding data given in Figure 6. Water mass flow and temperature spread both shall be set according to section 4.5. The measurement and gas sampling shall be continued during this phase without interruption, if possible, see section 4.6).

The cool-down phase: At the end of the load pattern the boiler is switched off (t_2) and heat transfer is continued until the flow temperature has declined to 55 °C for conventional or 35 °C for condensing boilers (t_4). Heat transfer of up to nominal heat output is acceptable. Subsequently, the circulation pump of the heat transfer system (HTS) is switched off.

Measurements of emissions (gaseous and particles) shall be continued until the boiler is in standby mode (t_3), which can either be determined by an appropriate message on the boiler's operation display or if the boiler stops its internal fan (which can also be identified if flue gas volume flow drops to a minimum).

Completion of testing: After 12 hours of standby phase (t_5) the boiler water needs to be tempered to 45 °C for conventional or 25 °C for condensing boilers, through further heating up or cooling down, before testing is completed (t_6). The determination of mass at this state is required to close mass and energy balance. Finally, the cleaning process shall be started and residual ashes have to be removed.

Table 5: Definition of time intervals, testing conditions and sequence of test procedures under standard load cycle conditions.

Time interval	Testing conditions	Testing operation
t_0	Boiler temperature 45 °C/25 °C for conventional/condensing boiler	Start of boiler and load cycle
t_1	Flow temperature above 55 °C/35 °C for conventional/condensing boiler	Stop of external heating
t_2	End of load cycle, start of cool down phase	Transfer of usable heat at 100 % of nominal heat output
t_3	Boiler operation stopped	End of emission measurements
t_4	Flow temperature below 55 °C/35 °C for conventional/condensing boiler	Termination of heat transfer, determination of heat loss
t_5	End of 12 hour standby-phase	Activation of heat transfer for temperature equalization
t_6	Boiler temperature 45 °C/25 °C for conventional/condensing boiler	End of testing

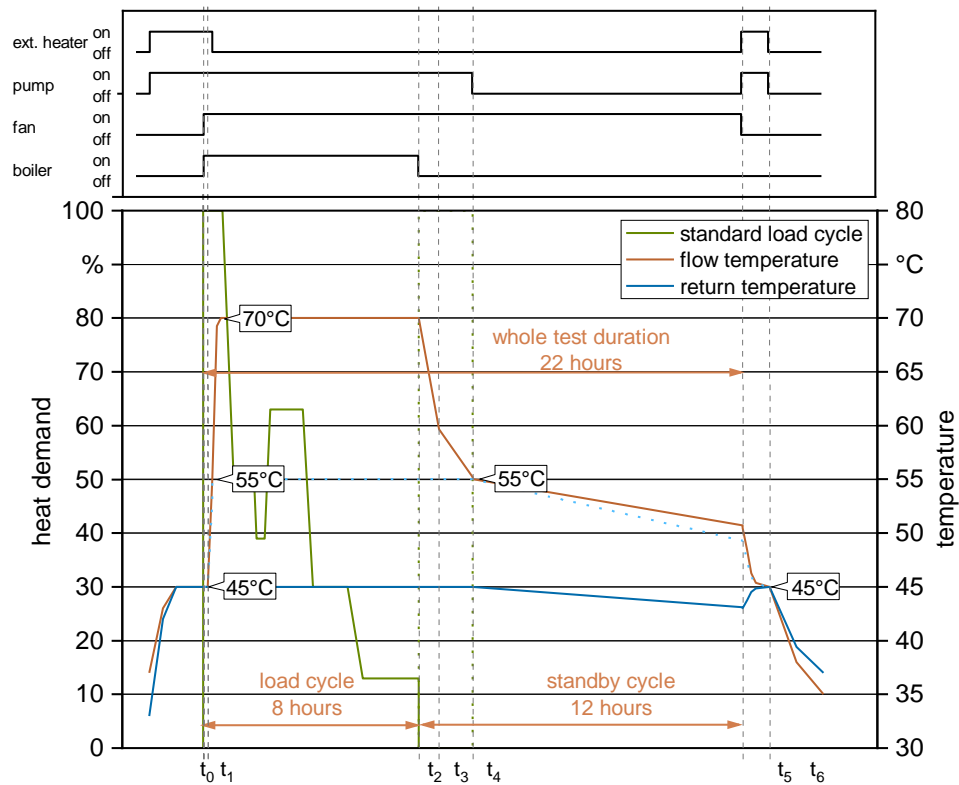


Figure 7: Flowchart of test sequences during a Standard Load Cycle Test for a conventional boiler.

