

Förderkennzeichen 2020-11

BioFit - Biomasse-Feuerung für die Zukunft fit machen

Abschlussbericht



Olaf Schäfer-Welsen, Uwe Vetter, David Bach
Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik
IPM in Freiburg

Projektpartner: Woco Industrietechnik GmbH

Projektunterstützung: Markgräfler Ofenbau, Hase
Kaminofenbau GmbH, OekoSolve AG

18.09.2023

Inhalt

1	<i>Projektüberblick</i>	4
1.1	Ausgangslage	4
1.2	Wissenschaftliche und technische Ziele	7
1.3	Herausforderungen/Chancen und Risiken des Vorhabens	8
2	<i>Projektbeschreibung</i>	10
2.1	Projekttablauf	10
2.1.1	Projektidee	10
2.1.2	Terminplan	10
2.2	Projektplanung	11
2.2.1	Ausführungsplanung	11
2.2.2	Übersicht Meilensteine und Projektziele nach Arbeitspaketen	15
2.3	Projektdurchführung	16
2.3.1	AP 1: Feinstaubabscheider	16
2.3.2	AP 2: Verbrennungsregelung	20
2.3.3	AP 3: Stromversorgung	20
2.3.4	AP 4: Gesamtsystemtests	22
3	<i>Betrachtung der Wirtschaftlichkeit/Ökologischer Nutzen</i>	25
4	<i>Übertragbarkeit der Projektergebnisse</i>	25
5	<i>Öffentlichkeitsarbeit</i>	26
6	<i>Zusammenfassung/Fazit</i>	26
7	<i>Anlage: Projekterkenntnisse</i>	28
8	<i>Anlage: Referenzen</i>	29

1 Projektüberblick

1.1 Ausgangslage

Als nachwachsender, regional verfügbarer und CO₂-neutraler Rohstoff (Abb. 1) liegt Holz in Zeiten des Klimawandels hoch im Kurs. Zahlreiche Privathaushalte, aber auch zunehmend viele Kommunen und Unternehmen greifen hierzulande auf die Energieversorgung mit Holz zurück. In der Oberrhein-region ist Holz der wichtigste erneuerbare Energieträger für die Wärmeerzeugung [1].

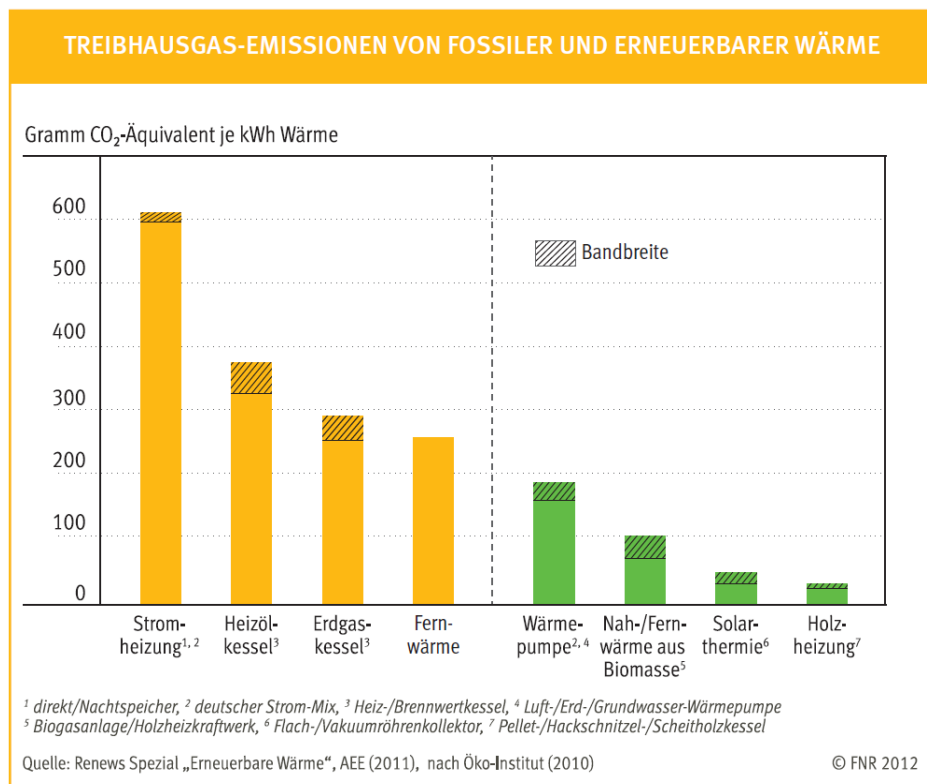


Abbildung 1: Treibhausgas-Emissionen von fossiler und erneuerbarer Wärme.

Der »CO₂-neutrale« Rohstoff verursacht jedoch bei der Verbrennung ohne technische Gegenmaßnahmen einen hohen Ausstoß an Feinstaub und an anderen gesundheitsbedenklichen, umweltschädlichen und krebserzeugenden Schadstoffen. Unter anderem deswegen ist in Stuttgart der Betrieb von Komfortkaminen bei Feinstaub-Alarm verboten. Kaum zu glauben, aber wahr: »Die Feinstaub-Emissionen aus kleinen Holzfeuerungsanlagen übersteigen in Deutschland mit etwa 24.000 Tonnen pro Jahr die Emissionen aus den Motoren von Lkw und Pkw.« [2] Hauptverursacher des hohen Schadstoff-Ausstoßes sind dabei vor allem ältere und emissionsstarke Einzelraumholzöfen. Zwar sanken die Emissionen aus neuen Holzfeuerungen durch gesetzliche Vorhaben der 1. BImSchV [3] in den letzten Jahren, dieser Effekt wurde jedoch durch die gestiegene Nutzung der Holzfeuerungen insgesamt teilweise kompensiert. Die Belastung durch Feinstaub aus Holzfeuerungen in Deutschland bewegt sich in den letzten Jahren daher auf einem mehr oder weniger gleichbleibend hohen Niveau [4].

In Deutschland gibt es derzeit rund 0,7 Millionen Heizkessel für feste Brennstoffe und etwa 11,7 Millionen so genannter Einzelraumfeuerungsanlagen wie Kamine oder Kachelöfen, die vor allem mit Holz befeuert werden. Diese Holzfeuerungen der Haushalte hatten im Jahr 2016 einen Anteil von 17 Prozent der deutschen PM_{2,5}-Emissionen (Partikel mit einem Durchmesser kleiner 2,5 µm) und einen Anteil von 9 Prozent an den deutschen PM₁₀-Emissionen (Partikel mit einem Durchmesser kleiner 10 µm) [4]. Holzfeuerungen setzen v. a. kleine Partikel frei [5-7]. Da die Masse eines Partikels mit der dritten Potenz seines Durchmessers steigt, tragen ultrafeine Partikel auch bei einer hohen Anzahlkonzentration nur wenig zur Massenkonzentration, die in der BImSchV limitiert werden, von Feinstaub bei. Diese Feinstpartikel sind jedoch hinsichtlich ihres gesundheitlichen Risikopotentials von großer Bedeutung. Eine Veröffentlichung aus dem Jahr 1997 sieht im Hinblick auf Atemwegserkrankungen eine bessere Korrelation mit der Anzahlkonzentration als mit der Massenkonzentration [8].

Entsprechende Technologien zur Reduzierung des Fein- und Ultrafeinstaubes für die Nachrüstung von Bestandsanlagen und als fester Bestandteil von Neuanlagen sind daher dringend erforderlich. Für eine Zertifizierung im Rahmen der 1. BImSchV ist neben der Einhaltung der massenbezogenen Staubemissionen auch eine Verbrennungsregelung erforderlich, um auch die CO-Emissionen dauerhaft gering zu halten und gleichzeitig einen hohen feuerungstechnischen Wirkungsgrad zu gewährleisten. Der Kaminofen der Zukunft sollte daher nicht nur CO₂-neutral und effizient sein, sondern auch „feinstaubfrei“ und minimale CO-Emissionen aufweisen.

Ab dem 22. März 2010 gelten neue Regelungen für Kaminöfen und Holzheizkessel (Novellierung der 1. BImSchV) [3]. Die 1. BImSchV enthält u.a. Grenzwerte für den Schadstoffausstoß, Vorgaben für die Überwachung und eine Sanierungsregelung für bestehende Anlagen. Hält eine Einzelraumfeuerung, die vor dem 22.03.2010 errichtet wurde, die Grenzwerte von 4 g/m³ CO und 0,15 g/m³ Staub nicht ein, ist sie mit einem Staubabscheider nachzurüsten oder auszutauschen. Der Austausch kann in vielen Fällen eine größere Investition für private Betreiber bedeuten.

Für die Nachrüstung existieren in Bezug auf die Staubemissionen bereits technische Lösungen am Markt. Meist kommen hier elektrostatische Partikelabscheider zum Einsatz, die nach dem Prinzip des Rohr-Elektro-Abscheiders funktionieren: Ein elektrisch geladener Draht oder Stab wird in die Mitte des Abgasrohrquerschnitts eingebracht und mit einer Spannung von 15 bis 33 kV beaufschlagt. Die Partikel werden beim Durchtritt durch das elektrische Feld zwischen zentraler Elektrode (Sprühelektrode) und Rohrwand elektrisch geladen. Das bewirkt, dass sich die Teilchen zur metallischen Rohrwand (Niederschlagselektrode) bewegen und ihre elektrische Ladung an sie abgeben. Zum Teil bleiben sie dort haften und/oder agglomerieren mit anderen Partikeln und können durch manuelles Reinigen mit der Bürste oder durch einen Rüttelmechanismus abgelöst werden.

Aktuelle, kommerzielle Abscheider zur Integration ins Abgasrohr sind typischerweise für Feuerungsleistungen im Bereich von 25 bis 70 kW erhältlich. Bei Befuerung schaltet sich das Gerät automatisch über einen Temperaturfühler ein.

Elektrostatische Abscheider werden auch deshalb bisher nur in sehr geringem Maße eingesetzt, weil unter realen Einsatzbedingungen noch vielerlei Probleme hinzukommen. Ein Hauptproblem stellt die starke Verschmutzung der Elektroden und Isolatoren dar, die zu häufigen Störungen und Kurzschlüssen führen. Für einen großflächigen, problemlosen Praxiseinsatz besteht hier noch dringender Verbesserungsbedarf.

Die Durchschnittswerte der Abscheideleistungen beim Einsatz in Kleinanlagen liegen, je nach Typ, zwischen 50 und 80 % [6], da die Staubpartikel in einem Hochspannungsfeld aufgeladen und im elektrischen Feld an einer Niederschlagselektrode – meist das geerdete Abgasrohr – abgeschieden werden. Dabei wirken zwei Mechanismen: die Feldaufladung bzw. Stoßaufladung und die Diffusionsaufladung. Für sehr kleine Partikel (Durchmesser < 0,1 µm) setzt die Beladung zeitlich verzögert ein, da der Beladungsmechanismus von der Stoßaufladung in die Diffusionsaufladung übergeht [10].

Solche elektrostatischen Abscheider zeigen eine geringere Abscheideleistung im Bereich 0,2 bis 2 µm Partikelgröße. Der Übergang ist stark von der Ionenkonzentration im Gasstrom abhängig. Von praktischer Bedeutung ist, dass sich der Beladungsvorgang der Partikel bis zu einigen Sekunden ausdehnen kann – im Vergleich zu Zehntelsekunden bei der Stoßaufladung größerer Partikel. Eine hohe Ionenkonzentration entschärft diese Problematik [10].

