



Schlussbericht vom 19. September 2019

Staubförmiger Biomasse-Brennstoff für den Thermoölprozess



Verteilzentrum und Grossbäckerei Coop in Schafisheim mit Energiezentrale. Quelle: Coop 2016



eicher+pauli



Datum: 19. September 2019

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfängerin:

Coop Genossenschaft
Thiersteinerallee 12
Postfach 2550
4002 Basel
www.coop.ch

Autoren:

Thomas Nussbaumer, Verenum, 8006 Zürich, thomas.nussbaumer@verenum.ch
Adrian Lauber, Verenum, 8006 Zürich, thomas.nussbaumer@verenum.ch
Philippe Hennemann, eicher+pauli, 4410 Liestal, philippe.hennemann@eicher-pauli.ch
Thomas Meierhans, Coop Genossenschaft, 5503 Schafisheim, thomas.meierhans@coop.ch
David Guthoerl, Coop Genossenschaft, 4002 Basel, david.guthoerl@coop.ch
Sebastian Jacquet, Coop Genossenschaft, 4002 Basel, sebastian.jacquet@coop.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Daniel Binggeli, daniel.binggeli@bfe.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501051-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren verantwortlich.



Zusammenfassung

Im Projekt wurde eine Biomassefeuerung realisiert, die mit Waldhackschnitzel unter Zumischung von Müllereinebenenprodukten (MNP) betrieben und für Prozesswärme mittels auf 285 °C erhitztem Thermoöl genutzt wird. Die Wärme dient zur Versorgung der Bäckerei und des Verteilzentrums von Coop in Schafisheim. Die Biomassefeuerung verfügt über 2.5 MW Leistung im Thermoöl und 0.4 MW als Heisswasser. Zur Spitzenlastdeckung kommen zwei fossile Wärmeerzeuger zum Einsatz.

Im Rahmen des P+D-Projekts erfolgten Abklärungen zu Logistik und Potenzial, der Bau und die Inbetriebnahme der Anlage sowie eine Erfolgskontrolle und Betriebsoptimierung. Für den Betrieb wurden zu folgenden Kenngrössen Zielwerte definiert: Biogener Deckungsgrad, Anteil MNP, Emissionen an Kohlenmonoxid, Stickoxiden und Staub sowie Wirkungsgrad. Übergeordnetes Ziel des Projekts ist eine Reduktion der CO₂-Emissionen im Vergleich zu einer fossilen Energieversorgung. Zusätzlich soll die Zumischung von MNP die Nutzung eines in der Produktionskette anfallenden Reststoffs ermöglichen, um damit für andere Zwecke nutzbares Energieholz zu substituieren.

Die im Projekt gemachten Erfahrungen zeigen, dass mit der Anlage zwar eine deutliche CO₂-Reduktion erreicht werden kann, der Aufwand zur Nutzung der Biomasse Mischung aber unterschätzt und nicht alle Ziele erreicht wurden. Die Zielerreichung und die Herausforderungen zur Nutzung von Biomasse für den Thermoöl-Prozess sind im Bericht beschrieben.



Résumé

Dans le cadre du projet, un chauffage à biomasse a été réalisé, qui fonctionne avec des copeaux de bois mélangés à des sous-produits de scierie (SPS) et est utilisé pour la chaleur industrielle au moyen d'huile thermique chauffée à 285 °C. La chaleur est utilisée pour alimenter la boulangerie et le centre de distribution Coop à Schafisheim. Le chauffage à biomasse a une capacité de 2,5 MW en huile thermique et 0,4 MW en eau chaude. Deux générateurs de chaleur fossile sont utilisés pour couvrir les charges de pointe.

Dans le projet de P+D, la logistique et le potentiel, la construction et la mise en service de l'usine ainsi qu'une évaluation des performances et une optimisation opérationnelle ont été exécutés. Pour l'exploitation, des valeurs cibles ont été définies pour les paramètres suivants : couverture biogénique, proportion de SPS, émissions de monoxyde de carbone, d'oxydes d'azote et de poussières ainsi que le rendement. L'objectif global du projet est de réduire les émissions de CO₂ par rapport aux combustibles fossiles. En outre, le mélange de SPS est destiné à permettre l'utilisation d'une matière résiduelle issue de la chaîne de production afin de remplacer le bois énergétique utilisable à d'autres fins.

L'expérience acquise dans le cadre du projet montre que, bien qu'une réduction significative des émissions de CO₂ puisse être obtenue avec l'installation, le coût et les frais d'exploitation d'utilisation du mélange de biomasse ont été sous-estimés et que pas tous les objectifs ont pas été atteints. La réalisation des objectifs et les défis liés à l'utilisation de la biomasse pour le traitement de l'huile thermique sont décrits dans le rapport.



Summary

In the project, a biomass boiler was realised, which is operated with wood chips mixed with mill by-products (MBP) and used for process heat by means of thermal oil heated to 285 °C. The heat is used to supply the bakery and the distribution centre of Coop in Schafisheim. The biomass boiler has a capacity of 2.5 MW in thermal oil and 0.4 MW as hot water. Two fossil heat generators are used to cover peak loads.

As part of the P+D project, the logistics and potential, the construction and commissioning of the plant as well as a performance test and operational optimization were performed. Target values were defined for the following parameters: biogenic coverage, proportion of MBP, emissions of carbon monoxide, nitrogen oxides and dust as well as efficiency. The overall objective of the project is to reduce CO₂ emissions compared to a fossil fuel supply. In addition, the admixture of MBP is intended to substitute energy wood that can be used for other purposes by a residual material from the production chain.

The experience gained in the project shows that a significant CO₂ reduction can be achieved, however the cost and maintenance of using the biomass mixture has been underestimated and not all targets have been achieved. The achievement of the targets and the challenges for the use of biomass for the thermal oil process are described in the report.



Take-home messages

- Die Nutzung von Reststoffen aus der Nahrungsmittelproduktion weist ein hohes Potenzial zur Energieerzeugung auf und die Verwendung von Getreiderückständen als Brennstoff ist aus Sicht der Ressourcenschonung vielversprechend.
- Der Einsatz von Energieholz und Getreiderückständen zur Thermoölerhitzung für Prozesswärme hat sich in Bezug auf Anlagentechnik und Kapitalkosten und auch in Bezug auf Unterhalt und Betriebskosten als sehr aufwändig herausgestellt. Dies gilt selbst für die mit fossilen Zusatzwärmeerzeugern ausgeführte Anlage und der Aufwand wurde insgesamt deutlich unterschätzt.
- Der Nutzen der Zufeuerung von Müllereinebenenprodukten (MNP) im Vergleich zu einer reinen Holzfeuerung wurde überschätzt und der Zielwert für den MNP-Anteil wurde nicht erreicht.
- Für die Hauptkomponente der Feuerung mit Feuerungsregelung und Wärmeübertrager mit Abreinigung zur Nutzung biogener Brennstoffe besteht Entwicklungsbedarf. Demgegenüber funktioniert die Feinstaubabscheidung einwandfrei.
- Die Betriebserfahrungen zeigen, dass die Regelungstechnik von Biomasseanlagen wichtig ist und dass dazu unter anderem folgender Handlungsbedarf besteht:
 1. Die Bandbreite der Brennstoffeigenschaften zum Einsatz in der Feuerung musste eingeschränkt werden, weil die Feuerungsregelung die erwartete Flexibilität nicht ermöglicht.
 2. Bis anhin wird ein zu grosser Teil der Wärme fossil erzeugt, wofür auch die Regelung der Gesamtanlage verantwortlich ist, die noch optimiert werden kann.
 3. Die Regelung der SNCR-Anlage führte im ursprünglichen Zustand zu einem sehr ungünstigen Betrieb mit hohen Betriebskosten und schädlichen Nebenprodukten. Da dies ohne Überwachung und Kenntnis des Verfahrens nicht erkannt werden kann, ist eine regelmässige Kontrolle und Einstellung des Betriebs der SNCR-Einrichtung notwendig.
- Wegen der hohen Komplexität der Anlage hat sich eine Erfolgskontrolle mit regelmässiger Auswertung der Betriebsdaten zur Begleitung der Inbetriebnahme und Optimierung als notwendig bestätigt. Diese kann eine schrittweise Optimierung der Anlage mit technischen und betrieblichen Massnahmen unterstützen und als Basis für eine fortgesetzte Anlagenüberwachung dienen.
- Die Inbetriebnahme einer anspruchsvollen Biomasseanlage sollte zu einem Zeitpunkt erfolgen, wenn ein ausreichender Wärmebedarf sichergestellt werden kann. Ein Beginn der Inbetriebnahme während des Hochfahrens des Wärmeverbrauchers mit noch nicht gesichertem Wärmebedarf hat sich dagegen als aufwändig und langwierig erwiesen. Zudem hat sich gezeigt, dass die Ressourcen zur Umsetzung von Optimierungsmassnahmen beim Wärmerezeuger in einem frühen Stadium des Projekts teilweise noch durch die Inbetriebnahme der Wärmeverbraucher beansprucht waren, weshalb einige für die Biomassezentrale notwendigen Massnahmen nicht mehr innerhalb der Gewährleistungsfristen umgesetzt werden konnten.
- Die kontinuierliche Emissionsüberwachung mit Auswertung durch einen TÜV-zertifizierten Messrechner genügt nicht, um damit die Einhaltung der Luftreinhalte-Verordnung zu Handen der Behörde nachzuweisen. Dazu ist eine zusätzliche Datenaufarbeitung mit einer Jahresauswertung und Beurteilung des An- und Abfahrens erforderlich.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	4
Summary	5
Take-home messages	6
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Ausgangslage und Hintergrund	9
1.2 Motivation des Projektes	10
1.3 Projektziele	11
2 Anlagenbeschrieb	12
3 Vorgehen und Methode	15
3.1 Projektorganisation.....	15
3.2 Erfolgskontrolle.....	16
4 Ergebnisse und Diskussion	17
4.1 Zeitverlauf von Emissionen und Kenngrößen	17
4.2 Biomasseanteil an der Wärmeerzeugung	20
4.3 MNP-Anteil am Biomassebrennstoff.....	20
4.4 CO-Emissionen	22
4.5 NO _x -Emissionen	24
4.6 Abgasentstickung mit SNCR	25
4.7 Feinstaubemissionen und Verfügbarkeit des Elektroabscheiders.....	27
4.8 Wirkungsgrad	28
4.9 Brennstoffverbrauch	28
4.10 Aschemengen.....	29
4.11 Saisonbetrieb.....	30
4.12 Dynamisches Verhalten des Wärmebedarfs	32
4.13 Verschmutzung.....	34
5 Schlussfolgerungen und Fazit	36
5.1 Potenzial und Logistik.....	36
5.2 Betrieb und Optimierung.....	37
6 Ausblick und zukünftige Umsetzung	39
7 Nationale und internationale Zusammenarbeit	40
8 Kommunikation	41
9 Publikationen	42
10 Literaturverzeichnis	42
11 Anhang	43
11.1 Berechnungen der Wärmeleistungen aus dem Leitsystem	43
11.2 Auswertung der Emissions- und Feuerungsdaten.....	44
11.3 Berechnung des MNP-Anteils	45



Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
LRV	Luftreinhalte-Verordnung
MNP	Müllereinebenprodukt(e)
CO	Kohlenmonoxid
NO _x	Stickoxide (NO und NO ₂)
O ₂	Sauerstoff