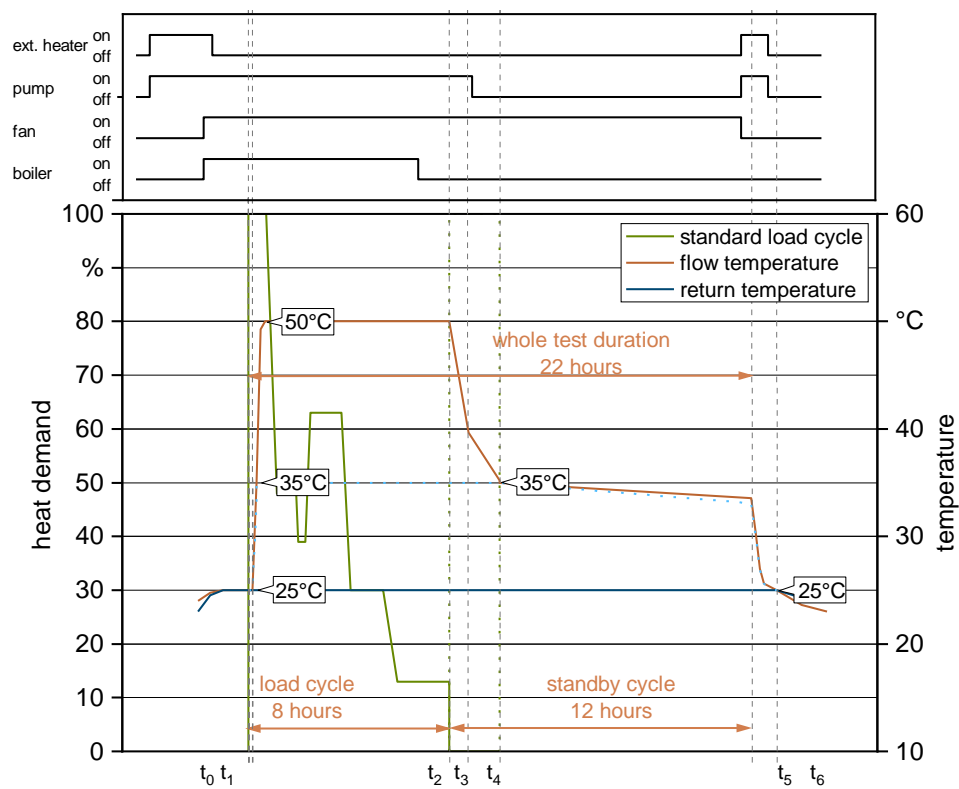


Figure 8: Flowchart of test sequences during a Standard Load Cycle Test for a condensing boiler.

6.4 Data acquisition

At least the following measurement values shall be logged/recorded.

Continuous data recording. The following parameters shall be recorded in maximum intervals of 10 s and recorded as mean values at maximum intervals of 30 s and the time intervals are to be chosen in such a way that fluctuations in the measured values are recorded with sufficient accuracy:

- Date and time in DD.MM.YYYY hh:mm:ss
- Flue gas composition:
 - Oxygen content – dry flue gas
 - Carbon dioxide content – dry flue gas
 - Moisture content – flue gas
 - Carbon monoxide content – dry flue gas
 - Nitrogen oxides content – dry flue gas
 - C1 equivalent of OGC – moist flue gas
- Flow and return temperature at boiler (if directly connected)
- Flow and return temperature of heat transfer system (when hydraulic separator or accumulator storage tank is installed)
- Mass flow rate of water of heat transfer system
- Flue gas temperature
- Standard volume flow of moist flue gas
- Chimney draught
- Fuel balance (with or without boiler or fuel supply container)
- Heat output
- Auxiliary electric power
- Auxiliary electric power of circulation pump if installed in boiler
- Ambient temperature

Individual data documentation:

- Atmospheric pressure
- PM emission in flue gas (no reference value for oxygen specified)

-
- Nominal heat output of boiler (according to type label)
 - Used water volume of accumulator storage tank (if applied)
 - Lower limit of PM sampling volume flow rate⁹

If the provided evaluation software for Load Cycle Test is applied the units of the above parameters are specified.