Neben den Staubemissionen sind auch die CO-Emissionen reglementiert und vor dem Hintergrund einer Nachrüstung von Bestandsanlagen und der Einhaltung der Grenzwerte im Betrieb relevant. Automatisierte Biomassefeuerungsanlagen verfügen über eine Steuerung zur Sicherstellung der Grenzwerte, die bei der Typenprüfung nachzuweisen sind. Bei handbeschickten Feuerungsanlagen sind die Emissionen hingegen sehr stark vom Verhalten des Betreibers abhängig. Zur Optimierung der Verbrennung in Bezug auf CO-Emissionen und den feuerungstechnischen Wirkungsgrad existieren kommerzielle Nachrüstlösungen, die über die Regelung von Abgasklappen oder Abgasgebläsen die Verbrennung in jeder Phase des Betriebs möglichst optimal gestalten (Beispiele für Verbrennungsregelungen: FlammTronik®, Fa. Lamtec, Fa. AEFACHSO). Für die Regelung werden unterschiedliche Ansätze verfolgt. Zur Detektion der im Abgas enthaltenen unverbrannten Bestandteile (COe) kommen kostengünstige, keramische Sensoren, z.B. CarboSen [12] zum Einsatz. Die Regelung der Verbrennungsluft erfolgt oftmals an der Emissionskante, nahe dem stöchiometrischen Luftverhältnis, bei dem eine möglichst vollständige Verbrennung mit optimalem Wirkungsgrad realisiert werden kann [13-15]. Zum Teil verfügen solche Lösungen auch über eine Erkennung des Ofentür-Status (offen/geschlossen). Im vorliegenden Projekt sollen solche Lösungen nicht entwickelt werden. Allerdings ist die Wechselwirkung eines solchen Moduls in Bezug auf die Rohemissionen und die Abscheidewirkung relevant. Da diese Nachrüstlösungen alle elektrischen Strom benötigen ist im Zusammenhang mit dem Powermanagement einer Nachrüstlösung auch der Strombedarf von Interesse.

Heutige Nachrüstlösungen benötigen eine Stromversorgung. Diese kann je nach Anwendungsfall mehr oder weniger aufwendig und teuer sein. Neben den Betriebskosten sind hier speziell die Investitionskosten zu nennen, z.B. falls bisher kein Stromanschluss erforderlich war, aber nun im Zuge der Nachrüstung nachträglich verlegt werden muss. Das ist nicht unbedingt notwendig, da im Abgas von Feuerungsanlagen noch viel thermische Energie enthalten ist. Diese wird bisher ungenutzt über den Schornstein in die Umwelt abgegeben. Als dritte modulare Komponente ist daher im Rahmen des Projekts die Erzeugung des Stroms zur Versorgung der emissionsreduzierenden Komponenten direkt aus der Abgasenergie mittels Thermoelektrik angedacht.

Thermoelektrische Generatoren (TEGs) nutzen Wärmeflüsse zur Stromerzeugung. Sie sind langlebig, zuverlässig und können auf sehr kleinem Raum eingesetzt werden. Im vorliegenden Fall

stellen TEGs auf Basis von Bismut-Tellurid (BiTe) angesichts der zu erwartenden Einsatztemperaturen ($< 300\text{ °C}$) die aussichtsreichste Materialgruppe dar. Diese TEGs sind in unterschiedlichsten Spezifikationen kommerziell erhältlich. Die Kosten für auf dem Markt erhältliche Module betragen für kleinste Stückzahlen $< 5\text{ €/W}$ (bezogen auf die maximal erreichbare Leistung).

Die thermoelektrische Stromerzeugung in Kleinf Feuerungsanlagen befindet sich aktuell im Bereich der Kleinserie (Firma Thermoelect – siehe [7]) bzw. im Demonstratorstadium (Fraunhofer IPM, Projekt: EFRE 2014-2020: EVI Verbundforschung Thermoelektrik-BHKW, Teilprojekt Nano-BHKW). Hierbei wird die Thermoelektrik direkt im Ofen integriert. Als Nachrüstlösung im Abgasstrang des Ofens existieren noch keine kommerziellen Lösungen. Der Einsatz der Thermoelektrik im Abgasstrang des Ofens hätte den zusätzlichen Nebeneffekt, dass zusätzliche Wärme aus dem Abgas ausgekoppelt wird, die für die Raumheizung genutzt werden kann.

1.2 Wissenschaftliche und technische Ziele

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines Partikelabscheiders auf Basis eines nicht-thermischen Plasmas, das eine sehr hohe Ionenkonzentration erzeugt. Darüber hinaus soll über ein innovatives Abreinigungsverfahren der Elektroden die korrekte Funktion im Betrieb sichergestellt werden (Projektpartner Woco). Für die Reduktion der gasförmigen Emissionen wird eine kommerzielle Lösung zur Verbrennungsregelung eingesetzt. Beide Technologien sollen über einen innovativen Ansatz zur thermoelektrischen Umwandlung der Abgaswärme in elektrischen Strom betrieben werden. Der Ofen bringt also selbst die Energie zur Reinigung durch seine Abgasenergie auf, die ansonsten ungenutzt über den Schornstein an die Umgebung abgegeben wird.

Staubemissionen / Abscheider:

Die Entfernung des gesundheitsschädlichen Feinstaubes aus dem Abgas soll im Rahmen des Projekts auf Basis eines neuartigen, innovativen nicht-thermischen Plasma-Abscheiders (Projektpartner Firma Woco) demonstriert werden. Da die abgeschiedenen Partikel auf den Elektroden ab einer gewissen Menge einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Funktion des Abscheiders haben, soll ein innovatives Reinigungskonzept der Abscheideelektroden mittels funktionaler Materialien (Formgedächtnislegierungen (FGL) bzw. Bimetallen) entwickelt werden. Die so abgeschiedenen – sehr groben Partikel – werden in einem entsprechend dimensionierten Sammelbehälter aufgefangen und über entsprechend lange Wartungsintervalle (Überprüfungsintervalle des Schornsteinfegers) einen möglichst wartungsfreien Betrieb der Anlage ermöglichen, bzw. Wartungsintervalle verkürzen.

CO-Emissionen / Verbrennungsregelung:

Für die Zertifizierung einer Nachrüstlösung wird für manche Bestandsanlagen eine Verbrennungsregelung erforderlich sein. Diese soll hier nicht neu entwickelt werden. Die Wechselwirkung des Verbrennungsregelungsmoduls mit dem Abscheider und dem Powermanagement der Module soll hinsichtlich der Emissionen und der Einbindung in ein zentrales Powermanagement analysiert werden.

Stromversorgung / thermoelektrischer Generator:

Der notwendige elektrische Strom für Regelung und Abscheidung (Hochspannung) soll optional mit einem wassergekühlten thermoelektrischen Generator-Modul (TEG) erzeugt werden. Für Anlagen die aktuell nicht über einen Stromanschluss verfügen (i.d.R. handbeschickte Feuerungsanlagen) soll basierend auf bestehenden Demonstratoren eine attraktive Lösung zur Stromerzeugung mittels Thermoelektrik abgeleitet und demonstriert werden. Diese hat den positiven Nebeneffekt, dass die über den thermoelektrischen Generator abzuführende Wärme als Nutzwärme bereitgestellt werden kann und sich der Wirkungsgrad der Anlage dadurch erhöht.

Zielsetzung:

Das Ziel des Projekts ist die Erforschung, Entwicklung und Demonstration eines hocheffizienten Partikelabscheiders für den typischen Leistungsbereich von Einzelholzfeuerungsstätten, in Kombination mit passiver, automatischer Reinigung unter dem Einsatz von Formgedächtnislegierungen oder Bi-metallen. Mit Hilfe einer gekoppelten Verbrennungsregelung soll zudem der feuerungstechnische Wirkungsgrad erhöht und die Schadstoffemissionen gesenkt werden und im Zusammenspiel mit dem Partikelabscheider analysiert werden. Durch den Betrieb mit thermoelektrisch erzeugter elektrischer Energie kann der Abscheider und/oder die Verbrennungsregelung zudem fernab von Stromnetzen betrieben werden, oder kann eine wirtschaftliche Alternative zur nachträglichen Installation einer Stromversorgung darstellen und somit die Kundenakzeptanz erhöhen.

1.3 Herausforderungen/Chancen und Risiken des Vorhabens

Obwohl die im Projekt vorgesehene Abscheidetechnologie bereits erfolgreich Anwendung in der Automobilindustrie zur Abscheidung von Öltröpfen findet, ergeben sich beim Einsatz zur Abscheidung von Feinstaub aus Rauchgasen von Kleinfeuerungsanlagen technische Herausforderungen. Zum einen umfassen diese die bisher eingesetzten Materialien, die zum Teil nicht für den Betrieb bei den in Holzfeuerungen vorherrschenden Abgastemperaturen geeignet sind. Zum anderen umfasst dies die Entwicklung eines speziell für das Abgasrohr eines Ofens und der Abscheidung fester Partikel angepassten Designs. Vor allem betrifft dies jedoch die Reinigung der Emissions- und Niederschlagselektroden im laufenden Betrieb, die für die Funktion des Systems über einen längeren Zeitraum unabdingbar ist. Während abgeschiedene Öltröpfen, die in flüssiger Form vorliegen, ohne das Aufbringen einer zusätzlichen Kraft passiv in einen Sammelbehälter abgeführt werden können, ist bei der Abreinigung von Staub eine mechanische Interaktion notwendig, um diesen von einer Oberfläche zu entfernen (z.B. Bürsten, Schaben, Kratzen).

Es steht der Nachweis aus, ob mit nicht-thermischem Plasma hohe Abscheideraten (>90 %) von Feinstaub (siehe [17] für genaue Definition) im für die Holzfeuerung relevanten Partikelgrößenbereich von <1 µm [6] erzielt werden können. Zudem gilt es in Kombination zu zeigen, dass durch den Einsatz von „smart materials“ (Formgedächtnislegierungen, Bi-Metalle etc.) eine rein passive, effektive und robuste Reinigung partikelbeladender Oberflächen des Abscheiders über einen längeren Betriebszeitraum möglich ist. Für entsprechende Untersuchungen muss eine Testumgebung mit der entsprechenden Messtechnik definiert und aufgebaut werden.

Als weitere technische Herausforderung ist die Stromversorgung des Abscheidesystems und der Verbrennungsregelung mittels eines wassergekühlten thermoelektrischen Generators (TEG) zu sehen. Um im Betrieb die Stromversorgung sicher stellen zu können, ist daher zum einen eine optimale thermische Anpassung des TEG an den vorliegenden Abgaswärmestrom, als auch ein speziell angepasstes Powermanagement erforderlich. Letzteres umfasst u.a. das sichere Laden und Entladen einer Pufferbatterie durch einen Laderegler in Kombination mit einem Maximum Power Point Tracker (MPPT), welcher für die Erreichung der maximalen elektrischen Ausgangsleistung des TEG benötigt wird. Nicht zuletzt müssen die eingesetzten Bauteile alle Komponenten hinsichtlich eines möglichst geringen Energiebedarfs optimiert werden und sollten alle auf 24 bzw. 12V Basis funktionieren.

Weiterer Entwicklungsbedarf ergibt sich durch die Kombination aus Feinstaubabscheidung, Verbrennungsregelung gekoppelt mit einer Eigenstromversorgung. Dies bedingt mehrere Schnittstellen, die eine optimale Abstimmung der Einzelkomponenten aufeinander bedarf.

Größtes technisches Risiko:

- Abscheidung mit nicht-thermischen Plasma und Abreinigung mit thermisch aktivierbaren Materialien bisher nicht nachgewiesen und ein absolutes Novum

2 Projektbeschreibung

2.1 Projektablauf

2.1.1 Projektidee

Im Rahmen des Projekts soll ein Demonstrator eines Feinstaub-Abscheiders für Holzfeuerungsanlagen entwickelt werden, der potenziell zertifizierbar und potenziell ohne eine externe Stromversorgung auskommen soll. Am Ende des Projekts soll das Emissionsminderungspotential bei Einzelfeuerstätten gezeigt und der Stand der Technik neu definiert werden. Das potenzielle Produkt soll primär auf die Nachrüstung von Bestandsanlagen zielen, aber auch für die Erstausrüstung von Holzöfen / Pelletöfen attraktiv sein. Um gleichzeitig die Schadstoffemissionen auf ein mögliches Minimum zu reduzieren, wird eine geeignete Verbrennungsregelung als zusätzliche Komponente mitberücksichtigt. Die modularen Hauptkomponenten sind in Abb. 2 dargestellt.