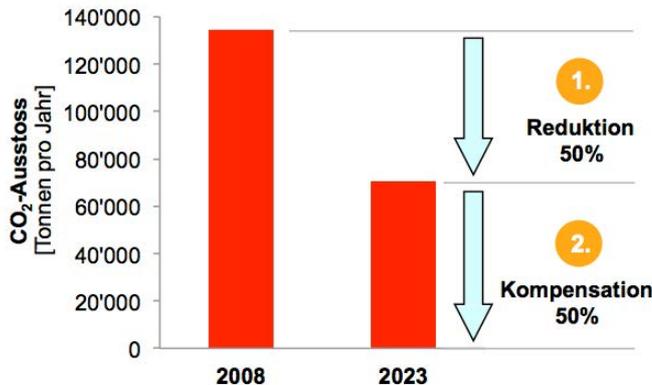
1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Ein grosser Teil des weltweiten Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen fallen bei Produktion, Transport, Verkauf und Gebrauch von Produkten und bei der Erbringung von Dienstleistungen an. Die Coop Genossenschaft ist als grösstes Detail- und Grosshandelsunternehmen der Schweiz deshalb der Überzeugung, dass den Unternehmen eine zentrale Rolle für den Klimaschutz zukommt. Für die Aktivitäten von Coop in der Schweiz verteilen sich die CO₂-Emissionen wie folgt auf die einzelnen Prozessschritte [Weinhofer et al. 2016]:

- Produktionsbetriebe 3%
- Verteilzentralen/Bäckereien 14%
- Warentransport 39%
- Verkaufsstellen 44%

Der Einsatz erneuerbarer Energieträger ist deshalb ein zentrales Thema der Nachhaltigkeitsanstrengungen von Coop. Im Jahr 2008 hat Coop die Vision formuliert, bis 2023 im Bereich Detailhandel CO₂-neutral zu sein. Dies bedeutet, dass zuerst alle technisch möglichen und finanziell zweckmässigen Massnahmen ergriffen werden, um bis 2023 den von Coop verursachten CO₂-Ausstoss so weit wie möglich zu reduzieren. Derjenige Teil der CO₂-Emissionen, der nur mit unverhältnismässigen Kosten oder gar nicht vermieden werden kann, wird ab 2023 über geeignete Projekte kompensiert (Bild 1).



1. Ziel: Bis 2023 den absoluten jährlichen CO₂-Ausstoss so weit technisch möglich und finanziell zweckmässig reduzieren.

2. Ziel: Ab 2023 verbleibende CO₂-Emissionen über externe Projekte kompensieren.

Bild 1 Coop Vision 2023 zur CO₂-Reduktion.

Das gesamte Unternehmen wurde im Hinblick auf Potenziale für die Reduktion des Energiebedarfs sowie den Einsatz erneuerbarer Energien in den Bereichen Wärme, Strom und Treibstoff durchleuchtet. Ein grosser Wärmeverbraucher von Coop sind die industriellen Bäckereien/Konditoreien. Diese hatten 2008 einen CO₂-Ausstoss von rund 20 000 Tonnen. Es wurde das Ziel festgelegt, diesen Ausstoss bis 2023 um 70 % auf 6000 Tonnen pro Jahr zu reduzieren. Vom Ingenieurbüro eicher+pauli wurde die Idee eingebracht, das für die Backöfen notwendige rund 300°C heisse Thermoöl nicht wie bis anhin durch Verbrennung von Erdgas und Heizöl zu erhitzen, sondern durch Verbrennung von Holzschnitzeln. Auf dieser Basis wurde ein Pilotprojekt in Gossau (SG) realisiert. Als erste industrielle Bäckerei der Schweiz nutzt die Coop-Grossbäckerei Gossau seit November 2011 eine Holzschnitzelfeuerung zur Erhitzung des Thermoöls für die Backöfen. Dadurch wird der jährliche CO₂-Ausstoss um rund 70 % oder 900 Tonnen pro Jahr reduziert. Im Rahmen der Bäckereistrategie 2015+ hat Coop entschieden, die Standorte Basel, Chur und Wallisellen zu schliessen und dafür eine neue Grossbäckerei/Konditorei in Schafisheim zu errichten. In dieser werden pro Jahr 40 000 Tonnen Mehl zu 45 000 Tonnen Brot (Frisch



und Tiefkühl) und 15 000 Tonnen Backwaren (Torten, Patisserie, Wähen, Cakes, Verkaufsteige, Feingebäcke) verarbeitet und pro Tag unter anderem 100 000 Zöpfe und 200 000 Brote produziert. Schafisheim ist damit die grösste Bäckerei/Konditorei der Schweiz mit über 1500 m² Backfläche. Zum Vergleich beträgt der jährliche Brotkonsum in der Schweiz rund 50 kg pro Person, die Produktion von Schafisheim deckt somit den Bedarf rund 1 Mio. Einwohner. Die Backöfen in Schafisheim haben einen jährlichen Wärmebedarf von etwa 20 GWh. Für die Produktion von 60 000 t Brot und Backwaren entspricht dies einem mittleren Energieverbrauch von rund 0.33 kWh pro kg Backgut. Bei einem Heizwert von rund 4.5 kWh pro kg Getreide werden zur Deckung des Energieaufwands für den Backprozess somit rund 7.5 % des Getreides benötigt. Da 25 % Rückstände anfallen, genügen rund 30 % der MNP zur Deckung des Energiebedarfs.

1.2 Motivation des Projektes

Die Motivation für das Projekt ist, Biomasse als erneuerbaren Energieträger zur Substitution fossiler Energieträger für den Wärmebedarf von rund 20 GWh pro Jahr am Standort Schafisheim zu nutzen und damit zur Vermeidung von CO₂-Emissionen beizutragen.

Da Energieholz nur beschränkt verfügbar ist und auch für andere Anwendungen zur Substitution von Heizöl und Erdgas genutzt werden kann, soll im Projekt ein Teil der Energie aus zur Lebensmittelherstellung nicht verwertbaren Müllerebenenprodukten (MNP) erzeugt werden. MNP fallen als staubförmige Biomasse an, die zu Pellets verpresst werden können (Bild 2).

Durch Nutzung von MNP soll das eingesparte Energieholz für andere Anwendungen verfügbar gemacht werden. Durch die Verwendung von biogenen Rückständen soll zudem demonstriert werden, dass in Zukunft nebst Holz auch biogene Rückstände für die energetische Nutzung eingesetzt werden können und der Anteil der Biomasse an der Energieversorgung dadurch vergrössert werden kann.



Bild 2 Müllerebenenprodukte (MNP) nach Anfall im Mahlprozess (links) und als Pellets (rechts) aus zwei unterschiedlichen Chargen (oben und unten).



1.3 Projektziele

Im Projekt soll eine Energiezentrale zur Versorgung der Verteilzentrale und der Grossbäckerei in Schafisheim (Kanton Aargau) realisiert werden, die mit Biomasse als Hauptbrennstoff betrieben wird und zur Versorgung der Backlinien Thermoöl auf knapp 300°C erhitzt. Als Brennstoff soll ein Gemisch aus Waldhackschnitzeln und Getreiderückständen in Form von Müllereinebenenprodukten eingesetzt werden. Für Waldhackschnitzel ist ein Wassergehalt von bis zu 50 % vorgesehen, während MNP in trockenem Zustand zugemischt werden sollen. Das Projekt umfasst fünf Arbeitspakete (AP) mit folgenden Zielen:

AP1 – Betrieb (Leitung: Philippe Hennemann, eicher+pauli):

Ziel: Pilot-Betrieb der Thermoöl-Heizzentrale mit staubförmigem Biomasse-Brennstoff.

AP2 – Potenzial (Leitung: Beat Nussbaumer, eicher+pauli):

Ziel: Aufzeigen der Potenziale staubförmiger Biomasse-Brennstoffe in der Schweiz.

AP3 – Logistik (Leitung: Philippe Hennemann, eicher+pauli):

Ziel: Optimierung der Aufbereitung und Logistik von Getreiderückständen zur Nutzung als staubförmiger Biomasse-Brennstoff.

AP4 – Optimierung (Leitung: Thomas Nussbaumer, Verenum):

Ziel: Optimierung und Erfolgskontrolle der Verbrennung des staubförmigen Biomasse-Brennstoffes.

AP5 – Kommunikation (Leitung: Georg Weinhofer, Coop):

Ziel: Kommunikation und Technologie-Transfer zur Förderung von staubförmigen Biomasse-Brennstoffen für Thermoölprozesse in der Schweiz.

Die Resultate zum **AP 2 (Potenzial)** sind in folgenden Berichten dokumentiert:

Teil 1: Sres, A.: *Staubförmiger Biomassebrennstoff für den Thermoölprozess, AP 2 – Potenzial Teil 2: Technologie*, eicher+pauli, Bern 27.3.2015

Teil 2: Hälgl, L.; Nussbaumer, T.: *Staubförmiger Biomassebrennstoff für den Thermoölprozess, AP 2 – Potenzial, Teil 1: Mengen und Brennstoffeigenschaften*, Verenum Zürich 31.3.2015

Die Resultate zum **AP3 (Logistik)** sind in folgendem Bericht dokumentiert:

Trecco, S.; Hennemann, P.: *Projekt Staubförmiger Biomasse-Brennstoff für den Thermoölprozess: Optimierung der Aufbereitung und Logistik von MNP*, eicher+pauli, Bern und Liestal 3.3.15

Der Schlussbericht gibt eine Übersicht zu **AP 5 (Kommunikation)** und beschreibt die Resultate von **AP 1 (Anlagenbetrieb)** und **AP4 (Optimierung)**, die folgenden Ziele verfolgen:

1. Der biogene Deckungsgrad zur Wärmeerzeugung soll > 70 % erreichen.
2. Die Biomassefeuerung soll mit 50 % Energieanteil an MNP betrieben werden können.
3. CO-Emissionen < 250 mg/m³ bei 11 Vol.-% O₂ (Grenzwert nach LRV).
4. NO_x-Emissionen < 180 mg/m³ bei 11 Vol.-% O₂ als Mittelwert über eine Woche (durch kantonale Behörde vorgegebener und gegenüber LRV verschärfter Emissionsgrenzwert).
5. Staubemissionen < 10 mg/m³ bei 11 Vol.-% O₂ während Abnahmemessung sowie korrekte Bestimmung der Verfügbarkeit im Praxisbetrieb mit Nachweis einer hohen Verfügbarkeit.
6. Bei der Auftragsvergabe wurde ein Garantiewert für den Feuerungswirkungsgrad von 85 % gefordert. Diese Anforderung wird hier gegenüber der Projekteingabe als zusätzlicher Zielwert ergänzt.



2 Anlagenbeschreibung

In der Energiezentrale kommen eine Biomassefeuerung mit einer Leistung von 2.9 MW (2.5 MW Thermoöl und 0.4 MW Abgaswärmenutzung) sowie zwei fossile Feuerungen mit Öl/Gas und einer Leistung von 2 x 3.5 MW zum Einsatz (Bild 3).

Im Thermoölkessel wird Thermoöl zum Backprozess auf 285 °C erhitzt. Zusätzlich wird für die Dampfproduktion, die zur Herstellung diverser Backwaren benötigt wird, Heisswasser mit 145 °C erzeugt. Pro Tag werden nach Auslegung 45 m³ Hackschnitzel und 12 m³ MNP aus zwei getrennten Silos zugeführt. Die Biomassefeuerung liefert die Grundlastwärme und die fossilen Kessel dienen als schnell reagierende Spitzenabdecker. Das Thermoöl wird mit Hauptpumpen durch Rohrleitungen in einem Energiekanal zur Bäckerei gefördert, wo es in den einzelnen Backöfen als Heizmedium fürs Brotbacken verwendet wird. Das in den Abgasen der Biomassefeuerung ausgekoppelte Heisswasser dient der Grundlastdampferzeugung. Damit das Backgut die typisch glänzende Oberfläche erhält, wird es, wie beispielsweise ein Zopf, im Ofen bedampft. Die Spitzendampfproduktion wird über das Thermoölsystem mittels Umformer gewährleistet.