⁹ The lower limit is determined by either of two devices: the velocity determination or the lowest possible volume flow rate of the sampling pump. Select the highest of both which shall always be below the required 0.5 m/s (in consideration of temperature range, diameter of nozzle and measuring section)

7 Data evaluation and calculations

Due to the dynamic nature of the Load Cycle Test method the data evaluation is more complex compared to the evaluation of a combustion test conducted at stationary conditions. The method defines several relevant points in time, which are used to define the evaluation periods. These time points are described in section 6.3. Different time intervals are considered for evaluation. Overall, the evaluation includes the calculation of results and computation of quality criteria, which provide information to rate the quality of the measurement. The evaluation itself is performed by importing the logged measurement data into the evaluation software (tool, see section 7.4).

7.1 Determination of heat output and boiler efficiency

7.1.1 Determination of fuel mass and fuel energy input

The amount of the consumed fuel (m_{fuel}) is calculated based on the change in mass (difference in the total mass, as received, on the balance between the start of the test and the end of the test). To exclude the influence of the change of the density of the boiler water the boiler shall be tempered prior and after the test (see section 7.3.1, reference temperature).

Setup A) Fuel supply container on balance

$m_{\text{fuel}} = m_{t_0} - m_{t_6}$	in kg	1
---------------------------------------	-------	---

m_{fuel} Mass of fuel consumed in kg

m_{t_0} Mass of fuel supply container at t_0 in kg

m_{t_6} Mass of fuel supply container at t_6 in kg

Setup B) Boiler on balance

When the boiler is installed on a balance it is assumed that the formed ash remains in the boiler. Thus, the determined amount of consumed fuel shall be corrected.

$m_{\text{fuel}} = \frac{m_{t_0} - m_{t_6}}{1 - a \cdot (1 - M)}$	in kg	2
---	-------	---

m_{fuel} Mass of fuel consumed in kg ar

m_{t_0} Mass of fuel supply container at t_0 in kg

m_{t_6} Mass of fuel supply container at t_6 in kg

a Ash content of the fuel in kg/kg d

M Moisture content of fuel in kg/kg ar

Energy supply in the form of fuel (Q_{fuel})

The fuel energy input during the complete test period is calculated based on the mass of the fuel consumed and the net calorific value of the fuel (ar).

$Q_{\text{fuel,NCV}} = m_{\text{fuel}} \cdot \text{NCV}_{\text{ar}}$	in kJ	3
$Q_{\text{fuel,GCV}} = m_{\text{fuel}} \cdot \text{GCV}_{\text{ar}}$	in kJ	4

- NCV_{ar} Net Calorific Value of fuel as received in kJ/kg
- GCV_{ar} Gross Calorific Value of fuel as received in kJ/kg

Based on the net calorific value (NCV), the moisture content of the fuel as received and the hydrogen content from the lab analysis of the dry fuel the gross calorific value (GCV) can be calculated according to the following equation:

$\text{GCV}_{\text{ar}} = \text{NCV}_{\text{ar}} + \frac{r \cdot 9 \cdot H}{1 - M} + r \cdot M$	in kJ/kg	5
---	----------	---

- NCV_{ar} Net Calorific Value of fuel in kJ/kg ar
- r Heat of evaporation of water; 2.442 kJ/kg
- H Hydrogen content of fuel in kg/kg d
- M Moisture content of fuel in kg/kg ar

7.1.2 Determination of heat output

The usable heat output delivered to the heat transfer system (HTS) is determined by measuring the mass flow of water circulated in the boiler circuit and its temperature increase.

$P_{\text{HTS}} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \cdot C_{p_{\text{m,H}_2\text{O}}} \cdot (T_{\text{F}} - T_{\text{R}})$	in kW	6
$Q_{\text{heat}} = \sum_{t_0}^{t_6} (P_{\text{HTS}} \cdot \Delta t)$	in kJ	7

- $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$ Mass flow of water in kg/s
- $C_{p_{\text{m,H}_2\text{O}}}$ Average specific heat capacity over temperature range from T_{R} to T_{F} in kJ/(kg·K)
- T_{F} Exit temperature of water (flow temperature) in °C
- T_{R} Temperature of water on cold side (return temperature) in °C
- P_{HTS} Power to water released measured at the heat transfer system (HTS) in kW
- Δt Duration of time step of recording in s

7.1.3 Calculation of nominal annual efficiency (η_{NEA})

Efficiency. The boiler efficiency in the load cycle operation is calculated as the ratio of energy provided by the hydraulic system and the energy provided as fuel based on its lower heating value. The nominal annual efficiency is then related to the sum of energy supplied as fuel and as auxiliary electric energy consumed. To close the energy balance, the whole test setup including the boiler shall have the same temperature at the beginning and in the end of the Load Cycle Test (= reference temperature, see section 6.3).