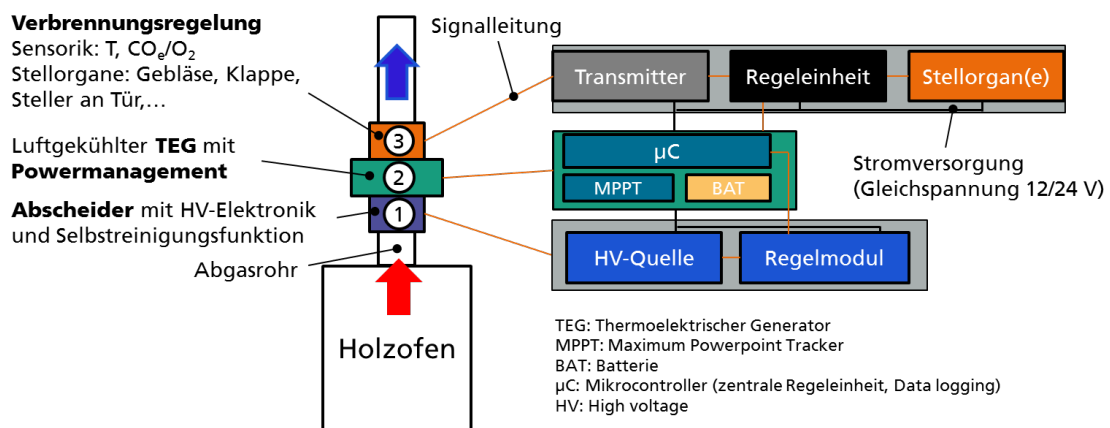


Abbildung 2: Prinzipskizze des modularen Systemaufbaus inkl. der Schnittstellen

2.1.2 Terminplan

Der Terminplan ist in Abb. 3 dargestellt.

Im Zwischenbericht Nr. 3 wurde bereits über Verzögerungen im Projekt von 2-3 Monaten berichtet. Diese Verzögerung konnte bis zum Projektabschluss nicht aufgeholt werden. Der Meilenstein 4 (Reinigungskonzept für den Abscheider der Fa. Woco) konnte nicht erfüllt werden.

Der Abscheider der Fa. Woco erreicht ganz knapp die innerhalb der Projektlaufzeit verschärften Zielwerte. Der Abscheider ist aber aufgrund seiner aufwändigen Bauweise mit aktuell am Markt verfügbaren Abscheidern nicht wettbewerbsfähig, da die Leistungsdaten nicht besser sind als bei kostengünstigeren Lösungen. Weiterhin konnte der Reinigungsapparat der Firma Woco nicht an der Feuerungsanlage getestet werden, weil sich die Rollen im Apparat nicht bewegen ließen. Daher wurde ein Vorgehen entwickelt, mit dem die Projektziele auch ohne die Umfänge der Fa. Woco noch erreicht werden konnten. In Richtung des finalen Demonstrators wurde ein Produkt der Fa. Oekosolve als Abscheider auf eine Gleichspannungsversorgung von 12V weiterentwickelt

und eingesetzt. Dieses war schnell verfügbar und konnte direkt eingesetzt werden, ohne weiteren Projektverzug. Da die Fa. Woco keinen funktionierenden Reinigungsapparat im Projekt liefern konnte, wurden am Fraunhofer IPM intensiv weitere Lösungsideen entwickelt. Bei der final umgesetzten Idee, wird nicht ein Reinigungsapparat innerhalb des Rohrs bewegt, sondern das gesamte Rauchgasrohr um eine stehende Struktur gedreht. Auf der Innenseite des Rohrs sind mehrere dünne, feststehende Metallsaiten angebracht, die sich nicht mitdrehen und den Feinstaub bei Drehung des Rohres von der Rohrwand abschaben. Die Realisierung dieser Lösung verzögerte das Projekt um weitere 2 Monate.

Die Gesamtsystemtests (Meilenstein 6) konnten mit einer Demonstration in Anwesenheit von Herrn Tuth am 28.03.2023 begonnen und im Mai 2023 abgeschlossen werden. Damit ergibt sich zum dargestellten Projektplan eine Verlängerung um 5 Monate. Aufgrund eines Personalengpasses konnte der Abschlussbericht leider erst nach der Sommerpause 2023 begonnen werden.

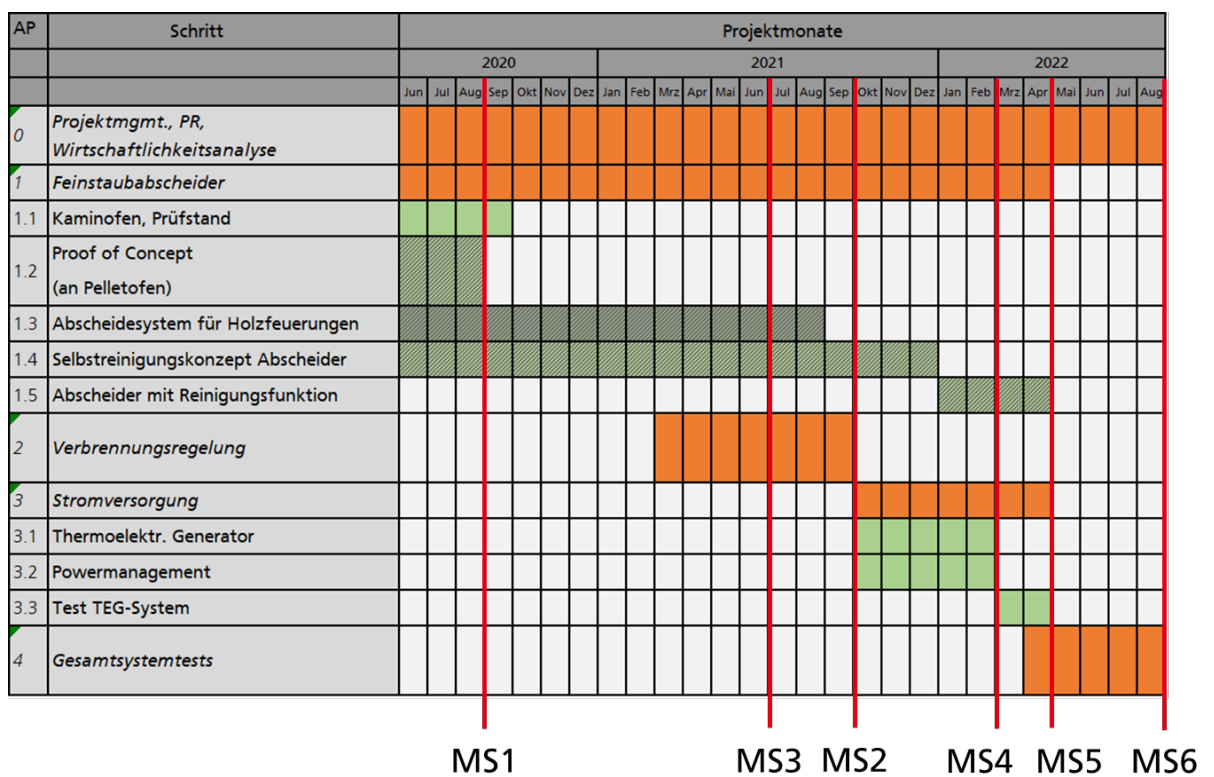


Abbildung 3: Projektterminplan (Stand Juni 2020)

2.2 Projektplanung

2.2.1 Ausführungsplanung

Das Vorgehen zur Entwicklung der beschriebenen Kombination eines Abscheiders auf Basis eines nicht-thermischen Plasmas, einer Verbrennungsregelung und einem thermoelektrischen Generator zur Stromversorgung ist im folgenden Projektstrukturplan dargelegt. Der inhaltliche Aufbau und Ablauf, sowie die erforderlichen Arbeitspakete des Projekts werden im Folgenden erläutert.

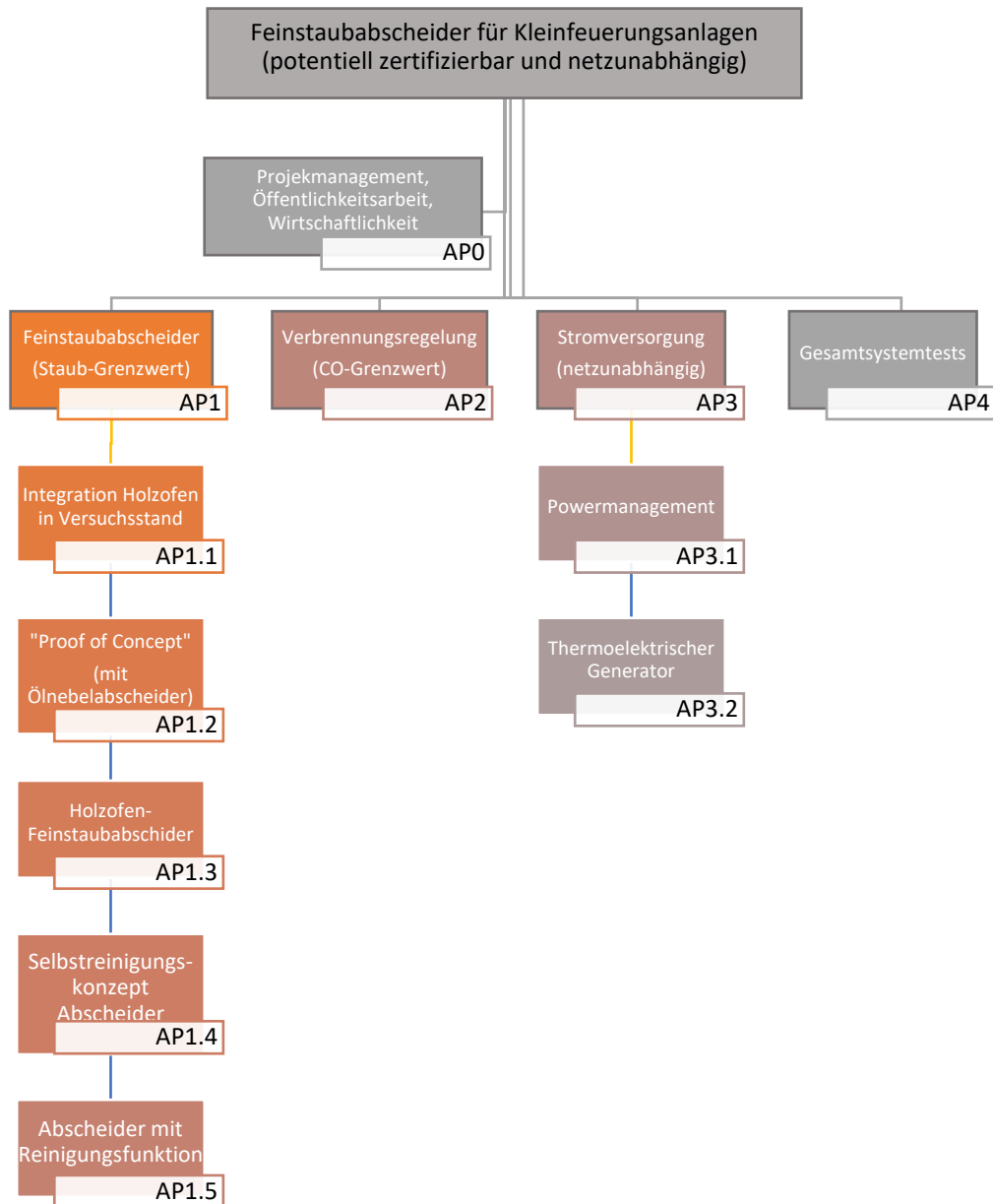


Abbildung 4: Projektstrukturplan

AP0	Projektleitung, Öffentlichkeitsarbeit und Wirtschaftlichkeitsanalysen	Arbeitspaketverantwortlicher:	IPM (Zeitraum: M1-M26)
	<ul style="list-style-type: none"> • Projektleitung und Berichterstellung • Konferenzbesuche zum Thema Partikelabscheidung bei Kleinfeuerungsanlagen • Öffentlichkeitsarbeit und Marketing: Präsentation der Ergebnisse im Rahmen von öffentlichen Veranstaltungen. Thematischer Internetauftritt von Fraunhofer IPM und badenova. Artikel in der lokalen und überregionalen Presse und ggf. Beiträge in Fachmagazinen zur Heiztechnik, wie z.B. „HLH - Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik“ 		