Für den Betrieb der Anlage sind die Emissionsgrenzwerte nach Luftreinhalte-Verordnung (LRV) für Kohlenmonoxid (CO) von 250 mg/m³ (bei 11 Vol.-% O₂) und für gasförmige organische Verbindungen von 50 mg/m³ einzuhalten. Für die Stickoxidemissionen (NO_x) ist gilt ein Grenzwert von 180 mg/m³, der bei Verbrennung von MNP mittels SNCR-Verfahren unterschritten werden soll und über eine Betriebswoche einzuhalten ist. Aufgrund des Massnahmenplans ist der Staubgrenzwert gegenüber der LRV von 20 mg/m³ auf 10 mg/m³ verschärft. Zudem ist die Verfügbarkeit des Elektroabscheiders während des Feuerungsbetriebs zu überwachen und nachzuweisen.

Auf Basis von Vorversuchen wurde eine Anlagentechnik von KCO Cogeneration und Bioenergie GmbH (Kohlbach-Gruppe) mit folgenden Komponenten ausgewählt und wie in Bild 4 bis Bild 6 gezeigt ausgeführt:

- Brennstoffzufuhr mit Mischung von Hackschnitzel und MNP-Pellets aus separaten Silos. Das MNP-Silo ist zur Erfassung und Dosierung der MNP mit Wägezellen ausgerüstet.
- Beschickung der Feuerung über Stössel.
- Vorschubrostfeuerung mit Wasserkühlung sowie Abgasrezirkulation im Rost- und Sekundärluftbereich zur Begrenzung der Brennkammertemperatur auf 900 °C (Bild 4).
- Thermoölkessel mit segmentweiser Abreinigung.
- Abgasentstickung mit selektiver nicht katalytischer Reduktion (SNCR) mit Eindüsung von Harnstofflösung im Feuerraum und Regelung mit NO_x-Messung im Reingas (Fabrikat ERC Technik GmbH).
- Elektroabscheider in Plattenbauweise (Fabrikat Scheuch GmbH).
- Kontinuierliche Abgasmessung von CO, NO_x, O₂ und Abgastemperatur (Fabrikat ABB).

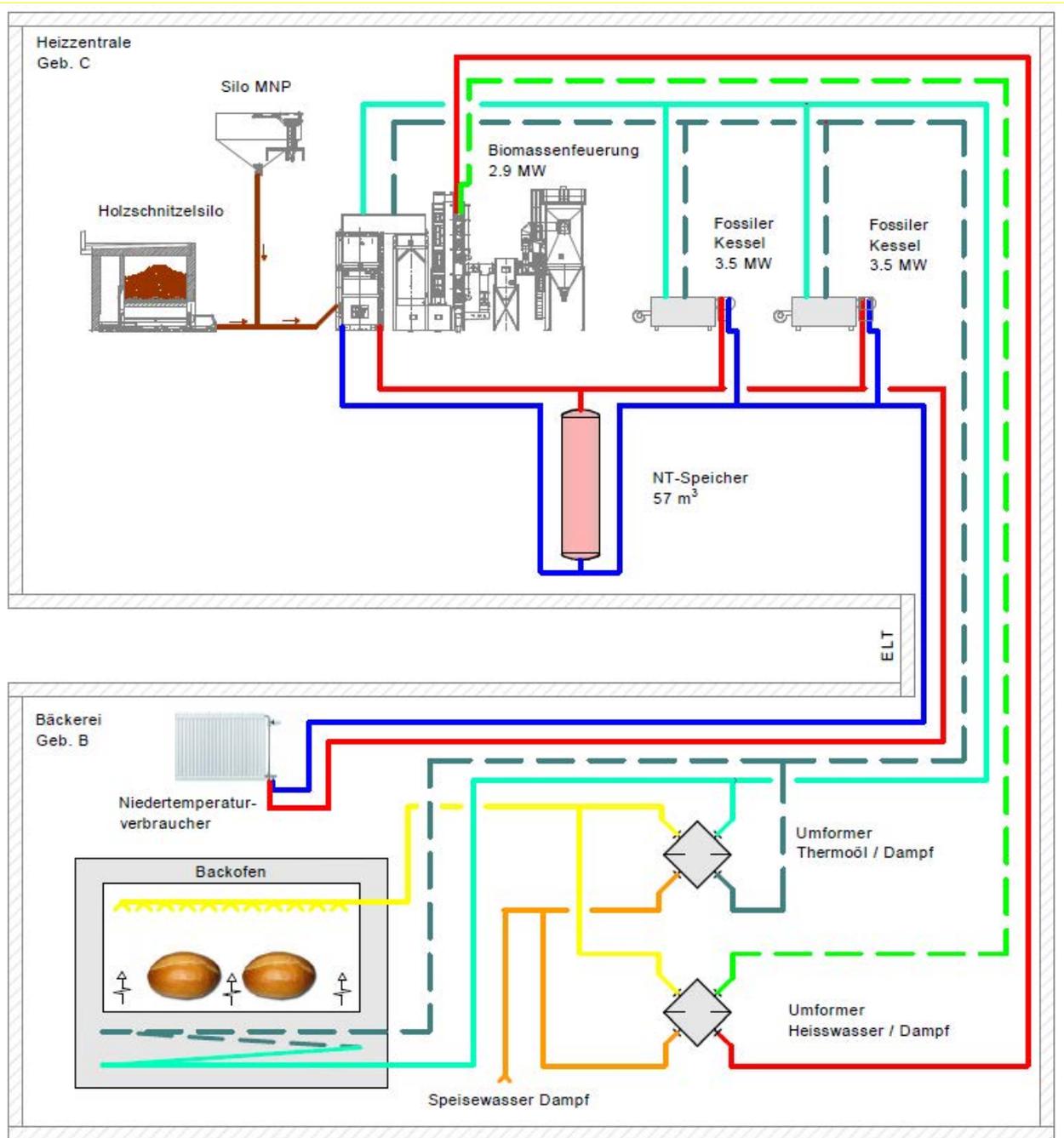


Bild 3 Anlagenschema (eicher+pauli).

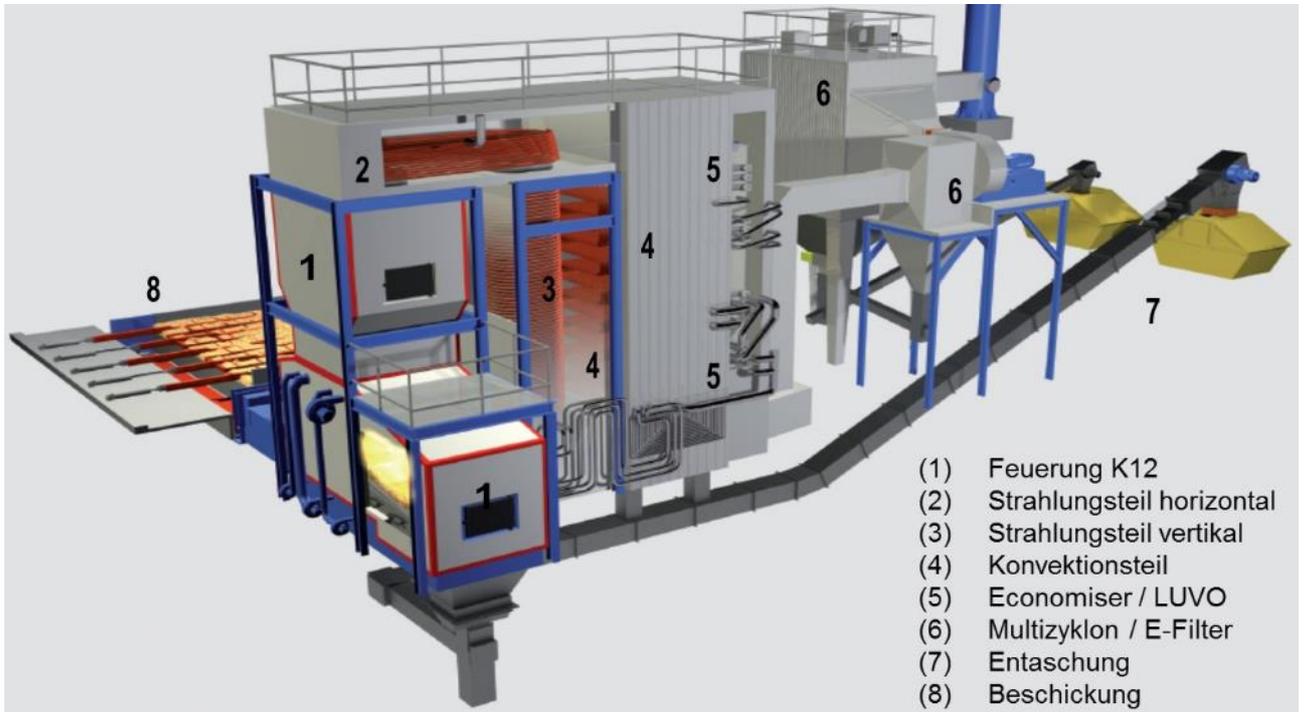


Bild 4 Feuerungsanlage (KCO Cogeneration und Bioenergie GmbH).



Bild 5 Elektroabscheider (Scheuch GmbH).



Bild 6 Biomasseanlage mit Feuerung (rechts), Strahlungsteil (mitte) und Konvektionsteil (links).



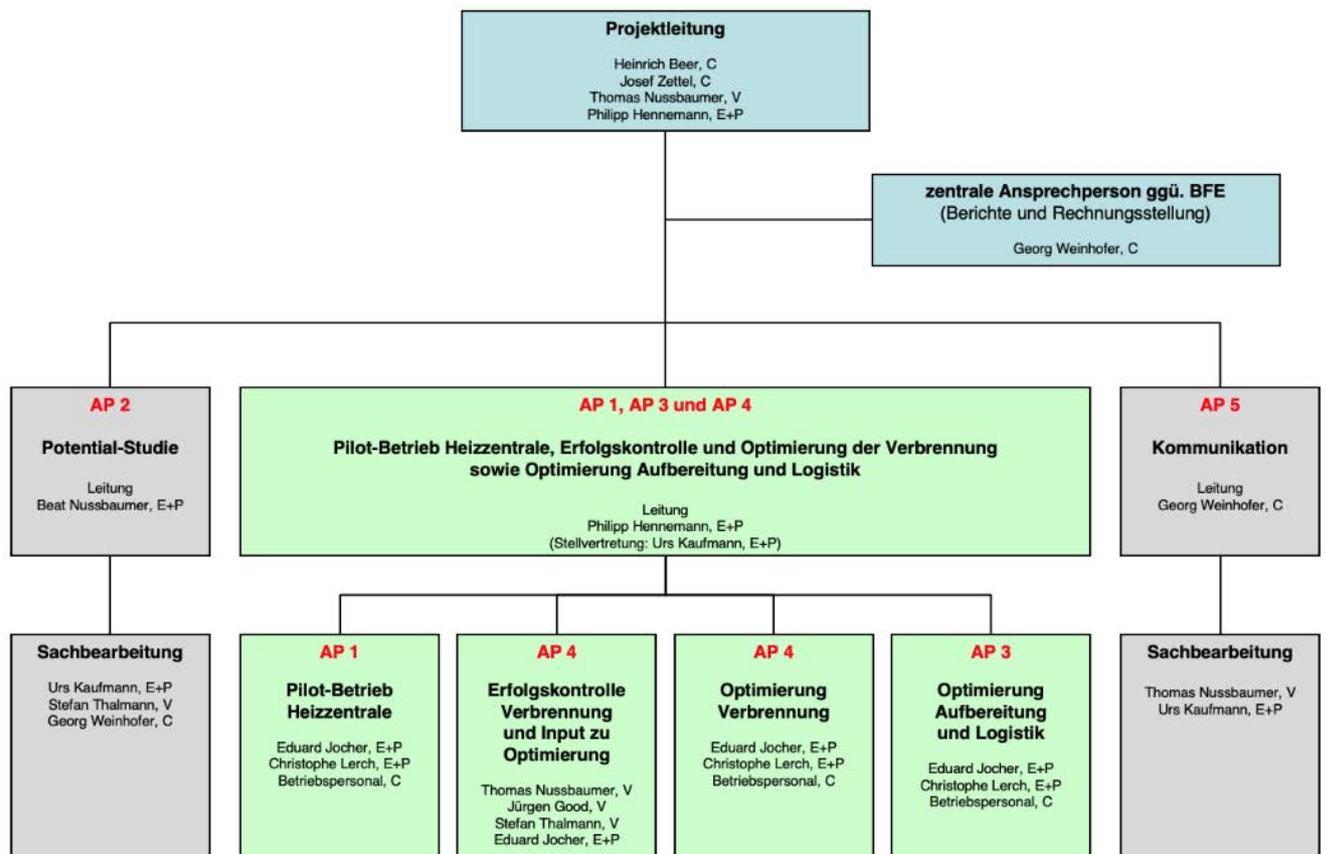
3 Vorgehen und Methode

3.1 Projektorganisation

Das Projekt erfolgte in Zusammenarbeit der folgenden drei Projektpartner:

- Coop Genossenschaft, Basel (im Weiteren als Coop bezeichnet)
- Ingenieurbüro Verenum, Zürich (im Weiteren als Verenum bezeichnet)
- Dr. Eicher+Pauli AG, Liestal (im Weiteren als eicher+pauli bezeichnet).

Für die Projektleitung wurde ein Leitungsteam mit Vertretern aller Projektpartner gebildet. Bild 7 zeigt die Organisation mit den bei Projektstart verantwortlichen Personen. Während des Projekts gab es personelle Änderungen. Die Autorenschaft des vorliegenden Schlussberichts deckt die zum Zeitpunkt des Projektabschlusses verantwortlichen Personen ab.



AP = Arbeitspaket entsprechend Projektziele im Gesuch (Kapitel 5)
C = Coop
E+P = Eicher+Pauli
V = Verenum

Bild 7 Organigramm mit Personen zum Zeitpunkt des Projektstarts.



Die Bearbeitung erfolgte in den fünf Arbeitspaketen unter Leitung je eines Teilprojektleiters. Die Realisierung der Biomassezentrale sowie der Anlagenbetrieb wurden von eicher+pauli koordiniert. Die Installation und Inbetriebnahme erfolgte durch die mit dem Bau beauftragten Unternehmer, die im Anschluss auch das Betriebspersonal von Coop schulte. Parallel zur Planung und Vorbereitung der Installation wurde von Verenum die Erfolgskontrolle mit Erfassung der wichtigsten Betriebsdaten vorbereitet und nach der Inbetriebnahme installiert und aufgeschaltet. Ab der Inbetriebnahme erfolgte während mehreren Monaten jeweils eine fallweise Auswertung der Betriebsdaten über bestimmte Betriebsphasen und mit teilweise spezifischen Fragestellungen. Besondere Fragen betrafen dabei etwa die Menge der Harnstoffeindüsung für das SNCR-Verfahren oder die Aufteilung Biomasseleistung in Holz und MNP. Nach Ablauf des ersten Betriebsjahres wurde eine standardisierte monatliche Auswertung mit Mittelwertbildung und Dokumentation besonderer Ereignisse etabliert und monatlich ein Messbericht erstellt und an das Projektteam verschickt. Diese Berichte dienten als Basis zur periodischen Beurteilung der Zielerreichung und zur Ableitung von technischen und betrieblichen Massnahmen zur Optimierung der Anlage.

3.2 Erfolgskontrolle

Zur Beurteilung des Anlagenbetriebs und der Schadstoffemissionen wurden in einem von Verenum zusätzlich installierten System von September 2016 bis Mai 2019 Daten aufgezeichnet. Betriebsdaten der Biomassefeuerung und Messwerte des Emissionsmessrechners wurden mit einer Zeitauflösung von einer Sekunde aus der Steuerung der Biomassefeuerung erfasst. Die Messwerte von CO, NO_x und O₂ wurden vom Emissionsmessrechner mittels Analogsignal an die Steuerung der Biomassefeuerung übertragen. Beim Emissionsmessrechner wurde nachträglich der obere Messbereich der CO-Messung aktiviert, damit auch CO-Konzentrationen über 750 ppm erfasst werden können. Da bei der Signalübertragung an die Biomassefeuerung die Übertragung des Messbereichs nicht vorgesehen war und auch nicht nachgerüstet wurde, sind ab diesem Zeitpunkt für CO-Messwerte über 150 ppm ein hoher und ein tiefer Messwert möglich. Für die Regelung der Biomassefeuerung ist dies unkritisch, aber für die Erfolgskontrolle ergab sich daraus ein Unsicherheitsbereich, was die Beurteilung des Feuerungsbetriebs jedoch nicht beeinflusst. Im Emissionsmessrechner sind dagegen die korrekten Messwerte abgelegt. Die Daten zur in der Heizzentrale produzierten Wärmeenergie wurde aus dem Gebäudeleitsystem mit einer Zeitauflösung von 15 Minuten zur Verfügung gestellt.

Für die Beurteilung des Anlagenbetriebs wurden aus den aufgezeichneten Daten Kenngrössen wie Leistungen, Wirkungsgrade und Verfügbarkeit berechnet. In monatlichen Berichten wurden Zeitverläufe und Mittelwerte dieser Kenngrössen zur Beurteilung der Zielgrössen erstellt und Optimierungspotenzial beschrieben. Dazu wurden beim Betrieb der Biomassefeuerung mehrere Betriebszustände gesondert beurteilt. Kesselleistungen von mehr als 30 % der Nennleistung (750 kW) wurden als Regelbetrieb bewertet, was den Vorgaben des Feuerungslieferanten für die untere Leistungsgrenze entspricht. Kesselleistungen zwischen 4 % und 30 % (grösser 100 kW) traten an den Wochenenden auf und wurden als An- und Abfahren oder auch Glutbettunterhalt bezeichnet und liegen ausserhalb des vom Feuerungslieferanten garantierten Betriebsbereichs. Zusätzlich wurden auch Betriebsphasen mit Temperatur- und Leistungssprüngen im Thermoöl-Netz gesondert ausgewiesen.

Zur Beurteilung der Emissionen wurden Stunden- und Tagesmittelwerte mit den Anforderungen der Luftreinhalte-Verordnung (LRV Art. 15) verglichen. Das Vorgehen zur Beurteilung von An- und Abfahrprozessen und Lastabsenkungen an den Wochenenden in der LRV nicht festgelegt ist, wurde ein detaillierter Vorgehensvorschlag zu Händen der Vollzugsbehörde erarbeitet [Nussbaumer et al. 2019]. Beispielhaft wurden damit die Betriebsdaten des Jahres 2018 ausgewertet. Dieser Vorschlag wurde von der Behörde bewilligt und kommt ab Mitte 2019 zur Anwendung



4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Zeitverlauf von Emissionen und Kenngrössen

Bild 8 zeigt die Wochenmittelwerte der wichtigsten Kenngrössen im Zeitraum von Oktober 2016 bis April 2019. In der untersten Grafik sind der Biomasseanteil und der MNP-Anteil an der Biomasse ausgewiesen. Daraus geht hervor, dass der Zielwert des Biomasseanteils häufig zwischen rund 60 % und 85 % beträgt und dass der Zielwert von 70 % während längeren Betriebsphasen überschritten wurde. Zwischendurch sinkt der Biomasseanteil jedoch auch über längere Phasen bis auf null, was auf Phasen mit Betriebsstörungen und Umbauten zurückzuführen ist. Da bis anhin nie über längere Zeit ein konstanter Betrieb der Anlage vorherrschte, ist eine abschliessende Beurteilung des Biomasseanteils schwierig.

Daneben ist erkennbar, dass die Anlage nach der Inbetriebnahme während einiger Zeit mit Zugabe von MNP betrieben wurde, wobei der MNP-Anteil jedoch auf rund 10 % beschränkt wurde. Zwischen Frühling 2017 und Sommer 2018 wurde die Anlage ohne MNP betrieben. Ab der zweiten Hälfte 2018 erfolgte eine erneute Zugabe von MNP mit einem einmalig bis auf etwa 35% gesteigerten Anteil.

Bild 9 zeigt die Emissionen und Kenngrössen während einer Phase von zwei Wochen im Betrieb mit Holz ohne MNP. In diesem Zeitraum sind Lastabsenkungen an zwei Wochenenden erkennbar. Zudem erfolgte der Betrieb an zwei Tagen mit Laubholz, was zu deutlich erhöhten Emissionen führte.

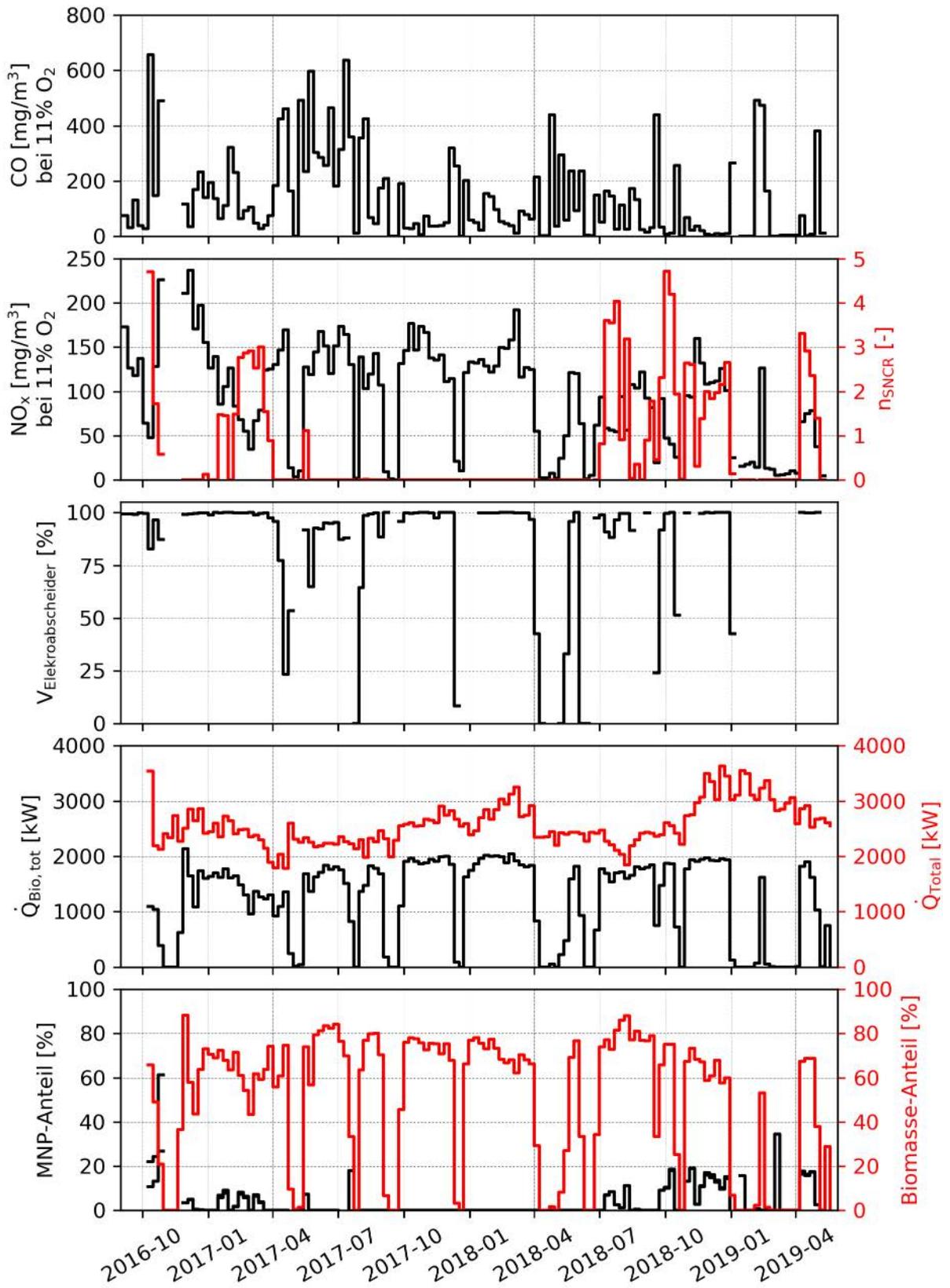


Bild 8 Wochenmittelwerte von Emissionen und Kenngrößen über den gesamten Überwachungszeitraum.