Time interval from t_0 to t_6 : Determination of efficiency: Mass and energy balance are considered from t_0 to t_6 whereby auxiliary electric energy is only considered during boiler operation and standby, i. e. from t_0 to t_5 .

The auxiliary electric energy required by the boiler, e. g. for ignition, forced draught fan or fuel supply is the product of the measured supply of power and the corresponding time interval from t_0 to t_5 . Electric power demand for circulation pumps is not taken into consideration.

$$W_{el} = \sum_{t_0}^{t_5} (P_{el} - P_{e,cp}) \cdot \Delta t \quad \text{in kJ} \quad 8$$

- W_{el} Auxiliary electric energy in kJ
- P_{el} Measured supply of electric power for operation of the boiler in kW
- $P_{e,cp}$ Measured supply of electric power of circulation pump in kW
- Δt Duration of time step of recording in s

Nominal annual efficiency is calculated on the basis of energy transferred by the water and energy stored in the boiler, as well as energy supplied by fuel and auxiliary electric energy.

$$\eta_{NAE,G} = \frac{Q_{heat}}{Q_{fuel,GCV} + W_{el}} \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad 9$$

- $\eta_{NAE,G}$ Nominal annual efficiency of the boiler in % (based on GCV)

$$\eta_{NAE,N} = \frac{Q_{heat}}{Q_{fuel,NCV} + W_{el}} \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad 10$$

- $\eta_{NAE,N}$ Nominal annual efficiency of the boiler in % (based on NCV)

7.2 Determination of emission factors

Due to dynamic boiler operation and the resulting variation in flue gas volume, emission values cannot be stated as simple average values. They shall be determined as momentary mass flows in relation to flue gas volume flow, based on which the overall mass flow

is then aggregated for the complete evaluation period. For the calculation of nominal annual emission factors, the overall mass flow of the measured gaseous components and particle emissions are related to the total amount of energy supplied by the fuel.

Time interval from t_0 to t_3 : Determination of Emissions: Only considered during time of potential boiler operation, this is from t_0 to t_3 .

7.2.1 Calculation of aggregated emission load over the Load Cycle (m_{EM})

The emission release is calculated by multiplying the pollutant concentration with the flue gas volume flow, the density of the pollutant at standard temperature and pressure (STP) and the duration of each time interval. CO and NO_x are determined through measurement of the flow of dry flue gas. As the volume flow is determined based on wet flue gas, the values shall be converted from dry STP into wet STP conditions by the factor $(1-w_{fg})$.

$$m_{EM} = \sum_{t_0}^{t_3} \frac{c_{Em}}{1000000} \cdot \rho_{Em,STP} \cdot \dot{V}_{fg,STP} \cdot (1 - w_{fg}) \cdot \Delta t \quad \text{in kg} \quad 11$$

- c_{Em} Concentration of emission in ppm (CO, NO_x)
- $\rho_{Em,STP}$ Density of gases emitted under standard testing conditions in kg/m³
- w_{fg} Water vapour content of flue gas in m³/m³
- $\dot{V}_{fg,STP}$ Flue gas volume flow at standard temperature (273 K) and pressure (1.013 bar) in m³/s
- Δt Duration of time step of recording in s

The gas densities (STP conditions) are:

Com- pound	O ₂	CO ₂	H ₂ O	CO	NO _x	SO ₂	OGC
ρ in kg/m ³	1.429	1.977	0.803	1.251	2.054	2.857	0.536

Multiplication with the factor $(1-w_{fg})$ is not required for gaseous organic carbon, as measurements are taken from the flow of moist flue gas.

$$m_{OGC} = \sum_{t_0}^{t_3} \frac{c_{OGC}}{1000000} \cdot \rho_{OGC,STP} \cdot \dot{V}_{fg,STP} \cdot \Delta t \quad \text{in kg} \quad 12$$

- c_{OGC} Concentration of gaseous organic carbon in ppm
- $\rho_{OGC,STP}$ Density of gaseous carbon under standard testing conditions in kg/m³
- $\dot{V}_{fg,STP}$ Flue gas volume flow under standard temperature (273 K) and pressure (1.013 bar) in m³/s
- Δt Duration of time step of recording in s

Total particulate matter (PM) emissions are already determined as mass concentration. The calculation follows equation 13. All PM filters and the corresponding sampled volume are considered. As PM sampling is conducted based on dry flue gas the values shall be converted into wet STP conditions by the factor $(1-w_{fg})$.