AP1	Feinstaubabscheider (Staub-Grenzwert)	Arbeitspaket-verantwortlicher:	Woco, IPM (Zeitraum: M1-20)
AP1.1	Integration Holzofen in Versuchstest-stand	Arbeitspaket-verantwortlicher:	IPM (Zeitraum: M1-4)
<ul style="list-style-type: none"> • Marktrecherche und Analyse von Kaminöfen im Bereich von 4...12 kW_{th} Leistung hinsichtlich projektrelevanter Eigenschaften wie Nachrüstbarkeit einer automatischen Luftregelung • Auswahl und Beschaffung eines Kaminofens, der als Demonstrator im Projekt dienen soll • Integration und Inbetriebnahme Ofen • Definition und Installation der zugehörigen Messtechnik: Abgastemperaturen • Detailanalyse des Kaminofens durch Messung der Temperaturen an relevanten Stellen <p>Ergebnis: Ofenprüfstand aufgebaut und Grundvermessung zur Temperaturverteilungen, Massenstrom bei unterschiedlichen Betriebspunkten abgeschlossen.</p>			
AP1.2	Proof of Concept mit Önebelabscheider	Arbeitspaket-verantwortlicher:	Woco, IPM (Zeitraum: M1-M6)
<ul style="list-style-type: none"> • Definition der mechanischen und elektrischen Schnittstellen (Woco, IPM) • Auswahl und Beschaffung Feinstaub- und Partikelmesstechnik (letztere geplant als Messdienstleistung) (IPM) • Anpassung/Adaption eines Ölabscheiders aus dem Bereich Automotive für den Funktionstest im Versuchsofen (Woco) • Integration Abscheidesystem in Ofenprüfstand (IPM) • Definition und Installation der zugehörigen Messtechnik: Abgastemperaturen, Leistungsaufnahme Abscheider, Staubmessung (gravimetrisch), Partikelmesstechnik (Abscheidegrad bezogen auf Partikelgröße – Fraktionsabscheidegrad), Abgasvolumenstrommessung und Differenzdruck (IPM) • Tests zur Bewertung der Funktionsweise und Abscheideleistung (IPM, Woco) <p>Ergebnis: Proof of Concept nicht-thermische Plasma-Abscheidung an Pelletofen demonstriert - Nachweis Abscheidung von Feinstaubpartikeln mit neuem Abscheidekonzept unter Realbedingungen (Abscheideraten > 80 %)</p>			
AP1.3	Feinstaubabscheider: Abscheidesystem für Holzfeuerungen	Arbeitspaket-verantwortlicher:	Woco, IPM (Zeitraum: M3-M14)
<ul style="list-style-type: none"> • Definition der mechanischen und elektrischen Schnittstellen (Woco, IPM) • Konzeption und Design einer auf die Verwendung in Holzfeuerungen angepassten Bau-Gruppe (ggf. Simulation für optimale Anordnung der Sprühelektroden) (Woco, IPM) • Anpassung/Adaption eines Ölabscheiders aus dem Bereich Automotive für den Test im Versuchsfeld von Woco (Bestäubungsprüfstand, Aerosolprüfstand, ...) (Woco) • Tests zur Bewertung der Funktionsweise und Abscheideleistung (Woco) • Konstruktion und Fertigung eines Abscheiders für den Einsatz im Kaminofen (unmittelbar nach Ofenausgang) → Funktionsmuster (Woco) • Integration Abscheidesystem in Ofenprüfstand (IPM) • Definition und Installation der zugehörigen Messtechnik: Abgastemperaturen, Leistungsaufnahme Abscheider, Staubmessung (gravimetrisch), Partikelmesstechnik (Abscheidegrad bezogen auf Partikelgröße – Fraktionsabscheidegrad), Abgasvolumenstrommessung und Differenzdruck (IPM) • Bewertung Funktionsweise und Abscheideleistung (IPM, Woco) 			

Ergebnis: Abscheider erfolgreich für Feuerungsanlage optimiert und an Feuerungsanlage hinsichtlich Partikelemissionen getestet. Abscheiderate auf Basis von Gesamtstaubemissionen (gravimetrisch) und hinsichtlich Partikelgrößenverteilung (Anzahlreduktion) bestimmt.			
AP1.4	Selbstreinigungskonzept	Arbeitspaketverantwortlicher:	IPM, Woco (Zeitraum: M9-M16)
<ul style="list-style-type: none"> • Literatur- / Patentbewertung zu Reinigungssystemen an Elektrofiltern (Woco) • Entwicklung eines innovativen Reinigungskonzepts für die Abscheideelektrode vorzugsweise basierend auf Formgedächtnis-Legierungen oder Bimetallen (Woco, IPM) • Konstruktion, Aufbau/Fertigung unterschiedlicher Labormuster zur Reinigung • Untersuchungen zum »Abschütteln« von Feinstaubbelägen im Labormaßstab an verschmutzten Oberflächen (IPM) • Selbstreinigungskonzept auf Komponente übertragen (Woco) <p>Ergebnis: Selbstreinigungskonzept erfolgreich unter Labor Bedingungen getestet und auf Komponenten des Abscheiders übertragen.</p>			
AP1.5	Abscheider mit Reinigungsfunktion	Arbeitspaketverantwortlicher:	IPM, Woco (Zeitraum: M17-M20)
<ul style="list-style-type: none"> • Konzeption und Design Demonstrator (Anpassung Funktionsmuster aus AP3 mit Konzept aus AP4) (Woco, IPM) • Konstruktion und Fertigung des Demonstrators (Woco) • Integration Abscheidesystem in Ofenprüfstand (IPM) • Test und Bewertung (IPM, Woco) <p>Ergebnis: Demonstrator Abscheider mit Selbstreinigungsfunktion aufgebaut. Selbstreinigungskonzept an Feuerungsanlage mit Demonstrator Abscheider nachgewiesen.</p>			

AP2	Verbrennungsregelung (CO-Grenzwert)	Arbeitspaketverantwortlicher:	IPM (Zeitraum: M8-M14)
<ul style="list-style-type: none"> • Marktrecherche und Analyse von Verbrennungsluftregelungen • Auswahl und Beschaffung einer Verbrennungsluftregelung, die zur Demonstration im Projekt eingesetzt werden soll, Definition Regelorgan(e) (Klappe, Lüfter, Schieber) • Integration in Abgasstrang des Ofens • Funktionsprüfung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen des Ofens • Detailanalyse des Energiebedarfs der ausgewählten Verbrennungsluftregelung <p>Ergebnis: Verbrennungsregelung beschafft und Funktion an Feuerungsanlage nachgewiesen</p>			

AP3	Stromversorgung (netzunabhängig)	Arbeitspaketverantwortlicher:	IPM (Zeitraum: M16-M22)
AP3.1	Thermoelektrischer Generator	Arbeitspaketverantwortlicher:	IPM (Zeitraum: M16-M20)
<ul style="list-style-type: none"> • Konzeption und Design einer TEG-Baugruppe basierend auf möglichst vielen Kaufteilen • Simulation der Wärmeströme und einer darauf angepassten TEG-Baugruppe • Konstruktion und Fertigung einer TEG-Baugruppe für den Kaminofen 			

Ergebnis: TEG für Test in Heißluftprüfstand und Ofen verfügbar.			
AP3.2	Powermanagement	Arbeitspaket-verantwortlicher:	IPM (Zeitraum: M16-M20)
<ul style="list-style-type: none"> • Konzeption elektrisches Powermanagement • Beschaffung von Komponenten für das Powermanagement • Programmierung der Software für das Powermanagement 			
Ergebnis: Powermanagement für Test TEG-System am Ofen verfügbar.			
AP3.3	Test TEG-System	Arbeitspaket-verantwortlicher:	IPM (Zeitraum: M21-M22)
<ul style="list-style-type: none"> • Experimentelle Charakterisierung der TEG-Baugruppe auf einem Heißluftprüfstand (Bilanzierung Wärmestrom, Messung Differenzdruck und elektr. Leistungsausbeute) • Integration und Test TEG-System im Ofen 			
Ergebnis: Vermessung TEG-System bei unterschiedlichen Betriebspunkten. Funktion TEG-System an Feuerungsanlage nachgewiesen (elektrische Leistung $P_{el} > 5 \text{ W}$)			

AP4	Gesamtsystemtests	Arbeitspaket-verantwortlicher:	IPM (Zeitraum: M22-M26)
<ul style="list-style-type: none"> • Die Elemente aus AP1, AP2 und AP3 werden Schritt für Schritt zu einem Gesamtsystem kombiniert, inklusive der elektrischen Bauteile zum Betrieb • Funktionstests Komponenten im Verbund, Messung der Abscheideleistung in Abhängigkeit der Betriebsdauer, Nachweis Funktion Abscheider über eine längere, charakteristische Betriebsdauer 			
Ergebnis: Erfolgreiche Tests Gesamtsystem bestehend aus Abscheider, Verbrennungsregelung, TEG und Elektronik			

2.2.2 Übersicht Meilensteine und Projektziele nach Arbeitspaketen

Tabelle 1 zeigt die Meilensteine des Projektes und die Erreichung dieser im Projektverlauf.

Meilenstein	AP	Beschreibung	Geplant (erreicht)
1	1.2	Proof of Concept nicht-thermische Plasma-Abscheidung an Pelletofen demonstriert	08/2020 (08/2020)
2	2 (1.1)	Verbrennungsregelung beschafft und Funktion an Feuerungsanlage nachgewiesen	09/2022 (09/2022)
3	1.3	Abscheider erfolgreich modifiziert und an Feuerungsanlage hinsichtlich Partikelemissionen getestet	06/2021 (02/2022)
4	1.4, 1.5	Selbstreinigungskonzept an Feuerungsanlage mit Demonstrator Abscheider nachgewiesen.	02/2022 (05/2023)
5	3.1, 3.2, 3.3	Funktion TEG-System an Feuerungsanlage nachgewiesen (elektrische Leistung $P_{el} > 5 \text{ W}$)	04/2022 (04/2022)

6	4	Erfolgreiche Tests Gesamtsystem bestehend aus Abscheider, Verbrennungsregelung, TEG und Elektronik	05/2023
---	---	--	---------

2.3 Projektdurchführung

2.3.1 AP 1: Feinstaubabscheider

Dieses Arbeitspaket umfasst fünf Teilarbeitspakete von der Beschaffung des Ofens, über den Aufbau des Prüfstands, einen Proof of Concept (PoC) für die Abscheidetechnologie vom Projektpartner Woco, bis hin zur Neuentwicklung eines sich selbst reinigenden Abscheiders durch den Partner Woco (APs 1.3 bis 1.5 mit Meilensteinen 3 und 4). Wie in den Zwischenberichten dargestellt konnte die Firma Woco im Rahmen des Projekts keinen funktionstüchtigen Selbstreinigungsmechanismus bereitstellen, und die Abscheideleistung des Partikelabscheiders war gegenüber kommerziell erhältlichen elektrostatischen Abscheidern nicht wettbewerbsfähig, da sich das Konzept im Rahmen der Entwicklung immer weiter von einem Plasma-Abscheider zu einem elektrostatischen Abscheider hin entwickelte.

AP 1.1 Kaminofen, Prüfstand

Der Prüfstand konnte nach einigen Veränderungen, bei denen die Firma Markgräfler Ofenbau unterstützt hat, in Betrieb genommen werden. Dabei war der Einbau einer zusätzlichen Luftregelklappe im Schornstein erforderlich. Nach der Umsetzung dieser Maßnahme konnte die Feuerungsanlage im zulässigen Bereich für den Kaminzug betrieben werden.

Beim Kaminofen wurde zu Anfang ein Ofen der Firma Hase Kaminofenbau mit einer prototypischen Steuerung von Fraunhofer IBP eingesetzt. Es stellte sich jedoch heraus, dass diese Steuerung nicht korrekt funktionierte, so dass die Firma Hase das aktuelle Serienprodukt, das mit der elektronischen Luftsteuerung die Anforderungen des Blauen Engels bzgl. der gasförmigen Emissionen erfüllt, für die weiteren Entwicklungen zur Verfügung stellte. Bei dem verwendeten Ofen handelt es sich um das Produkt mit der Bezeichnung SILA iQ, mit der iQ-Technologie, die mittels einer intelligenten Software und energieeffizienten Luftklappen über eine automatische Luftregelung verfügt. Die Leistungsaufnahme der Steuerung lag im Betrieb bei weniger als 0,5 Watt im Durchschnitt. Der Ofen hat auf Basis des Datenblatts 6 kW Nennwärmeleistung und eine Abgasstutztemperatur im Bereich von 260 bis 310 °C.