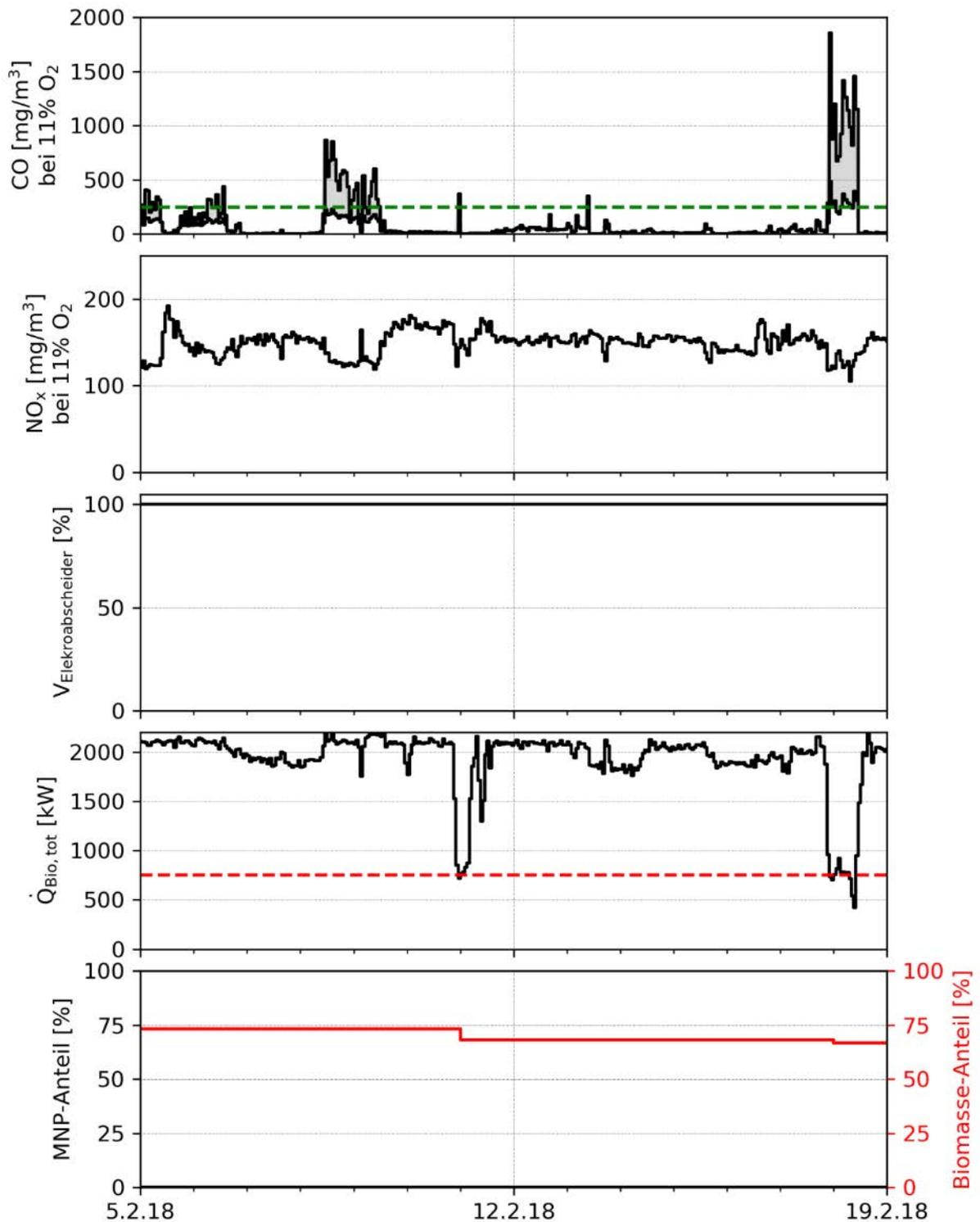


Bild 9 Stundenmittelwerte von Emissionen und anderen Kenngrößen während zwei Wochen ohne Zugabe von MNP. In diesem Zeitraum erfolgte eine Verbrennung von Laubholz am 8.2.18 und 9.2.18. Zudem sind zwei Phasen mit Lastabsenkung an Wochenenden erkennbar.



4.2 Biomasseanteil an der Wärmeerzeugung

Bild 10 zeigt den Anteil des Feuerungsbetriebs in Funktion des Biomasseanteils, wobei sämtliche Betriebsstunden ab 30 % Leistung berücksichtigt sind. Die Auswertung zeigt die Daten ab September 2016 und ab Januar 2018 bis jeweils im Mai 2019. Während etwas mehr als der Hälfte der Betriebszeit wurde der Zielwert von 70 % Biomasseanteil erreicht oder überschritten und während 30 % des Betriebs wurde ein Biomassenanteil von 80 % und höher erzielt. Insgesamt wurde ab 2018 während des Betriebs der Biomassefeuerung ein mittlerer Biomasseanteil von 73 % erreicht. Bei Betrachtung des ganzen Betriebsjahres betrug der durchschnittliche Anteil jedoch nur 55 %, was auf längere Stillstandszeiten der Biomassefeuerung zurückzuführen ist. In Kapitel 4.11 ist zudem die saisonale Schwankung des Biomasseanteils beschrieben.

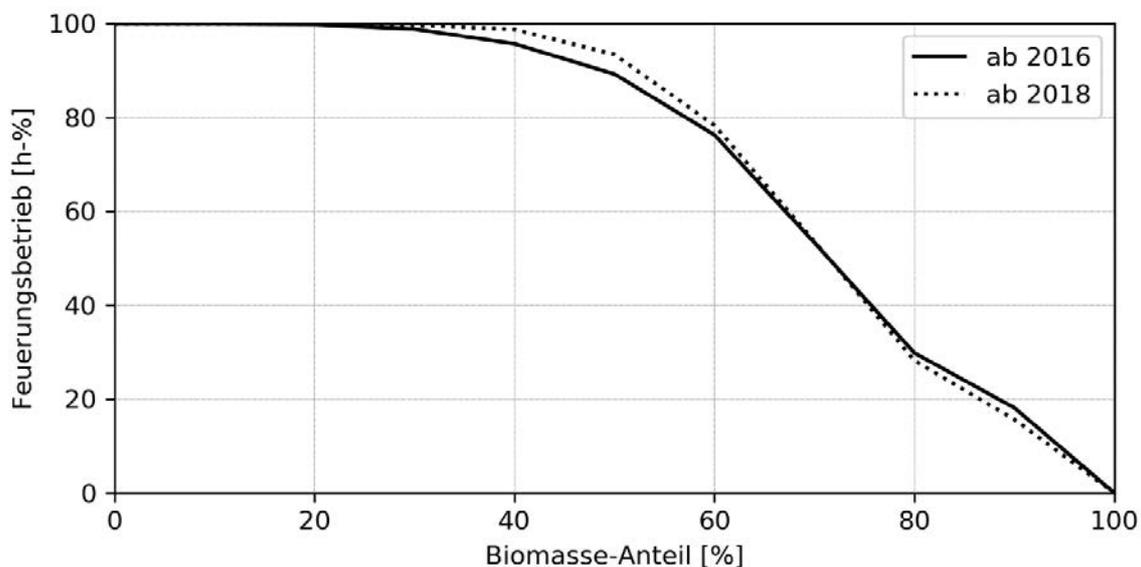


Bild 10 Prozentualer Anteil der Feuerungsbetriebsstunden (Stundenmittelwerte) ab 30 % Leistung in Funktion des Biomasseanteils. Ausgezogene Linie: Auswertung ab September 2016. Gepunktete Linie: Auswertung der Daten ab Januar 2018 bis Mai 2019.

4.3 MNP-Anteil am Biomassebrennstoff

Bild 11 zeigt den Anteil der Betriebsstunden der Biomassefeuerung in Funktion des Anteils an MNP. Der MNP-Anteil ist dabei auf den der Biomassefeuerung zugeführten Heizwert bezogen. Für die Bestimmung des MNP-Anteils und auch für die Verrechnung der Holzschnitzel musste eine Abgrenzung zwischen Holzschnitzel und MNP anhand einer Bilanzierung der produzierten Wärmemengen vorgenommen werden.

Dazu kamen eine Bilanzgrenze nach dem Thermoöl-Kessel (MNP-Anteil 1) oder eine Bilanzgrenze nach dem Heisswasser-Economizer (MNP-Anteil 2) zur Anwendung, wobei die zweite Bilanzgrenze auch im Liefervertrag zur Verrechnung der Holzschnitzel vorgesehen ist. Wegen der Komplexität der Anlage und Unsicherheiten bezüglich der Messstellen führten die zwei Berechnungen zu Abweichungen von bis zu 13 %. In Bild 11 sind die Daten für den MNP-Anteil 2 ausgewiesen. Die Auswertung zeigt, dass der Zielwert von 50 % MNP-Anteil nicht über eine längere Betriebsphase erreicht wurde. Hauptgrund dafür war die starke Verschmutzung an verschiedenen Stellen in den Wärmeübertragern (Kapitel 4.13). Deshalb wurde die Feuerung nur phasenweise mit MNP-Zugabe betrieben und dabei der MNP-Anteil klein gehalten. Wie aus Bild 12 hervorgeht, wurde im Winter 2018/2019 während der Betriebsphasen mit MNP-Zugabe meist ein MNP-Anteil von rund 25 % bis 35 % erzielt.