$m_{PM} = c_{PM} \cdot (1 - w_{fg}) \cdot \dot{V}_{fg,STP} \cdot \Delta t$	in kg	13
--	-------	----

- c_{PM} Emission of particulate matter in kg/m^3
- w_{fg} Water content of flue gas in m^3/m^3
- $\dot{V}_{fg,STP}$ Flue gas volume flow under standard temperature (273 K) and pressure (1.013 bar) in m^3/s
- Δt Duration of time step of recording in s

7.2.2 Calculation nominal annual emission factors (NAEF)

The nominal annual emission factors (NAEF) are easy applicable key results which illustrate the annual boiler emission. These NAEF indicate the real-life-related performance parameter. They are determined for all measured pollutants (CO, NO_x , PM, and OGC) and are denominated as CO_{NAEF} , NO_{xNAEF} , PM_{NAEF} , and OGC_{NAEF} . In the calculation the emission loads are divided by the fuel energy input (based on net calorific value, NCV).

$Em_{NAEF} = \frac{m_{Em}}{Q_{fuel,NCV}}$	in kg/TJ	14
---	----------	----

- Em_{NAEF} Nominal annual mission factor of each of the measured pollutant (CO, NO_x , PM, OGC) in kg/TJ
- m_{Em} Determined total mass measured pollutant emission (CO, NO_x , PM, OGC) during the Load Cycle Test in kg
- $Q_{fuel,NCV}$ Energy supply in the form of fuel related to net calorific value (NCV) in TJ

7.3 Assessment of data quality

Several indicators are used to rate/assess the quality of the test. These indicators include not only criteria that describe the boiler performance but also criteria for assessing the testing infrastructure.

7.3.1 Reference temperature requirements

Identical conditions for the initial and final state are a prerequisite for accurate weight measurements. To fulfil this prerequisite the system temperature shall be at reference temperature of either 45 °C for conventional or 25 °C for condensing boilers (see section 6.3). Compliance with this requirement is determined by considering flow and return temperature before (t_0) and after (t_6) the test. The calculation is done according to equation 14 and equation 15. The requirements are described in equation 16 and 17.

$T_{\text{avg}} = \frac{T_{F,t_0} + T_{R,t_0} + T_{F,t_6} + T_{R,t_6}}{4}$	in °C	15
$\Delta T_{\text{dev}} = \frac{ T_{F,t_0} - T_{\text{avg}} + T_{R,t_0} - T_{\text{avg}} + T_{F,t_6} - T_{\text{avg}} + T_{R,t_6} - T_{\text{avg}} }{4}$	in K	16

- T_F Flow temperature of water in °C
- T_R Return temperature of water in °C
- T_{avg} Average water temperature of test stand setup in °C
- ΔT_{dev} Average difference of deviations of water temperature of test stand setup in K
- T_{ref} Reference temperature according to method: 45 °C or 25 °C

The following two requirements for these values are shown below:

Absolute reference temperature criterion:

$$|T_{\text{avg}} - T_{\text{ref}}| \leq 0.25 \text{ K}$$

Relative reference temperature criterion:

$$\Delta T_{\text{dev}} \leq 0.50 \text{ K}$$

7.3.2 Carbon balance criterion

This criterion is the balance of the mass of carbon supplied by fuel towards the mass of carbon released throughout the flue gas pipe. It is calculated on the basis of the quotient of the sum of carbon in CO₂, CO and OGC released and the total carbon supplied in the form of fuel. It is a good indicator for the quality of measurement, because it combines several measurement parameters, including elemental analysis of fuel.