AP 1.2 Proof of Concept (PoC) an einem Pelletofen

Der Proof of Concept wurde im Rahmen eines Projekttreffens am 11.08.2020 am Fraunhofer IPM durchgeführt. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Partikelanzahl in der Abluft durch den Einsatz eines für die Automobilindustrie konzipierten Abscheiders auf Basis der Plasmatechnologie der Firma Woco deutlich verringert werden kann.

AP 1.3 Abscheidesystem für Holzfeuerungen

In diesem Teilarbeitspaket war aufgrund der Ergebnisse aus AP1.2 eine Anpassung des ursprünglich angedachten Designs erforderlich. Diese wurde vom Projektpartner Woco durchgeführt. Es wurde ein erster Prototyp gebaut (siehe Abb. 5), an einer Kaltrauchquelle in Bezug auf seine Abscheidewirkung in ersten Vorversuchen analysiert und dann im Labor bei Fraunhofer IPM zunächst am Pellet-Ofen hinsichtlich der Abscheidung in realem Rauchgas untersucht und weiter optimiert.

Der finale Entwicklungsstand wurde auf der Feuerungsanlage vermessen. In Abb. 6 sind die erreichten Leistungsdaten und der im Projektverlauf nachgeschärfte und Zielkorridor dargestellt (im Projektantrag war ein Abscheidegrad von > 80 % genannt).

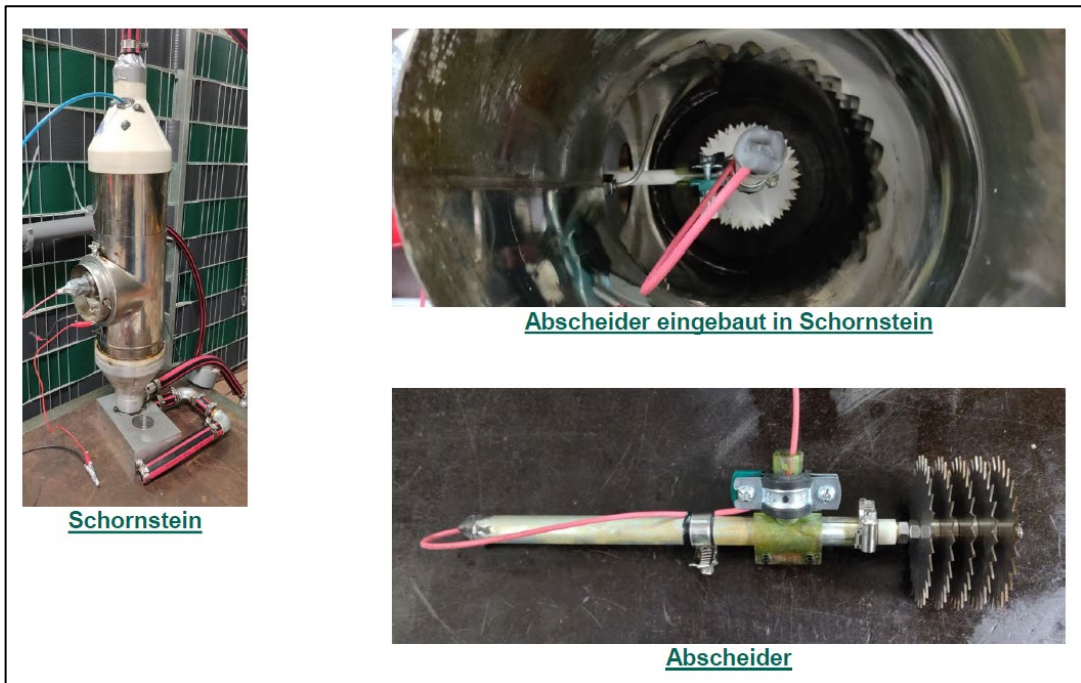


Abbildung 5: Überarbeitetes Abscheider-Design von Woco

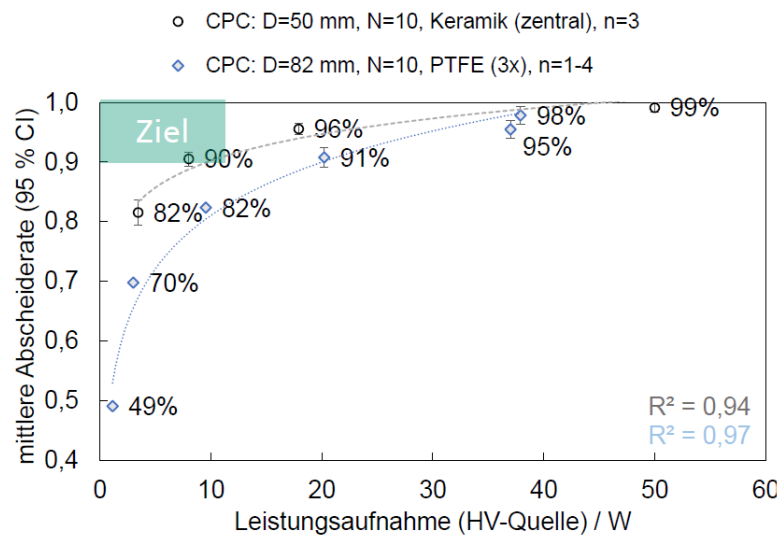


Abbildung 6: Abscheideraten von zwei Ausführungen des Woco-Abscheiders in Abhängigkeit von der Leistungsaufnahme

Der Abscheider erfüllt knapp das im Projekt gesetzte Ziel von > 90 % Abscheiderate bezogen auf die Partikelanzahl bei weniger als 10 W Leistungsaufnahme. Das ursprüngliche Ziel im Antrag war eine Abscheideleistung von > 80 %. Diese Zielsetzung wurde im Projekt verschärft, weil kommerzielle Abscheider Werte von über 90 % erreichen können und zwischenzeitlich die Vergabekriterien für das Umweltzeichen » Blauer Engel « (Staubabscheider für Scheitholz-Einzelraumfeuerungen, DE-UZ 222) einen Partikelanzahl bezogenen Abscheidegrad von 90% vorsehen.

Diese Tatsache in Kombination mit den Problemen zur Erreichung des Meilensteins MS 4 hat nach ausführlicher Diskussion zu Veränderungen im Projekt geführt.

Es wurde beschlossen im weiteren Projektverlauf das Produkt „Ökotube“ der Fa. Oekosolve als Abscheider einzusetzen. Dieses ist bereits verfügbar. Erste Messungen mit diesem Abscheider, der für den Anschluss an 230 VAC gedacht ist, konnten die Leistungsfähigkeit dieses Abscheiders mit Abscheideraten von mehr als 90% bei geringer elektrischer Leistungsaufnahme untermauern. Für das Projekt hat die Firma Oekosolve uns dankenswerter Weise einen Abscheider mit 12 V Gleichspannung bereitgestellt. Dieser Prototyp hat zwar keine auf 12 V Versorgungsspannung ausgelegte elektronische Bauteile, zeigte aber mit Abscheideraten von mehr als 93% bei einer Leistungsaufnahme von 6 Watt eine sehr gute Leistungsfähigkeit. Beim Einsatz am Holzschleifofen wurden beim Anfeuern und Nachlegen immer wieder auch kurzzeitig höhere elektrische Leistungsaufnahmen von 12 Watt gemessen. Diese lassen sich aber durch eine Optimierung der elektronischen Steuerung noch reduzieren. Im restlichen Betrieb des Ofens war die Leistungsaufnahme des Abscheiders im Durchschnitt bei weniger als 6 Watt. Weiterhin konnte im Rahmen von Dauerlaufversuchen festgestellt werden, dass sich die Abscheideleistung mit zunehmender Laufzeit reduziert. Dieses Verhalten ist auf die Rußablagerungen durch die abgeschiedenen Partikel in Kombination mit der Steuerung des Abscheiders zu erklären. Sobald der Ruß von der Innenseite des Abgasrohrs im Bereich des Abscheiders entfernt wird, entsprechen die Leistungsdaten wieder dem Neuzustand. Dies macht deutlich, dass für eine dauerhaft hohe Abscheideleistung eine Reinigung des Abscheiders von Zeit zu Zeit – am besten vor jedem Anfeuern – erforderlich ist (siehe AP. 1.4).

AP 1.4 Selbstreinigungskonzept Abscheider

Leider konnte in diesem Arbeitspaket von der Firma Woco kein funktionierender Reinigungsapparat (Stab-Reiniger) für den Abscheider zur Verfügung gestellt werden. In Abb. 7 ist der Reinigungsapparat dargestellt. Er umfasst über den Rohrfumfang verteilte Rollen (Stäbe), die mittels Zahnkränze über einen Motor angetrieben werden sollen. Die Rollen sollen auf der Außenseite in einem Flies den abgeschiedenen Staub abstreifen.

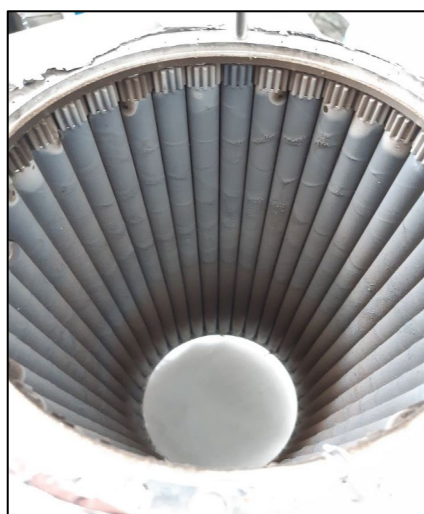


Abbildung 7: Stab-Reiniger der Fa. Woco nach dem Betrieb am Ofen (Stäbe konnten allerdings nicht bewegt werden)

Neben sehr vielen Problemen in der Fertigung dieser recht aufwendigen Konstruktion, konnte der Apparat selbst bei Raumtemperatur nicht betrieben werden. Der Apparat (ohne Bewegung

der Stäbe) wurde dennoch in Kombination mit dem Abscheider der Fa. Woco am Ofen getestet. Die Reinigung konnte hier zwar nicht gezeigt werden, aber der Einfluss auf die Abscheideleistung des Abscheiders war sehr gering.

Eine Weiterführung der Entwicklung dieses Reinigungsapparats durch die Fa. Woco wurde vor dem Hintergrund der technischen Komplexität und angesichts des aufgebrauchten Projektbudgets bei der Fa. Woco als nicht zielführend angesehen.

Angesichts der Entscheidung den kommerziellen Abscheider der Firma OekoSolve im Weiteren zu verwenden, wurde am IPM deshalb ein anderes Konzept zur Selbstreinigung entwickelt und umgesetzt, das sich ganz allgemein eignet, um Abgasrohre im Bereich der Abscheidung zu reinigen – ganz ohne zusätzliche Energie. Bei dem innovativen Ansatz des Fraunhofer IPM wird nicht ein Reinigungsapparat innerhalb des Rohrs gedreht, sondern das gesamte Rauchgasrohr um eine stehende Struktur gedreht werden. Auf der Innenseite des Rohrs sind mehrere dünne, feststehende Metallsaiten angebracht, die sich nicht mitdrehen und den Feinstaub bei Drehung des Rohres von der Rohrwand abschaben. Die Drehung des Rohrs erfolgt über einen außen am Rohr anliegenden Draht aus einer Formgedächtnislegierung, der seine Länge beim Durchlaufen des Temperaturbereichs von 70 bis 80°C um drei bis fünf Prozent ändert. Diese Längenänderung wird in eine Drehbewegung des Rohrs umgewandelt. Die Rückwärtsbewegung beim Abkühlen des Abgasrohrs erfolgt einfach über ein angehängtes Gewicht. Daraus resultiert, dass das Abgasrohr auf der Innenseite beim Anfeuern und Auskühlen des Ofens gereinigt wird. Der Aufbau des Reinigungsapparats mit den Metallsaiten und der Abschabung der abgeschiedenen Partikel ist in Abbildung 8 zu sehen. Der Formgedächtnis-Draht lässt sich auch zu jedem beliebigen Zeitpunkt mittels eines elektrischen Stroms aktivieren. Beim Anlegen eines elektrischen Stroms erwärmt sich der Draht. Damit sind auch konstruktive Lösungen denkbar, bei denen der Draht nicht direkt mit einem heißen Bauteil in Berührung gebracht werden muss. Der Reinigungsapparat wurde im Rahmen des Projekts zum Patent angemeldet.