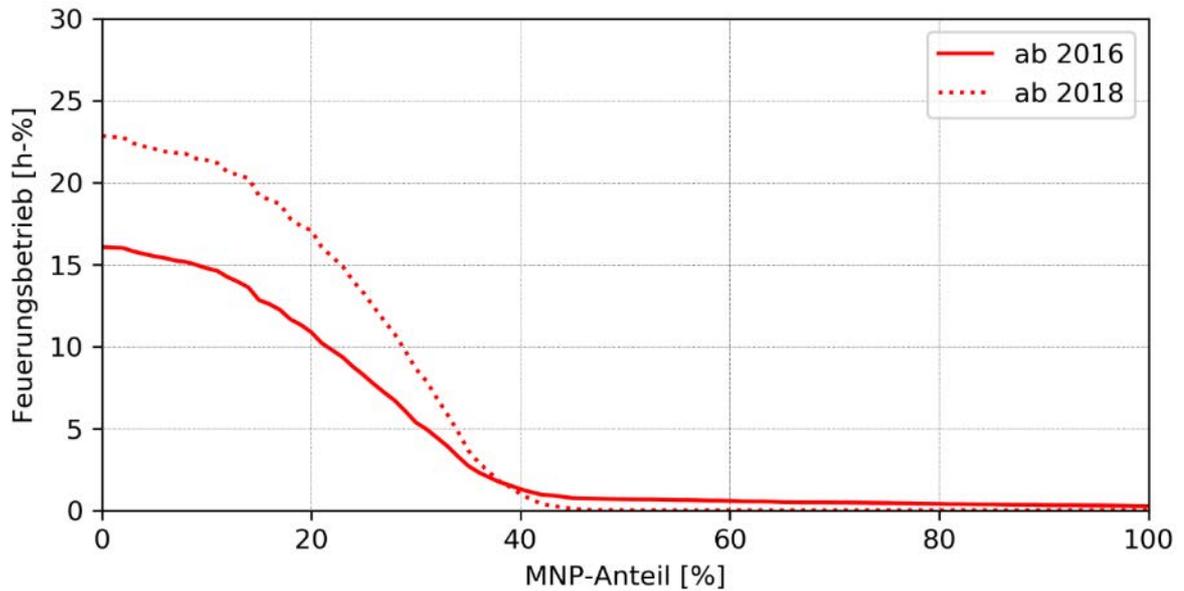


Bild 11 Prozentualer Anteil der Feuerungsbetriebsstunden (mit einer Leistung von über 30 %) in Funktion des MNP-Anteils. Ausgezogene Linie: Auswertung aller Daten ab September 2016. Gepunktete Linie: Auswertung der Daten ab Januar 2018 bis Mai 2019.

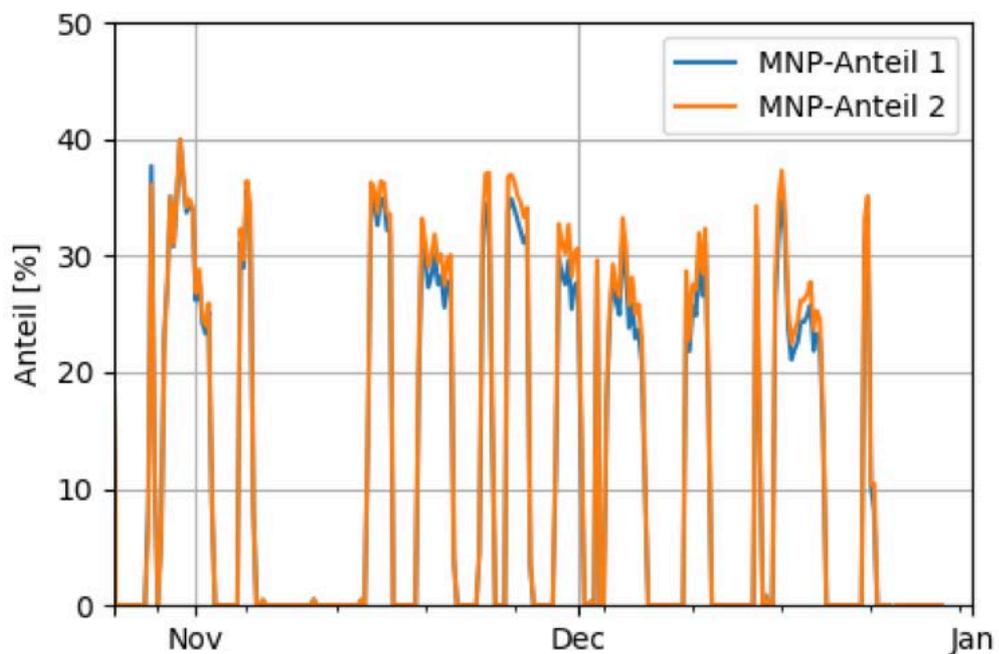


Bild 12 MNP-Anteil im Winter 2018/2019 angegeben als Mittelwert über 6 Stunden.



4.4 CO-Emissionen

Bei der Abnahmemessung im Betrieb mit Waldhackschnitzeln wurde eine durchschnittliche CO-Konzentration im Abgas von 27 mg/m^3 bis 42 mg/m^3 bezogen auf 11 Vol.-% O_2 gemessen und der Emissionsgrenzwert von 250 mg/m^3 damit um mehr als 80 % unterschritten. Über die gesamte Betriebszeit betrachtet lagen die CO-Emissionen jedoch phasenweise über dem Grenzwert.

Während des Jahres 2018 lagen zwischen 93 % und 98 % der CO-Tagesmittelwerte bei einem Feuerungsbetrieb mit über 30 % Leistung unter dem Emissionsgrenzwert. Die Bandbreite ergibt sich daraus, dass das CO-Messgerät über zwei Messbereiche verfügt, die Information zum Messbereich jedoch nicht erfasst wurde und deshalb bei hohen CO-Emissionen die Zuordnung zum Messbereich fehlt. Mit dieser Unsicherheit haben somit zwischen 2 % und 7 % der Tagesmittelwerte den Emissionsgrenzwert überschritten. Da nach LRV Art. 15 kein Tagesmittelwert den Emissionsgrenzwert überschreiten darf, wurde diese Anforderung nach LRV im Kalenderjahr 2018 nicht eingehalten. Ebenso wurden die Anforderungen bezüglich Stundenmittelwerten (97 % unter dem 1.2-fachen und 100 % unter dem 2-fachen Grenzwert) nicht erfüllt.

Insbesondere beim Betrieb mit Laubholz konnte der CO-Grenzwert in der Regel nicht eingehalten werden (Beispiel in Bild 9 am 8.2.18 und 9.2.18). Aus diesem Grund wurde mit dem Brennstofflieferanten ab anfangs 2018 die ausschliessliche Lieferung von Hackschnitzeln aus Nadelholz vereinbart.

In Phasen mit Zufeuerung von MNP lagen die CO-Emissionen tiefer als während des reinen Holzbetriebs. Die MNP-Pellets hatten somit in Bezug auf die CO-Emissionen einen stabilisierenden Effekt. Wenn die Feuerungsleistung an den Wochenenden wegen der geringen Lastabnahme über längere Zeit unter 30 % der Nennleistung sank, stiegen die CO-Emissionen und überschritten teilweise den Emissionsgrenzwert (Beispiel in Bild 9 am 18.2.18). Wenn die Lastabnahme über 30 % blieb oder diesen Wert nur kurz unterschritt, blieben die Emissionen in der Regel tief (Beispiel in Bild 9 am 11.2.18).

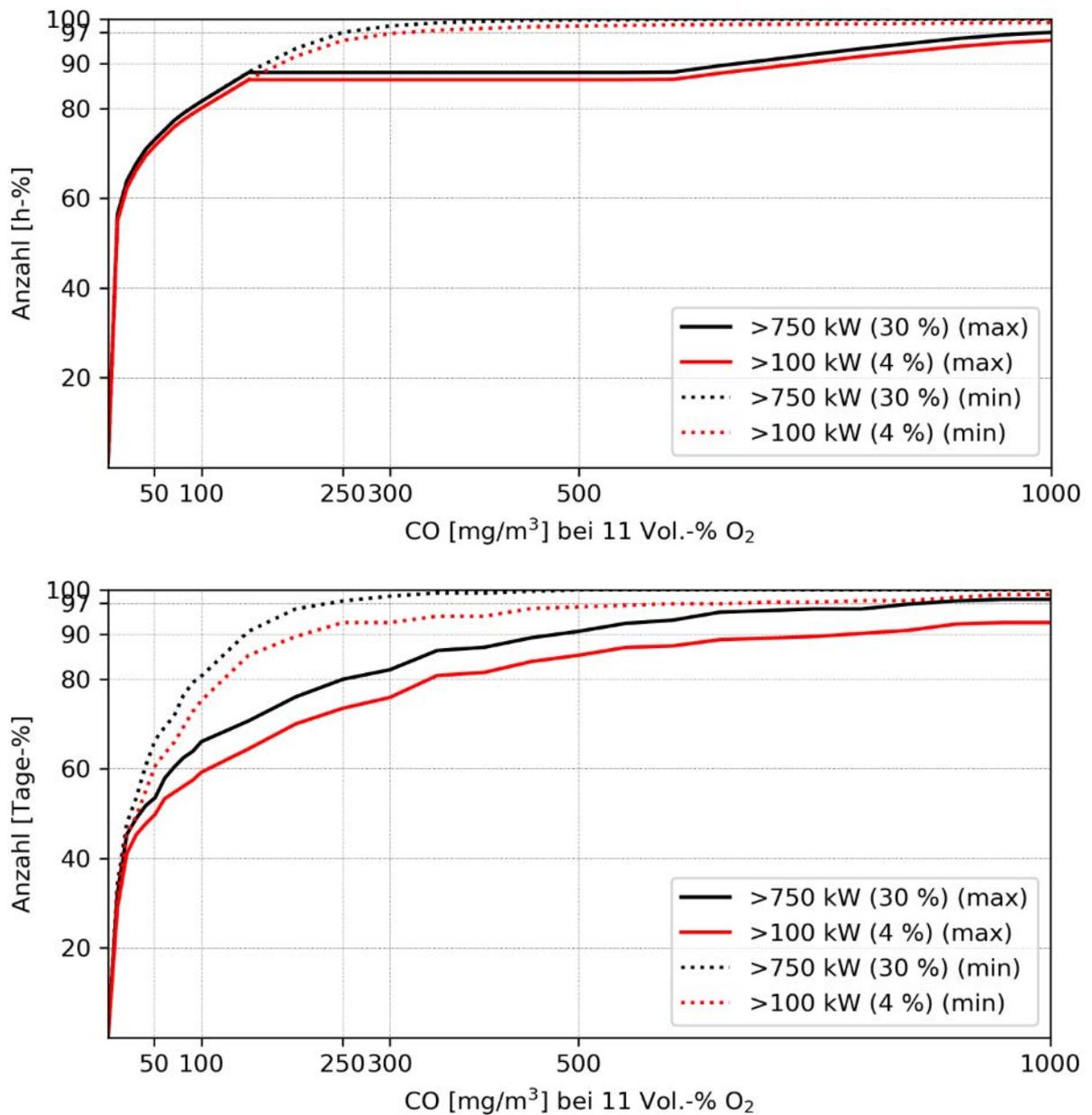


Bild 13 Anzahlverteilung der Mittelwerte der CO-Emissionsmessung des Jahres 2018.
Oben: Stundenmittelwerte.
Unten: Tagesmittelwerte.
Das Messgerät verfügt über zwei Messbereiche, der Messbereich wurde jedoch nicht aufgezeichnet, deshalb sind zwei Resultate dargestellt. Die ausgezogenen Linien zeigen die maximal möglichen, die gepunkteten die minimal möglichen Werte.



4.5 NO_x-Emissionen

Für NO_x wurde vom Kanton Aargau ein Grenzwert von 180 mg/m³ bezogen auf 11 Vol.-% O₂ festgelegt, der als Wochenmittelwert einzuhalten ist. Bei der Abnahmemessung wurde mit 115 mg/m³ als Mittelwert über den Abnahmebetrieb ein deutlich tieferer Wert nachgewiesen. Während des Jahres 2018 lagen 95 % der Stundenmittelwerte und 98 % der Wochenmittelwerte unter 180 mg/m³. Einmal (was 2 % entspricht) wurde der Grenzwert überschritten, wobei die Werte immer unter 250 mg/m³ lagen (Bild 14). Die erhöhten Werte traten während des Betriebs mit Holz auf und sind darauf zurückzuführen, dass die Steuerung der Biomassefeuerung bei ausgeschalteter MNP-Zuführung auch die SNCR-Anlage deaktivierte.