The carbon balance is based on flue gas volume flow and flue gas analysis over the period from t_0 to t_3 and fuel consumption determined over the period from t_0 to t_6 .

$$\Delta C = \left(\frac{\left(\frac{m_{CO_2}}{\rho_{CO_2}} + \frac{m_{CO}}{\rho_{CO}} \right) \cdot \rho_{OGC} + m_{OGC}}{m_{fuel} \cdot C \cdot (1 - M)} - 1 \right) \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad 17$$

- m_{CO_2} Mass of carbon dioxide released during whole test in kg
- m_{CO} Mass of carbon monoxide released during whole test (see section 7.2.1) in kg
- m_{OGC} Mass of gaseous organic carbon released during whole test (see section 7.2.1) in kg
- m_{fuel} Mass of consumed fuel (see section 7.1.2) in kg
- C Carbon content of the fuel in kg/kg d
- M Moisture content of the fuel in kg/kg ar

This criterion shall fulfil the following specification:

$$|\Delta C| \leq 5 \%$$

7.3.3 Flow deviation criterion

This criterion is used to rate the performance of the heat transfer system. It is a value which describes the proportionality of the water mass flow dynamics towards the variations in the standard load pattern (SLP).

The criterion is evaluated by the average value of the deviations in mass flow from the set value. It is calculated for each time increment as absolute value of the deviation of actual water mass flow to the set value during the standard load pattern between t_0 and t_2 .

$$\Delta \dot{m} = \left| \frac{\dot{m}_{H_2O} - \dot{m}_{H_2O,SLP}}{\dot{m}_{H_2O,Nom}} \right| \cdot 100 \quad \text{in \%} \quad 18$$

- \dot{m}_{H_2O} Actual water mass flow through heat transfer system in kg/s
- $\dot{m}_{H_2O,SLP}$ Set value of water mass flow from the standard load pattern (SLP) in kg/s
- $\dot{m}_{H_2O,Nom}$ Water mass flow at nominal heat output in kg/s

This criterion shall fulfil the following specification:

$$|\Delta \dot{m}| < 2 \%$$

7.3.4 Setpoint temperature criterion

The time portion of the total time in which the minimum target temperature is met is expressed by the setpoint temperature criterion. Thus, the boiler control set values shall be chosen in such a way that during 60 % of the time during standard load pattern (from t_0 to t_2) the flow temperature is at a minimum temperature of 70 °C, in case of condensing boiler at a minimum temperature of 50 °C.

This criterion shall fulfil the following specification:

$$T_{SP} > 60 \%$$

7.3.5 General requirements

Draught variation

The setpoint for chimney draught (p_{SP}) shall be specified by the manufacturer. The average value over the whole measurement from t_0 to t_5 , and an average value of the deviation are determined. The deviation of the chimney draught from the set value (see section 4.6) is calculated according to equation 19 and the standard deviation is determined.

$\Delta p = p_{\text{chimney}} - p_{\text{chimney,avg}} $	in Pa	19
--	-------	----

- p_{chimney} Actual chimney draught in Pa
- $p_{\text{chimney,avg}}$ Set value of chimney draught in Pa

The following two performance requirements shall be met:

Chimney draught setpoint deviation:

$$|p_{\text{chimney,avg}} - p_{SP}| \leq 3 \text{ Pa}$$

Chimney draught standard deviation:

$$|SD_{\text{dev}}| \leq 3 \text{ Pa}$$

Ambient temperature changes

This requirement defines the tolerable changes in ambient temperature (see section 4.1). It consists of an average value over the whole measurement from t_0 to t_5 , and an average value of the deviation (equation 20).

$\Delta T_{\text{amb}} = T_{\text{amb}} - T_{\text{amb,avg}} $	in °C	20
---	-------	----

- T_{amb} Actual ambient temperature in °C
- $T_{\text{amb,avg}}$ Mean value of ambient temperature in °C

The Load Cycle Test shall be performed in the following ambient temperature range:

$15\text{ °C} \leq T_{\text{amb,avg}} \leq 30\text{ °C}$
--

PM sampling: tolerable interruptions

The aggregated period of interruptions between sequential PM samplings may not exceed 4 % of the overall sampling duration.

7.4 Evaluation of measurements using the evaluation software

Analysis of the measurement data is performed automatically using the evaluation software. This software operates based on MS Excel and Visual Basic, with only a few operating procedures being required.

7.4.1 Interpolation of data points

In order to be able to evaluate the actual points in time (t_0 to t_5) of the evaluation cycle the values for these points in time must be calculated through linear interpolation.

7.4.2 Preparation for the evaluation

In order to be able to perform the analysis of data the measurement values must be available in form of a table that can be opened in MS Excel (e. g. .csv, .asc, .xls, ...).