Abbildung 8: links: Abschabung der Ablagerungen durch die feststehenden Metallsaiten bei Drehung des Abgasrohrs; rechts: am Ofen eingebauter Apparat mit Rückzugfeder und Gewicht

2.3.2 AP 2: Verbrennungsregelung

Mit dem von der Fa. Hase bereitgestellten Holzschietofen (Sila iQ) konnte eine Verbrennungsregelung des Ofens dargestellt werden. Dieser Ofen hat zwischenzeitlich das Umweltzeichen » Blauer Engel « (Kaminöfen für Holz, DE-UZ 212) erhalten. Die Leistungsaufnahme der Regelung beträgt im Mittel weniger als 0,5 Watt. Die meiste Zeit befindet sich die Regelung im Überwachungsmodus. Nur wenn die Lüftungsklappen bewegt werden, ergibt sich für eine sehr kurze Dauer eine Leistungsaufnahme von ca. 2 Watt.

In Arbeitspaket 2 wurde die Anlagentechnik im Labor um einen Zugbegrenzer ergänzt und der Holzschietofen mit Verbrennungsregelung von der Firma Hase in Betrieb genommen. In Abb. 9 sind die Temperaturverläufe am Ofenstutzen für mehrmaliges Auflegen (Anfeuern, 4 x Auflegen, Abbrand) von Brennholz dargestellt. Die Regelung der Verbrennungsluft funktioniert. Die Abgastemperaturen liegen zwischen 200 und 340 °C und sind an dieser Stelle etwas höher als erwartet, aber noch unkritisch in Bezug auf den Einsatz der thermoelektrischen Generatoren. Der Schornsteinzug liegt zwischen 12 und 18 Pascal in dieser Messung. Dies liegt im zulässigen Bereich.

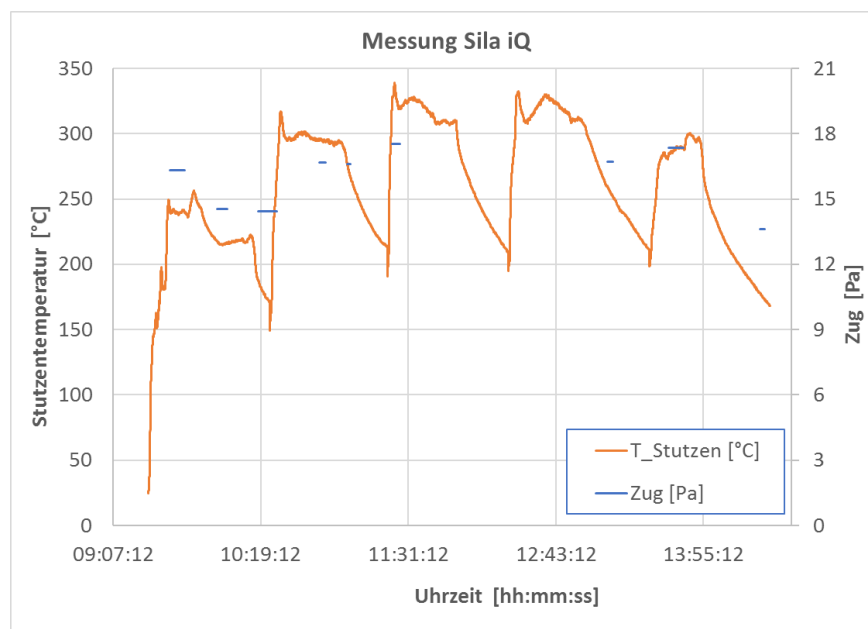


Abbildung 9: Abgastemperatur am Austritt des Ofens und der Zug im Rauchgasrohr für mehrfaches Auflegen am geregelten Holzschietofen der Fa. Hase

Die Verbrennungsregelung iQ analysiert permanent die Brennraumtemperatur, regelt die Luftströme und die Sauerstoffzufuhr. Das Feuer brennt sauber und schadstoffarm. Eine App informiert zudem sekundengenau über die Brennqualität des Ofens. Sie zeigt die Performance des Feuers in Bezug auf das Emissionsverhalten und die Energieeffizienz an. Die App weist zudem auf den perfekten Zeitpunkt zum Holz nachlegen hin.

2.3.3 AP 3: Stromversorgung

In Arbeitspaket 3 wurde ein völlig neuartiger thermoelektrischer Generator zur Versorgung der Verbrennungsregelung und des elektrostatischen Abscheiders entwickelt. In bisherigen Generatoren wurden planare thermoelektrische Module verwendet, auf die Kalt- und Heißeiten Wärmetauscher aufgepresst wurden (siehe auch Innovationsfonds-Projekt: Wirkungsgradsteigerung eines BHKWs mittels Thermoelektrischer Wärmetauscher, TeWaB). Bei dem neuen Generator

handelt es sich um ein Rohr-in-Rohr-Design (siehe Abb. 10), bei dem die thermoelektrischen Materialien zwischen zwei konzentrischen Rohren in einem dauerhaft stabilen Pressverband eingebracht werden.

Dieses spezielle Design erlaubt die direkte Integration in Wärmetauscher als Rohrbündel und bietet perspektivisch auch Kostenvorteile gegenüber etablierten, früheren Design-Ansätzen. Diese Form von thermoelektrischen Generatoren wurde in einem vorlaufenden Fraunhofer internen Projekt entwickelt und für das vorliegende Projekt erstmalig in einer Bauform ausgeführt, die sich in ein typisches Rauchgasrohr integrieren lässt. Der innovative Ansatz wurde zum Patent angemeldet.

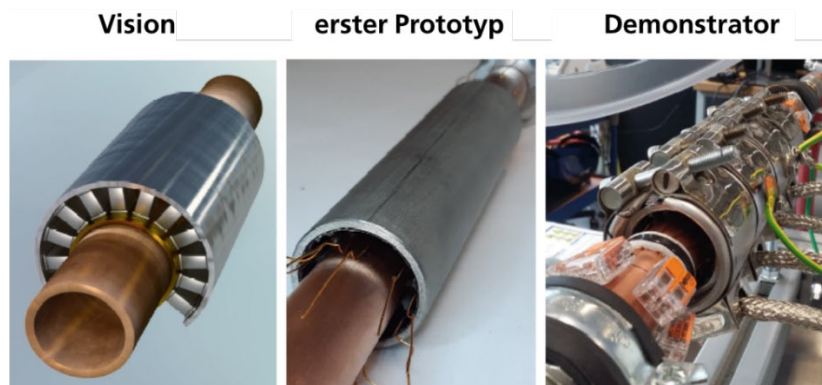


Abbildung 10: Rohrförmiger thermoelektrischer Generator zur Einbindung in das Rauchgas (äußeres Edelstahlrohr) und einen Kühlkreis (Kupferrohr)

Der Generator wurde als Demonstrator auf der Messe Progetto Fuoco (4. - 7. Mai 2022, Verona, Italien) erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Progetto Fuoco in Verona ist eine Fachmesse rund um Technologien zur Nutzung alternativer Energiequellen und findet alle zwei Jahre statt. Der Demonstrator umfasst einen kompletten, mobilen Messplatz inklusive der Leistungselektronik, einer Batterie, einer Rückkühleinheit und entsprechende Messtechnik zur Visualisierung und Aufzeichnung der Betriebsparameter im unbemannten Dauerbetrieb. Der Aufbau wurde vor dem Einsatz am Ofen mehrere hundert Stunden bei der Grenztemperatur der bestimmenden Bauteile betrieben. Diese Einrichtung wurde auch in Arbeitspaket 4 eingesetzt, bei dem es um die Demonstration des Zusammenspiels aller im Projekt entwickelten Komponenten geht.

In Abbildung 11 ist eine Variante mit einer sehr feinen Rippenstruktur (13 Rippen/Zoll) auf der Außenseite dargestellt.

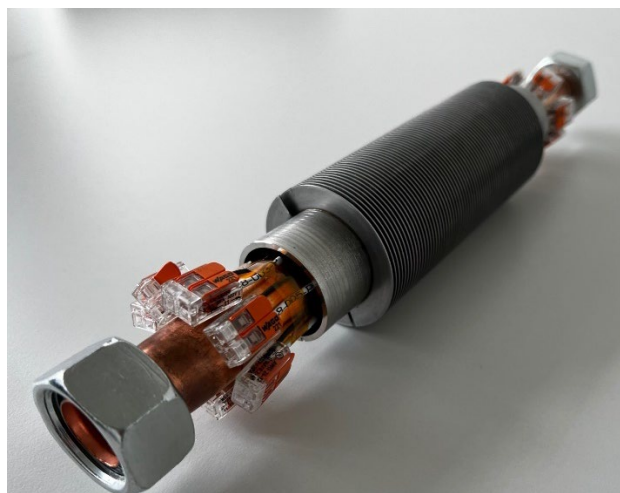


Abbildung 11: Rohrförmiger thermoelektrischer Generator mit einer sehr feinen Berippung

Für die Demonstration am Ofen wurden zwei Generatoren mit einer Berippung von 5 Rippen pro Zoll verwendet. Jeder Generator kann bis zu 5 Watt elektrische Leistung im Bereich der maximal zulässigen Temperatur erzeugen. In der finalen Demonstration wurden zwei solcher Generatoren eingesetzt (s. Abb. 12).

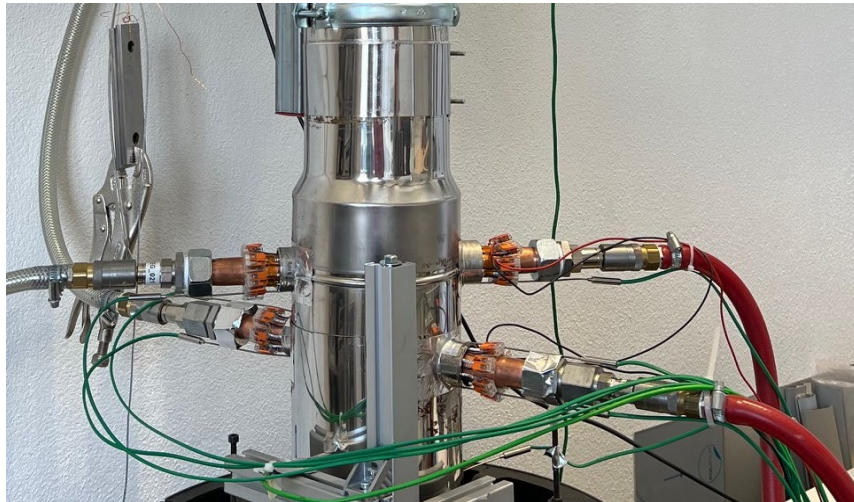


Abbildung 12: Aufbau von zwei wassergekühlten Generatoren im Abgasrohr des Holzofens

2.3.4 AP 4: Gesamtsystemtests

In Abbildung 13 ist das System dargestellt, welches für die abschließenden Messungen verwendet wurde. Neben den sichtbaren Komponenten wurden für die finalen Tests noch eine Wasserkühlung der Generatoren mit 15 °C, eine 12V Versorgung für den Abscheider und eine Elektronik zur Einspeicherung der erzeugten elektrischen Energie in eine 12 Batterie verwendet.