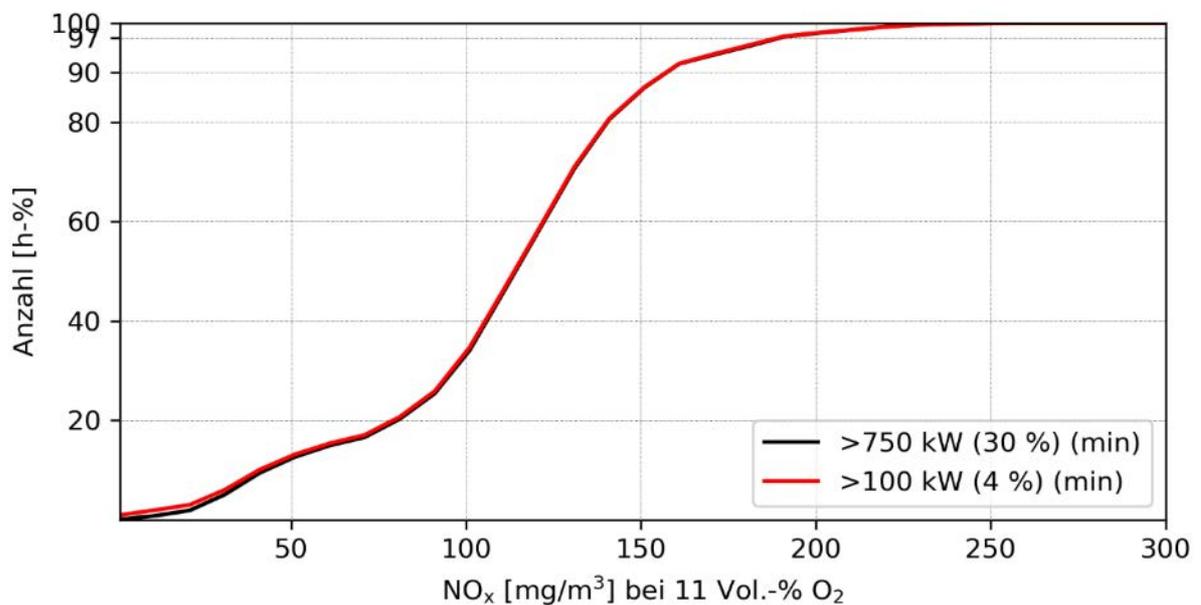


Bild 14 Anzahlverteilung der NO_x-Stundenmittelwerte des Jahres 2018.



4.6 Abgasentstickung mit SNCR

Zur Einhaltung des NO_x -Grenzwerts von 180 mg/m^3 als Wochenmittel verfügt die Feuerung über eine selektive nicht-katalytische Reduktions-Anlage (SNCR) mit Eindüsung einer Harnstofflösung. Für einen optimalen SNCR-Betrieb müssen allerdings die Temperatur in der Reaktionszone und die eingedüste Menge an Reduktionsmittel stimmen. Bei Verwendung von Harnstoff als Reduktionsmittel ($\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$, auch Urea oder Carbamid genannt) können ausserhalb eines engen Temperaturfensters oder mit zu hohen Harnstoffmengen unerwünschte Nebenprodukte wie CO , NH_3 , HNCO , CO , N_2O emittiert werden. Um dies zu vermeiden, wird in der Regel ein Molverhältnis n zwischen Reduktionsmittel und NO_x ($n = \text{NH}/\text{NO}_x$) im Rohgas von ungefähr 2 empfohlen, also die zweifache Menge des für eine stöchiometrische Reaktion erforderlichen Menge an Reduktionsmittel eingedüst.

Im Beobachtungszeitraum wurde die SNCR-Anlage ausschliesslich während der Zufuehrung von MNP betrieben. Da MNP nur während des stationären Feuerungsbetriebs beigemischt wurden, waren die Temperatur in der Reaktionszone und die Verbrennungsbedingungen beim SNCR-Betrieb jeweils stabil. Die SNCR-Anlage wurde in mehreren Schritten optimiert. Damit konnte das Molverhältnis von anfänglich über 5 (also deutlich zu hoch) auf ungefähr 2 abgesenkt werden. Damit konnten der Harnstoffverbrauch mehr als halbiert und gleichzeitig die Gefahr von Nebenprodukten reduziert werden. Anfänglich zeigte die Harnstoffeindüsung zudem ein starkes Schwingen, weil der momentane NO_x -Messwert in der Regelung zu stark gewichtet wurde (Bild 15). Die Totzeit der Messstrecke war dafür jedoch zu lang, weshalb die Regelung die gemittelten NO_x -Werte stärker gewichten musste. Mit der Optimierung konnte die Bildung von unerwünschten Nebenprodukten deutlich reduziert werden. Dies geht aus Bild 16 und Bild 17 hervor, wobei die CO -Konzentration als Indikator für unerwünschte Nebenprodukte dient. Nach der Anlagentoptimierung lag die NO_x -Konzentration deutlich unter dem Grenzwert.

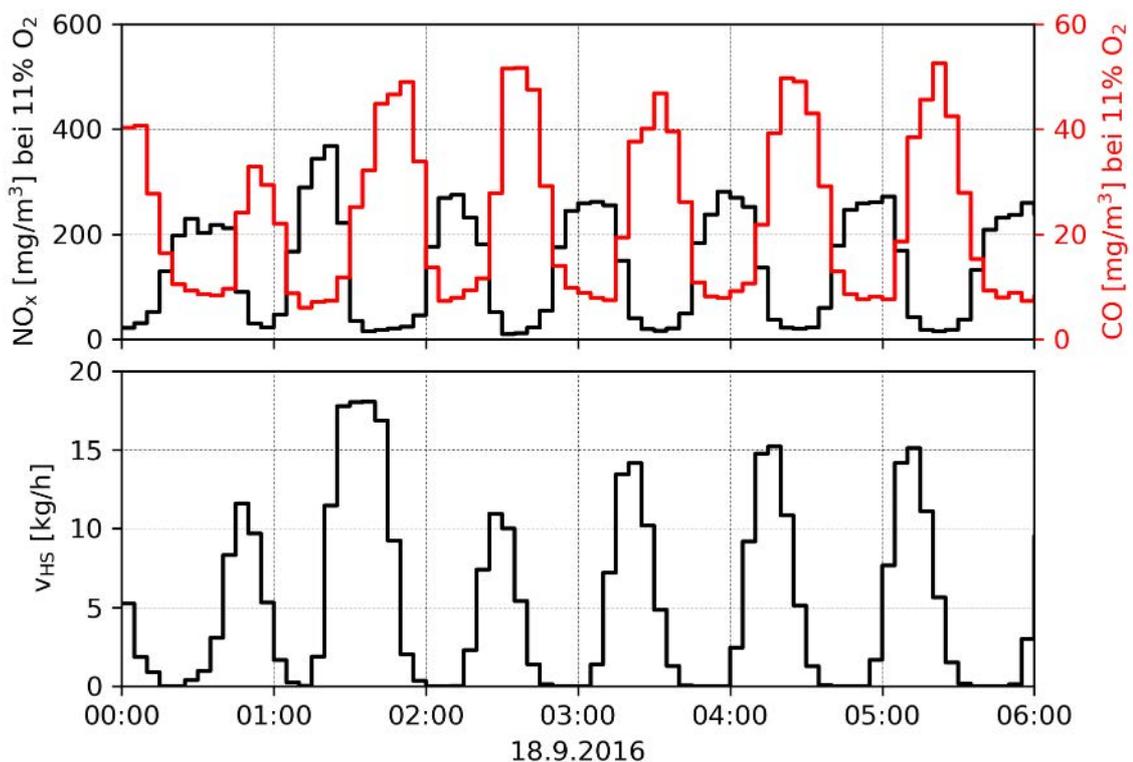


Bild 15 Ausschnitt aus den Messwerten vom 18. September 2016. Unten: eingedüste Harnstoffmenge (v_{HS}). Dargestellt sind 5-Minuten-Mittelwerte.

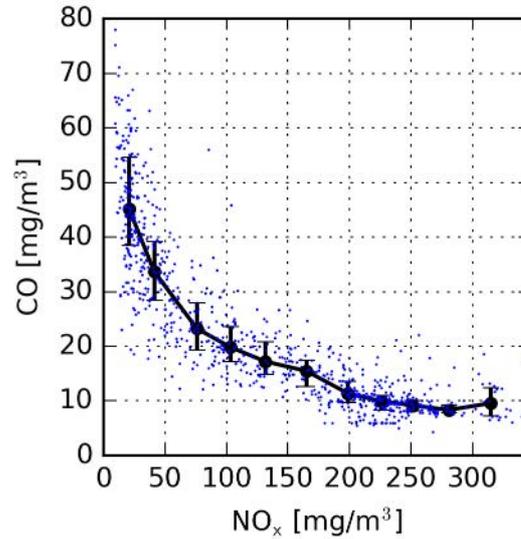


Bild 16 CO-Konzentration in Abhängigkeit der NO_x-Konzentration im Reingas nach der SNCR-Anlage. Dargestellt sind die 5-Minuten-Mittelwerte als blaue Punkte und der schwarze Balken zeigt die Quartile. Messdaten vom 16. bis 18. September 2016.

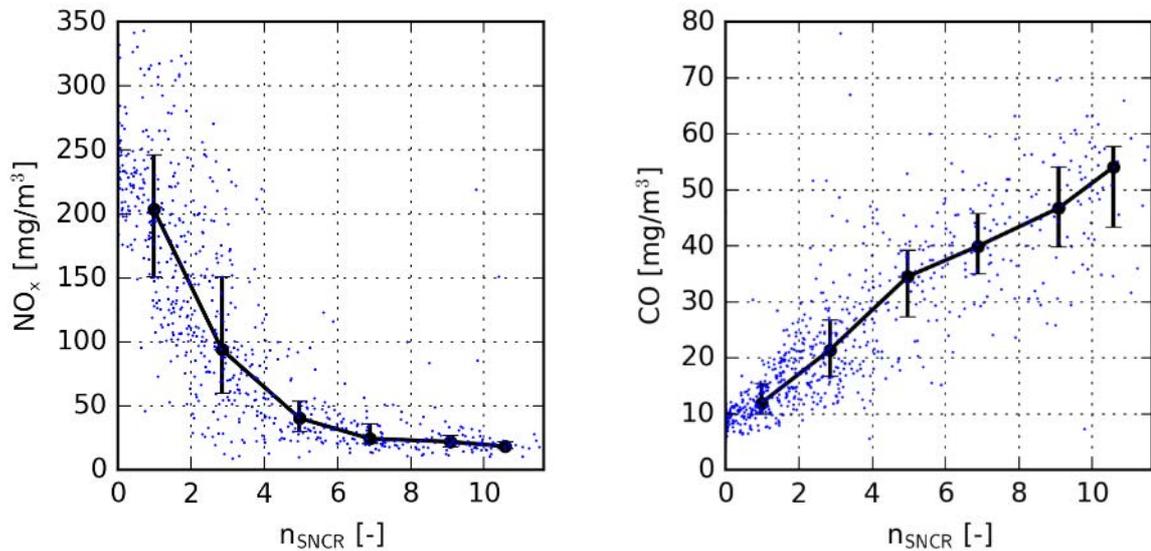


Bild 17 Links: NO_x-Konzentration in Abhängigkeit des Molverhältnisses n . Rechts: CO-Konzentration in Abhängigkeit des Molverhältnisses n als Indikator für die Bildung von unerwünschten Nebenprodukten. Dargestellt sind die 5-Minuten-Mittelwerte als blaue Punkte und der schwarze Balken zeigt die Quartile. Messdaten vom 16. bis 18. September 2016.