Following data is required and must be entered in the table for evaluation tool in section 7.4.3.

- Date + time in d
- Oxygen content – flue gas in vol-%
- Carbon dioxide content – flue gas in vol-%

- Moisture content – flue gas in vol-%
- Carbon monoxide content – flue gas in ppm
- Nitrogen oxides content – flue gas in ppm
- optional: sulphur dioxide – flue gas in ppm
- OGC (C1 equivalent) – wet flue gas in ppm
- Flow temperature in °C
- Return temperature in °C
- Flue gas temperature in °C
- Fuel scale (with or without boiler) in kg
- Water heat output in kW
- Water mass flow rate in kg/min
- Standard volume flow – wet flue gas in m³/h
- Auxiliary electric power consumption in W

If an accumulator storage tank or a hydraulic separator is installed additional channels are necessary:

- Flow temperature in boiler circuit in °C
- Return temperature of boiler circuit in °C
- Electric power consumption of circulation pump in W

The following data can be entered continuously or in form of single values for the purpose of evaluation:

- Ambient temperature in °C
- Air pressure in mbar

The following channel can either entered as continuous values or as a list of values

- Total particle emission in flue gas in mg/m³

Missing columns should be added (if required), e. g.

- In the case of separate recording of date and time: Insertion of one column giving the sum of date and time (simple addition: value = “date” + “time”)
- In the case of measurements supplied in a different format, data must be converted to the required unit (attention must be paid that the new column can be recognized in the header)

The table must furthermore indicate references to the channels in the first row, so that appropriate allocations can be made in the evaluation process.

7.4.3 Excel evaluation tool

An excel evaluation tool was created during the research phase of the method development by BEST. Upon request, it could probably be made available (Currently only in German language).

8 Test report

The following documents and information shall be handed over to the test institute:

- installation and operating manual as well as other relevant documents of the manufacturer,
- relevant settings for test stand: draught, minimum return temperature,
- relevant settings for boiler: boiler temperature, configuration of control system, configuration of accumulator storage tank.

The reporting shall be issued based on EN ISO/IEC 17025 [21] requirements. The test report shall include at least:

- a) Name and address of the test laboratory, name of test engineer, and the location where the tests have been conducted,
- b) Identification number of test report,
- c) Identification of the boiler (name, type, nominal heat output),
- d) Name and address of manufacturer,
- e) Picture of boiler on test stand,
- f) Note if an accumulator storage was used and give the volume if applicable,
- g) Note which setup was used (with or without hydraulic separator),
- h) Mode of determination of fuel consumption (boiler or fuel supply container positioned on a scale?),
- i) Specification of test fuel: moisture content, GCV, NCV, CHN analysis and ash content
- j) For wood chips: chosen particle size (Table 4),
- k) Date of testing,
- l) Results concerning data quality and test performance
 - a. Reference temperature requirement
 - b. Carbon balance criterion
 - c. Dynamic mass flow criterion
 - d. Setpoint temperature criterion
- m) Results with indication of the unit:
 - a. Nominal annual efficiency in % related to GCV and NCV.
 - b. Auxiliary energy consumption of total energy input (related to GCV and NCV) in % and in kWh
 - c. Nominal annual emission factors (CO, NO_x, OGC, PM) in mg/MJ related to GCV and NCV,

- n) Any deviation from the requirements from this handbook that occurred during the test shall be documented.

The test report shall be signed by the head of the test station or the test engineer responsible for carrying out the test.