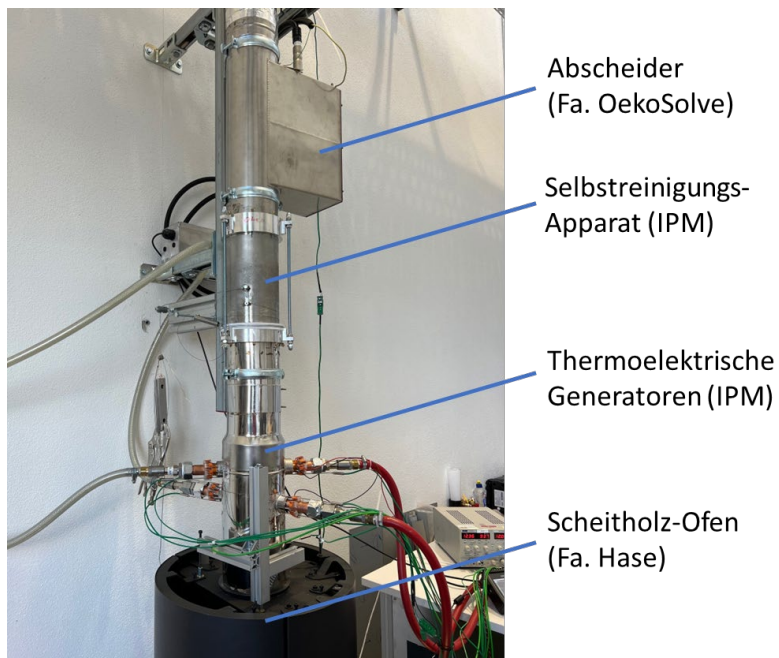


Abbildung 13: Aufbau des Gesamtsystems für die finalen Tests

In Abbildung 14 sind die Temperaturverläufe für mehrmaliges Auflegen (Anfeuern, 4 x Auflegen, Abbrand) von Brennholz und die generierte elektrische Leistung dargestellt. Das Abgas verlässt den Ofen nach der ersten Anfeuerungsphase mit einer Temperatur von 220 bis ca. 400 °C. In

den Versuchen zeigte sich weiterhin, dass die Temperaturverteilung am Austritt nicht homogen ist. Trotz dieser herausfordernden Randbedingungen konnten die beiden thermoelektrischen Generatoren so ausgelegt und positioniert werden, dass sie sehr nah an der oberen Leistungsgrenze operieren. Die maximale elektrische Leistung erreicht Werte von 10 Watt, was dem optimalen Einsatzpunkt entspricht. Aus den Temperaturverläufen am in Strömungsrichtung gesehen 1. Generator ist deutlich zu erkennen, dass zwischen der Anström- und der Abströmseite des berippten Generators noch eine deutliche Temperaturdifferenz vorliegt. Durch geschickte Strömungsführung um den Generator herum, könnten hier die Leistungsausbeute noch verbessert werden. Die Verläufe in Abbildung 14 stellen nur einen von zahlreichen durchgeführten Testläufen dar. Die Generatoren und auch der Selbstreinigungsapparat haben diese Testläufe ohne Funktionseinbußen absolviert.

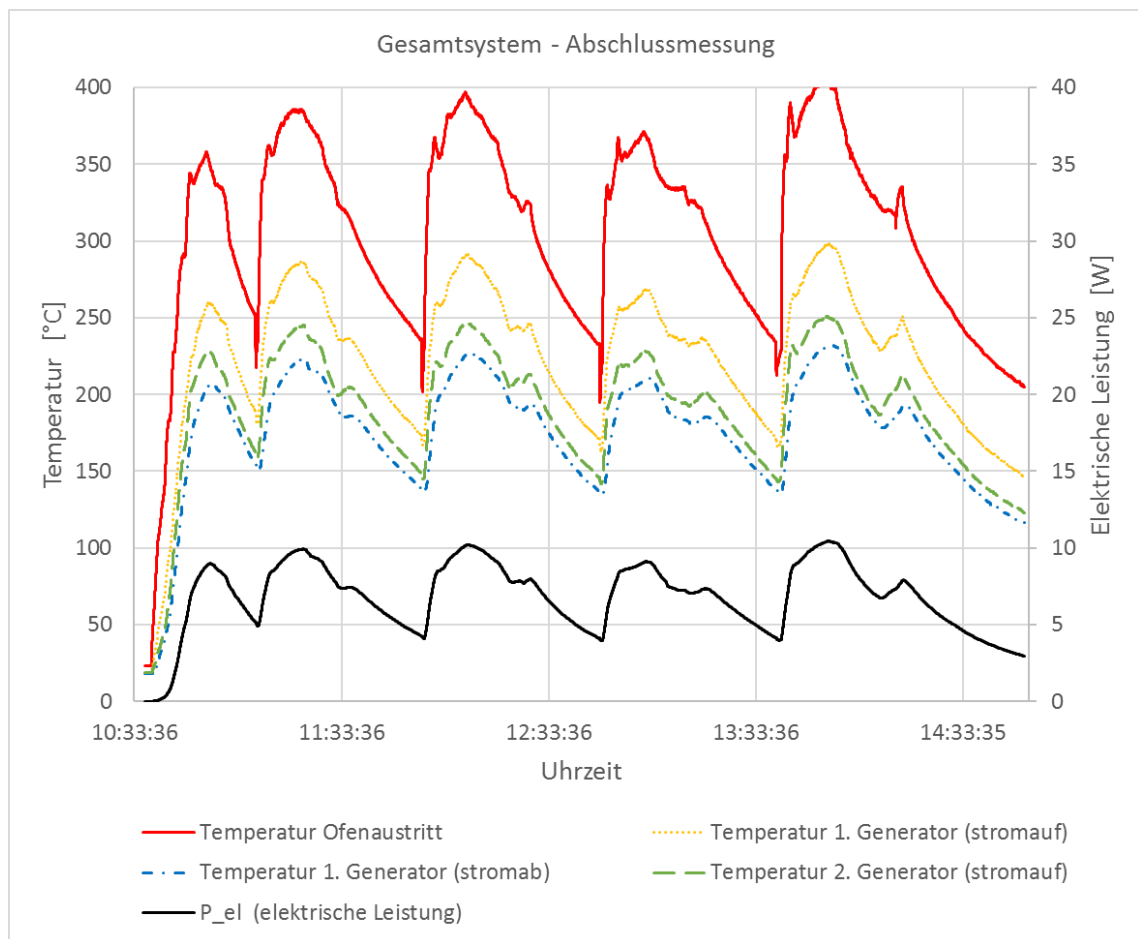


Abbildung 14: Temperaturverläufe und generierte elektrische Leistung für Anfeuern, mehrmaliges Nachlegen und Abbrand mit dem Gesamtsystem

Neben der Leistungsfähigkeit der thermoelektrischen Rohr-Generatoren war auch die Frage zu beantworten, ob bzw. wann mit den zwei eingesetzten Generatoren ein ausgeglichener Energiehaushalt sichergestellt werden kann. Diese Fragestellung wird in Abbildung 15 beantwortet. Dargestellt ist wieder die erzeugte elektrische Leistung. Weiterhin dargestellt ist ein synthetisches Profil für die Leistungsaufnahme der Verbrennungsregelung und des elektrostatischen Abscheiders. Für den Abscheider wurde während der Messungen festgestellt, dass die elektrische Leistungsaufnahme während der Anfeuerungsphasen kurzzeitig von 6 auf 12 Watt anstieg, um danach wieder abzufallen. In dieser Phase der Verbrennung ist eine stärkere Rauchentwicklung

aus der Verbrennung zu erwarten, da aus dem trockenen Holz in dieser Phase über Pyrolyse die brennbaren Gase erzeugt werden. In dieser Phase ist das Abgas zusätzlich noch recht kalt, so dass sich große Anteile kondensierbarer Gase im Rauchgas finden. Dies führt zu einem größeren Ladungsfluss von der Hochspannungselektrode des Abscheiders an die Rohrwand. Da die elektronische Regelung des Abscheiders aufgrund der Anpassung auf 12 V Versorgungsspannung nicht kompensieren kann, ergeben sich die Leistungsspitzen. Diese Phasen wurden konservativ mit ca. 120 s Dauer für das synthetische Profil in Abbildung 15 abgeschätzt.

Wird nun die elektrische Leistungsaufnahme des Gesamtsystems mit der erzeugten elektrischen Leistung der beiden Generatoren bilanziert ergibt sich das Energiebudget für die Batterie. Ausgehend von einem Budget von Null Joule zu Beginn des Tests, ergibt sich zunächst die Notwendigkeit, dass Energie von der Batterie ins System fließt, da die Generatoren aufgrund der niedrigen Temperaturen beim Start des Ofens noch nicht genügend Leistung generieren. Bereits nach dem zweiten Auflegen ist dann der Punkt erreicht, an dem das Energiebudget ausgeglichen wird und ab dem die beiden Generatoren dann die Batterie wieder laden. Für eine Entwicklung zu einem kommerziellen Produkt sollte die Ansteuerung des Abscheiders mit der Verbrennungsregelung kombiniert werden, damit der Abscheider in der letzten Abbrandphase nur so lange betrieben wird, wie die Verbrennung dauert und eine Entladung der Batterie durch unnötig langen Betrieb des Abscheiders vermieden wird.

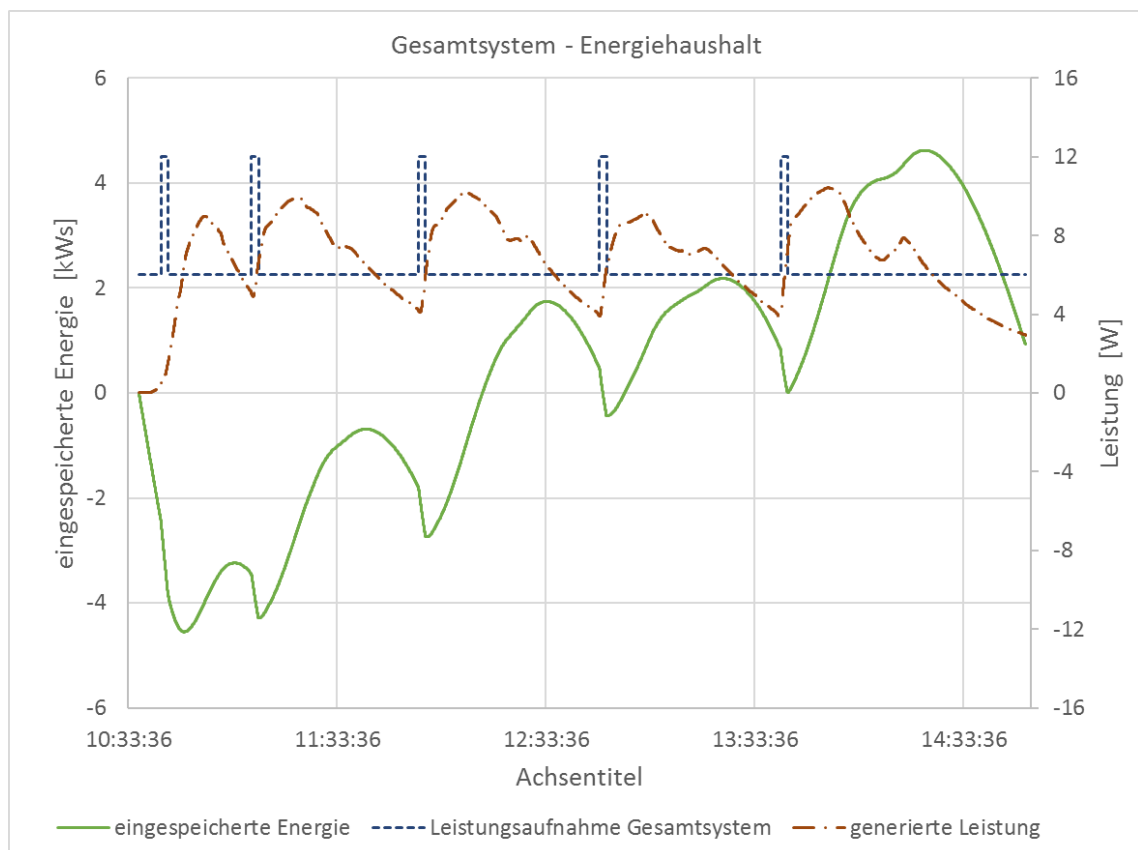


Abbildung 15: Temperaturverläufe und generierte elektrische Leistung für Anfeuern, mehrmaliges Nachlegen und Abbrand mit dem Gesamtsystem

Das Gesamtsystem hat vollumfänglich den Nachweis geliefert, dass mittels neuartiger thermo-elektrischer Generatoren so viel elektrische Leistung erzeugt werden kann, dass die Verbrennungsregelung und der elektrostatischen Abscheider am Ofen energieautark betrieben werden

können. Mit mehr Generatoren kann hier auch noch mehr überschüssige Energie erzeugt und gespeichert werden. Bei den elektronischen Verbrauchern im Gesamtsystem werden ebenfalls noch Potentiale gesehen, diese noch energieeffizienter auszugestalten.