Literature

- [1] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2018): DIN EN ENTWURF 303-5: Heating boilers - Part 5: Heating boilers for solid fuels, manually and automatically stoked, nominal heat output of up to 500 kW - Terminology, requirements, testing and marking; German version EN 303-5:2021-09, prEN 303-5:2018; Mai 2018. Berlin: Beuth, 195 pages
- [2] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (1990): DIN 1343: Reference conditions, normal conditions, normal volume; concepts and values; German version EN 303-5:2021-09. Berlin: Beuth
- [3] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2018): DIN EN 304: Heating boilers - Test code for heating boilers for atomizing oil burners; German Version DIN 1343:1990. Berlin: Beuth, 54 pages
- [4] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2013): DIN EN 12619: Stationary source emissions - Determination of the mass concentration of total gaseous organic carbon - Continuous flame ionisation detector method; German Version EN 12619/2013. Berlin: Beuth, 23 pages
- [5] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (2006): VDI 2066: Particulate matter measurement - Dust measurement in flowing gases - Part 1: Gravimetric determination of dust load. 2006-11. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 111 pages
- [6] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2018): DIN EN 13281-1: Stationary source emissions - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: Manual gravimetric method; German Version. Berlin: Beuth, 70 pages
- [7] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2008): DIN EN 15456: Heating boilers - Electrical consumption for heat generators - System boundaries - Measurements; German Version, Berlin: Beuth
- [8] DEUTSCHES PELLETINSTITUT GMBH (DEPI); PROPELLETS AUSTRIA; PROPELLETS.CH; EUROPEAN PELLET COUNCIL (2015): ENplus Qualitätszertifizierung für Holzpellets. ENplus-Handbuch für Deutschland, Österreich und die Schweiz. Version 3.0, August 2015. Gesamtausgabe. Berlin: Deutsches Pelletinstitut GmbH (DEPI), 100 Seiten.
- [9] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17829: Solid biofuels - Determination of length and diameter of pellets; German version, March 2016. Berlin: Beuth, 16 pages
- [10] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18122: Solid biofuels - Determination of ash content, March 2016. Berlin: Beuth, 14 pages
- [11] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 18134-1: Solid biomass - Determination of moisture content - Oven dry method - Part 1: Total moisture - Reference method, December 2015. Berlin: Beuth, 12 pages
- [12] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 17831-1: Solid biomass - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes; German version, May 2016. Berlin: Beuth, 16 pages

- [13] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18846: Solid bio-fuels - Determination of fines content in quantities of pellets; German version; December 2016. Berlin: Beuth, 12 pages
- [14] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2020): DIN EN ISO 21404: Solid bio-fuels - Determination of ash melting behaviour; German version; June 2020. Berlin: Beuth, 21 pages
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2017): DIN EN ISO 18125: Solid bio-fuels - Determination of calorific value; German version; August 2017. Berlin: Beuth, 67 pages
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17828: Solid bio-fuels - Determination of bulk density; German version, May 2016. Berlin: Beuth, 18 pages
- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 18847: Solid bio-fuels - Determination of particle density of pellets and briquettes; German version, December 2016. Berlin: Beuth, 18 pages
- [18] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16948: Solid bio-fuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen (ISO 16948:2015); German version; September 2015. Berlin: Beuth, 18 pages
- [19] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2015): DIN EN ISO 16967: Solid bio-fuels - Determination of major elements – Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na und Ti (ISO 16967:2015); German version; July 2015. Berlin: Beuth, 22 pages
- [20] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (VDI) (2019): VDI 4655: Reference load profiles of residential buildings for power, heat and domestic hot water as well as reference generation profiles for photovoltaik plants. 2019-09. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 36 pages
- [21] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2000): DIN EN ISO 17025: General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (ISO/CEI 17025:1999); German version; April 2000. Berlin: Beuth, 56 pages
- [22] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND BUNDESAMT FÜR JUSTIZ (2020): Gebäudeenergiegesetz. Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden vom 08.08.2020. 87 pages; <https://www.gesetze-im-internet.de/geg/GEG.pdf>
- [23] EUROPEAN UNION (2010): Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. Official Journal of the European Union. 18.06.2010. 23 pages
- [24] EUROPEAN UNION (2013): Commission Delegated Regulation (EU) No 812/2013 of 18 February 2013 supplementing Directive 2010/30/EU of the European Parliament and of the Council with regard to the energy labelling of water heaters, hot water storage tanks and packages of water heater and solar device. 18. February 2013, 54 pages
- [25] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2021): DIN EN ISO 17225-4: Solid biofuels - Fuel specification and classes - Part 4: Graded wood chips; German version, June 2021. Berlin: Beuth, 17 pages

-
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2021): DIN EN ISO 17225-2: Solid biofuels - Fuel specification and classes - Part 2: Graded wood pellets; German version, September 2021. Berlin: Beuth, 19 pages
 - [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (2021): DIN EN ISO 17225-1: Solid biofuels - Fuel specification and classes - Part 1: General requirements; German version, October 2021. Berlin: Beuth, 78 pages
 - [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E. V. (DIN) (2016): DIN EN ISO 17827-2. Solid biofuels - Determination of particle size distribution for uncompressed fuels - Part 2: Oscillating screen method using sieves with apertures of 3.15 mm and above. October 2016. Berlin: Beuth, 20 pages