Die Projektziele wurden somit erreicht und der Nachweis geführt, dass Biomassefeuerungsanlagen der Zukunft durch solch ein System auch bezüglich der Feinstaub-Problematik zu emissionsarmen Systemen weiterentwickelt werden können.

3 Betrachtung der Wirtschaftlichkeit/Ökologischer Nutzen

Im Vordergrund des vorliegenden Projekts stand das Ziel eines ökologischen Nutzens. Der Kaminofen der Zukunft sollte daher nicht nur CO₂-neutral und effizient sein, sondern auch „feinstaubfrei“ und minimale CO-Emissionen aufweisen. Da ein großer Teil der Energie solcher Öfen ungenutzt über den Schornstein in die Umgebung abgegeben wird, war das Ziel diese Energie mittels thermoelektrischer Generatoren in Strom umzuwandeln, der zur energieautarken Versorgung, d.h. ohne zusätzliche CO₂-Emissionen, einer Verbrennungsregelung und eines Partikelabscheiders genutzt werden soll. Dieses Ziel wurde im Projekt erreicht.

Durch die Kopplung der beschriebenen Komponenten können sowohl Schadstoff- und Partikelemissionen von Holzfeuerungsanlagen signifikant reduziert werden. Dies umfasst besonders alte Öfen, die mit dieser Technologie nachgerüstet werden können, aber auch neue Öfen, die bereits ab Werk mit der Technologie ausgestattet sind.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit wurde nur die Technologie zur thermoelektrischen Umwandlung von Abgasenergie in elektrischen Strom bewertet, da diese im Wettbewerb zu einer Versorgung aus dem Stromnetz steht. Eine Analyse der Materialkosten hat ergeben, dass sich bereits für geringe Stückzahlen Kosten von ca. 10 Euro pro Watt erreichen lassen. Für größere Stückzahlen und automatisierte Fertigungsverfahren mit vielen Gleichteilen, sind potenziell auch Kosten von weniger als 5 Euro pro Watt denkbar. Abhängig von der Betriebsdauer eines solchen Ofens kann sich neben dem ökologischen Effekt der Nutzung von Energie, die ansonsten einfach ohne Nutzen in die Umgebung abgegeben wird, ein wirtschaftlicher Nutzen durch Amortisation über vermiedene Stromkosten ergeben.

4 Übertragbarkeit der Projektergebnisse

Im Bereich der energieautarken Versorgung einer elektronischen Verbrennungsregelung für Einzelstätten-Holzfeuerungsanlagen hat sich in zahlreichen Gesprächen mit Marktteilnehmern ergeben, dass hier eher der Weg über eine Pufferbatterie gesehen wird, die immer wieder am Stromnetz aufgeladen werden soll.

Für den Bereich des Abscheiders laufen Gespräche in Bezug auf die im Projekt entwickelte Selbstreinigungstechnologie. Diese ist für einige Hersteller von Interesse, weil durch den Einsatz von Formgedächtnislegierungen eine Lösung skizziert wurde, die ganz ohne zusätzliche Hilfsenergie funktioniert. Dies muss noch genauer vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit bewertet werden.

In Bezug auf den neuartigen thermoelektrischen Generator gibt es einige Anfragen zur Übertragung der Technologie in andere Anwendungsfelder. Neben der Nutzung zur Verstromung von Abwärme in größeren Wärmetauschern, ergeben sich hier auch interessante Anwendungsfälle im Bereich der präzisen Temperierung, z.B. auch in Werkzeugmaschinen. So konnte auf Basis der Entwicklungen im vorliegenden Projekt ein gefördertes Projekt zur Temperierung der Spindellager für Hochpräzisions-Werkzeugmaschinen gewonnen werden.

Die Projektergebnisse wurden und werden für eine öffentlichkeitswirksame Darstellung in entsprechenden Fachzeitschriften veröffentlicht. Die außerordentlich gute Einbindung des Fraunhofer IPM in Netzwerke aus Forschungseinrichtungen und Partnern aus der Industrie trägt zudem zum Ergebnistransfer bei. Fraunhofer IPM wird die Projektergebnisse nutzen, um industrielle Anschlussprojekte zu generieren. Von den positiven Projektergebnissen könnte eine Signalwirkung ausgehen, die den Stand der Technik in Bezug auf Partikelemissionen von Holzfeuerungsanlagen bzw. Biomassefeuerungsanlagen neu definieren würde.

5 Öffentlichkeitsarbeit

Die gesammelten Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens wurden bei verschiedenen Fachtagungen vorgestellt. Weiterhin wurden die Arbeiten auf der Messe Progetto Fuoco (4. - 7. Mai 2022, Verona, Italien) erstmals der Öffentlichkeit vorgestellt. Die Progetto Fuoco in Verona ist eine Fachmesse rund um Technologien zur Nutzung alternativer Energiequellen und findet alle zwei Jahre statt. Der thermoelektrische Generator, der in umgekehrter Richtung auch zum Heizen und Kühlen eingesetzt werden kann, wurde auf der InnoTrans 2022 (20. – 23. September 2022, Berlin) der Öffentlichkeit vorgestellt. Für die dezentrale Klimatisierung in Schienenfahrzeugen wurde ein großes Interesse festgestellt.

Nach Projektabschluss sind noch eine Pressemitteilung und die Veröffentlichung der Ergebnisse in einer Fachzeitschrift geplant.

6 Zusammenfassung/Fazit

Im Rahmen dieses Projektes wurde erstmalig erfolgreich der Einsatz eines elektrostatischen Partikelabscheiders in Kombination mit einer Selbstreinigungsfunktion und der Versorgung aus der Abwärme des Ofens durch thermoelektrische Stromerzeugung demonstriert.

Die Erforschung, Entwicklung und Demonstration eines dauerhaft hocheffizienten Partikelabscheiders für den typischen Leistungsbereich von Einzelholzfeuerungsstätten, in Kombination mit passiver, automatischer Reinigung unter dem Einsatz von funktionalen Materialien sind hier hervorzuheben. Durch den Betrieb mit thermoelektrisch erzeugter elektrischer Energie kann der Abscheider und/oder die Verbrennungsregelung zudem fernab von Stromnetzen betrieben werden, oder kann eine wirtschaftliche Alternative zur nachträglichen Installation einer Stromversorgung darstellen.

Aktuell erscheinen die Zielkosten eines solchen Systems für den Einsatz an kleinen Einzelfeuerstätten noch nicht wettbewerbsfähig. Daher sollten sich die weiteren Entwicklungen in Richtung größerer Anlagen konzentrieren. Im aktuellen Entwicklungsstadium können die entwickelten Ansätze noch nicht wirtschaftlich eingesetzt werden. Aufgrund von Skalierungseffekten (Stückzahlenerhöhung) und Optimierungen von Fertigungsschritten bestehen jedoch noch große Kostenreduktionspotentiale.

7 Anlage: Projekterkenntnisse

Darstellung drei wesentlicher Erkenntnisse aus dem Projekt.

(Je Punkt maximal 300 Zeichen.)

1.	Die bisher ungenutzt an die Umgebung abgegebene Energie im Rauchgas von Einzelholzfeuerungsstätten kann mittels neuartiger thermoelektrischer Generatoren in Strom umgewandelt werden und zur Reduktion der gasförmigen Emissionen und der Feinstaubemissionen genutzt werden.
2.	Zur Sicherstellung der auf dem Prüfstand zertifizierten Reduktionspotentiale von elektrostatischen Feinstaubabscheidern sollten diese über eine integrierte Selbstreinigungstechnologie verfügen. Dies sollte nicht dem Betreiber überlassen sein, da sich ansonsten die Realemissionen von den Prüfwerten stark unterscheiden können. (Stichwort: Real Driving Emissions)
3.	Die Idee zur Nutzung der Rest-Abgaswärme zur Reduktion der Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse kann auch auf größere Anlagen übertragen werden, bei denen dann statt einzelner Generatorrohre ganze Rohrbündelreihen in einem Wärmetauscher integriert werden können.

8 Anlage: Referenzen

- [1] K. Schumacher, W. Fichtner, F. Schultmann, Innovations for sustainable biomass utilisation in the Upper Rhine Region, KIT Scientific Publishing, 2017.
- [2] Umweltbundesamt: Emissionsminderung bei Kleinfeuerungsanlagen, 02.12.2016; www.umweltbundesamt.de/daten/luft/strategien-zur-emissionsminderung-von/emissionsminderung-bei-kleinfeuerungsanlagen, letzter Aufruf: 25.10.19
- [3] 1. BImSchV: Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen vom 26. Januar 2010 (BGBl. I S. 38), die zuletzt durch Artikel 2 der Verordnung vom 13. Juni 2019 (BGBl. I S. 804) geändert worden ist.
- [4] Umweltbundesamt: Feinstaub aus Holzfeuerungen: Luftqualitätsgrenzwerte eingehalten, 21.12.2018: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/feinstaub-aus-holzfeuerungen>, letzter Aufruf: 25.10.19
- [5] T. Klingel, Detaillierte experimentelle Untersuchung der Schadstoffbildung bei der Holzverbrennung, 1st ed., Cuvillier Verlag, Göttingen, 2008.
- [6] H. Hartmann (Ed.), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR), Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen: Leitfaden, 3rd ed., Gülzow-Prüzen, 2013.
- [7] DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH, 10. Fachgespräch: Partikelabscheider in häuslichen Feuerungen. 20. März 2019 (2019). [online]. (Tagungsreader, 15). Leipzig: DBFZ. 168 S. ISBN: 978-3-946629-42-9.
- [8] C. Asbach, A.M. Todea, Persönliche Exposition gegenüber ultrafeinen Partikeln im Alltag, Gefahrstoffe- Reinhaltung der Luft 9 (2016) 315–321.
- [9] Umweltbundesamt: Novellierung der Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - Neue Regelungen für Kaminöfen und Holzheizkessel, 03.2010: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3776.pdf>, letzter Aufruf: 25.10.19
- [10] J. von Stackelberg, M. Schmoch, Handbuch Elektrofilter: Physik, Hochspannungsversorgung, Erdung und Auslegung, Springer-Verlag, 2018.
- [11] Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik -UMSICHT-, Sulzbach-Rosenberg, Verbundvorhaben: FRESBI: »Optimierung der Fraktionsabscheidegrade Elektrostatischer Staubabscheider beim Einsatz in Biomassefeuerungen«. Schlussbericht, Sulzbach-Rosenberg, 2019.
- [12] J. Wöllenstein, R. Baumann, S. Rademacher, R. Stich, F. Hammer, Japan Association of Chemical Sensors: 10th International Meeting on Chemical Sensors 2004. Technical digest: July 11 - 14, 2004, Tsukuba, Japan. Fukuoka: Japan Association of Chemical Sensors, 2004. (Chemical sensors 20.2004, Suppl.B) (2004) 236-237.

- [13] LAMTEC Meß- und Regeltechnik für Feuerungen GmbH & Co. KG: CO/O₂-Regelung für Industriefeuerungsanlagen: https://www.lamtec.de/produkte/feuerungsoptimierung.html?tx_lamtecmemberdownload_memberdownload%5Bdownload%5D=567&cHash=2158d5736b67c6027348ee94fdefc7e5, letzter Aufruf: 25.10.19
- [14] M. Aleysa, F. Hammer, Es liegt was in der Luft, HLH Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik 06 (2019) 1–5.
- [15] M. Aleysa, P. Leistner, Intelligentes Kombinationssystem (VREM-SYSTEM) zur regelungstechnischen Optimierung der Verbrennung und zur Vermeidung der Fehlbedienung in Biomasseheizkesseln durch den Einsatz der O₂/CO_e-Sonde Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (03KB109A), Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart, 2019.
- [16] A. Berhardt, B. Groß, D. Hövelmann, S. Schulte, S. Casparis, D. Hegele, T. Uhle, IntElekt - Integrierter Elektrofilter im Kleinserientest Endbericht zum Vorhaben Laufzeit: 01.10.2014-31.03.2018, IZES gGmbH, Saarbrücken, 2018.
- [17] V. Lenz, D. Thrän, D. Pfeiffer, Messmethodensammlung Feinstaub Methodenvorschlag zur Feinstaubfassung an Feuerungsanlagen für feste biogene Brennstoffe, 2014 1st ed., DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum, Leipzig, 2014.