4.7 Feinstaubemissionen und Verfügbarkeit des Elektroabscheiders

Zur Feinstaubabscheidung kommt ein Platten-Elektroabscheider zum Einsatz. Bei der Abnahmemessung ohne Zufeuerung von MNP lagen die Staubemissionen unter der Messgrenze von 2 mg/m^3 bezogen auf 11 Vol.-% O_2 . Staubmessungen von Verenum ergaben sowohl ohne als auch mit Zufeuerung von bis zu 40 % MNP Staubgehalte von 1 mg/m^3 bis 3 mg/m^3 . Der Emissionsgrenzwert von 10 mg/m^3 konnte somit bei eingeschaltetem Elektroabscheider deutlich unterschritten werden.

Messungen bei ausgeschaltetem Elektroabscheider ergaben ohne und mit Zufeuerung von MNP Staubkonzentrationen zwischen 60 mg/m^3 und 205 mg/m^3 bezogen auf 11 Vol.-% O_2 , sodass ein Abscheidegrad von über 95 % hervorgeht.

Während des Versuchsbetriebs wurde die Verfügbarkeit des Elektroabscheiders durch die Erfassung von Stromstärke und Spannung in Anlehnung an die Methode von [Lauber und Nussbaumer 2014] bestimmt. Die Auswertung zeigt, dass der Elektroabscheider während des gesamten Beobachtungszeitraums störungsfrei funktionierte. Wie Bild 18 zeigt, wurde ab 2018 bei einem Betrieb mit mehr als 30 % Feuerungsleistung eine Verfügbarkeit von über 98 % erreicht. Die Verfügbarkeit blieb selbst bei deutlich geringerer Leistung hoch und der Elektroabscheider blieb auch während Phasen mit Gluterhaltsbetrieb an Wochenenden mit geringer Wärmeabnahme weitgehend in Betrieb. Lediglich während der Kaltstarts der Biomassefeuerung wurde der Elektroabscheider zum Schutz vor Schäden manuell ausgeschaltet. Die Kaltstarts nach längeren Stillstandsphasen für Reinigung und Unterhalt sind in der ausgewiesenen Verfügbarkeit nicht enthalten.

Bei Zufeuerung von MNP änderte sich die Farbe der Filterasche von grau zu weiss. Die Änderung der Staubeigenschaften hatte jedoch keine erhebliche Änderung des Elektroabscheiderbetriebs zur Folge. Mit MNP sank zwar die Stromstärke im Elektroabscheider um rund 5 % von durchschnittlich 143 mA auf 136 mA, es wurden aber keine vermehrten Kurzschlüsse festgestellt.

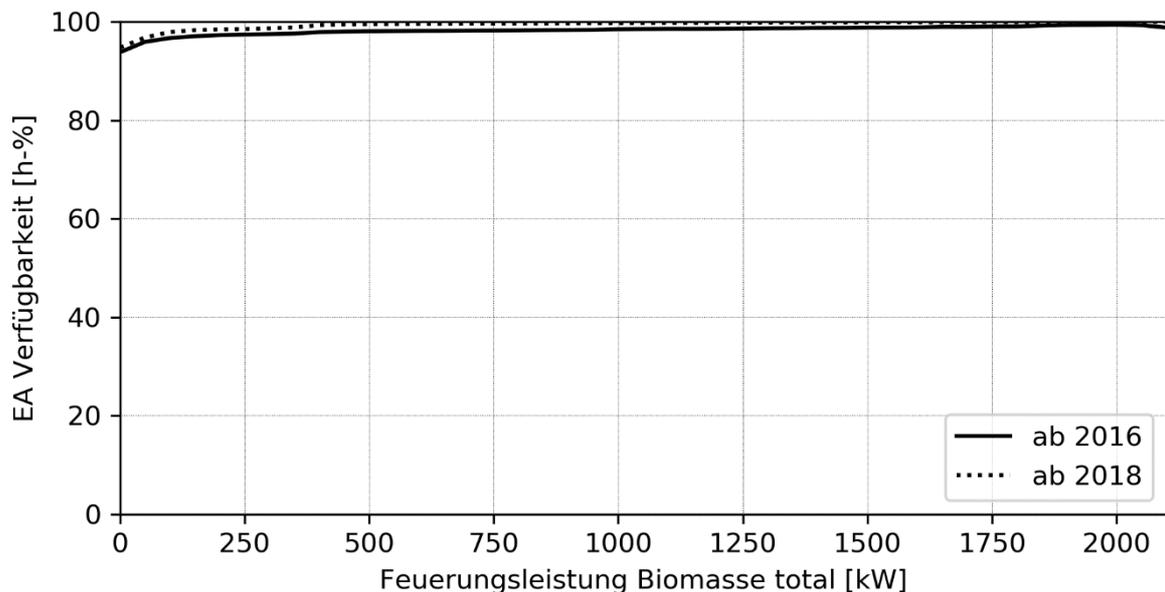


Bild 18 Verfügbarkeit des Elektroabscheiders in Abhängigkeit der Feuerungsleistung. Ausgezogene Linie: alle Daten ab September 2016. Gepunktete Linie: Daten ab Januar 2018 bis Mai 2019.



4.8 Wirkungsgrad

Zur kontinuierlichen Anlagenüberwachung wurde der feuerungstechnische Wirkungsgrad aus der Abgaszusammensetzung im Kamin und der Abgastemperatur berechnet und als Momentanwert ausgewiesen¹. Mit einer Temperaturmessung nach dem Thermoöl-Kessel und nach dem Heisswasser-Economizer wurden die Werte für die entsprechenden Orte bestimmt. Bild 19 zeigt die Anzahlverteilung der zwei Wirkungsgrade für das Jahr 2018. Der Feuerungswirkungsgrad nach Thermoöl-Kessel lag bei 75 %, während für die Gesamtanlage (nach HW-ECO) durchschnittlich 87 % erzielt wurden.

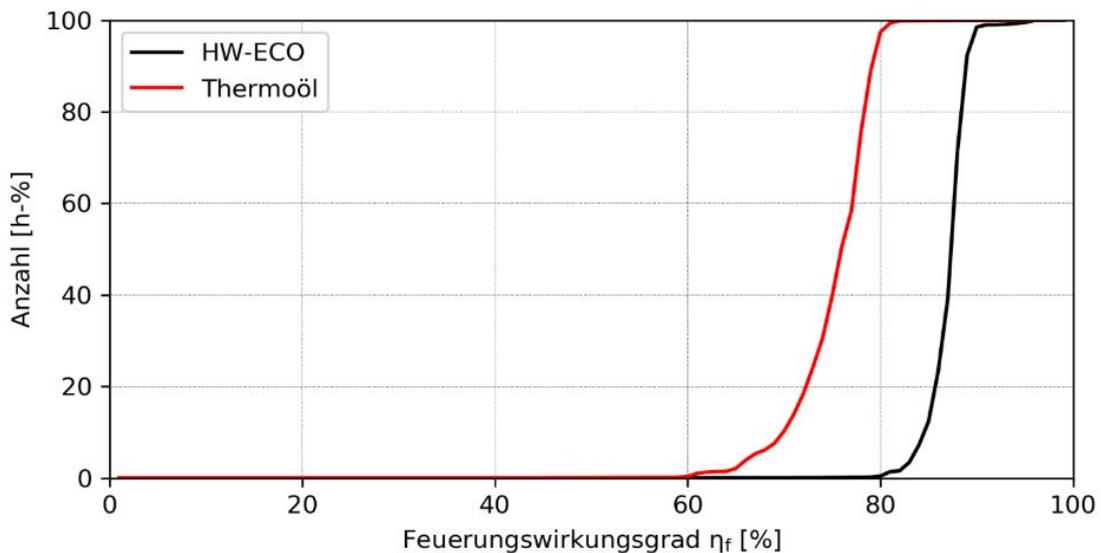


Bild 19 Prozentualer Anteil der Feuerungsbetriebsstunden (mit einer Leistung von über 30 %) in Funktion des feuerungstechnischen Wirkungsgrads. Der Wirkungsgrad wurde direkt nach dem Thermoöl-Kessel und nach dem Heisswasser-Economizer (HW-ECO) aus den an den entsprechenden Stellen gemessenen Abgastemperatur bestimmt. Die Abgaszusammensetzung wurde im Kamin gemessen. Auswertung der Daten ab Januar 2018 bis Mai 2019.

4.9 Brennstoffverbrauch

Im Beobachtungszeitraum wurden rund 17'000 m³ Holzschnitzel verbrannt, wovon der Nadelholzanteil rund 85 % ausmachte. Die Holzart wurde im Verlauf des Pilotbetriebs auf Nadelholz beschränkt, da die Betriebsstabilität und die Emissionsgrenzwerte mit Mischholz nicht eingehalten werden konnten. In einem ersten Schritt wurde deshalb auf Landschaftspflegeholz verzichtet und da diese Einschränkung nicht ausreichend war in einem zweiten auch auf Laubholz. Um einen optimalen Feuerungsbetrieb mit tiefen Emissionen zu ermöglichen, mussten zudem die Holzlieferungen so angepasst werden, dass für den Wassergehalt der Brennstoffmischung ein relativ enger Bereich zwischen mindestens 35 % und maximal 50 % eingehalten wurde. Für den Betrieb ohne Zufeuerung von MNP mussten deshalb Holzschnitzel mit einem Wassergehalt in diesem Bereich geliefert werden, während bei Zumischung von MNP-Pellets mit Wassergehalt von 9 % bis 15 % frisch geschlagenes Holz mit über 50 % Wassergehalt verwendet werden musste.

¹ Der feuerungstechnische Wirkungsgrad η_f berücksichtigt die thermischen und chemischen Verluste im Abgas mit $\eta_f = 1 - V_{\text{therm}} - V_{\text{chem}}$. Zur Bestimmung der thermischen Verluste werden die Abgastemperatur und der Gehalt an O₂ oder CO₂ sowie der Heizwert und Wassergehalt des Brennstoffs benötigt. Für die chemischen Verluste wird zusätzlich der CO-Gehalt im Abgas berücksichtigt. Das Vorgehen erfolgt nach [Nussbaumer & Good 1994] und ist im Anhang beschrieben.



4.10 Aschemengen

Die Analysen der MNP-Pellets ergaben einen Glührückstand zwischen 2.7 Gew.-% und 7 Gew.-%. Es wird angenommen, dass der Glührückstand ungefähr dem Aschegehalt entspricht. Bei Holzschnitzeln liegt der Aschegehalt in der Regel deutlich unter 2 Gew.-%.

Bild 20 zeigt die entsorgten Aschemengen in Funktion des für den während der jeweiligen Betriebsperiode abgeschätzten MNP-Energieanteils. Die Zuordnung der einzelnen Aschemengen zum jeweiligen Betriebszustand ist allerdings mit Unsicherheiten verbunden, da die Aschen über längere Betriebsdauer gesammelt und nur die Rost- und Filterasche erfasst wurden. Zusätzlich dazu fielen grössere Aschemengen als Ablagerungen in der Anlage (hauptsächlich in den Wärmeübertragern) an, die separat mittels Spezialreinigungen entfernt und in den erhobenen Daten nicht erfasst wurden. Trotz dieser Unsicherheiten ist erkennbar, dass die angefallenen Aschemengen innerhalb der aus den Aschegehalten der Brennstoffe erwarteten Bereichen liegen.

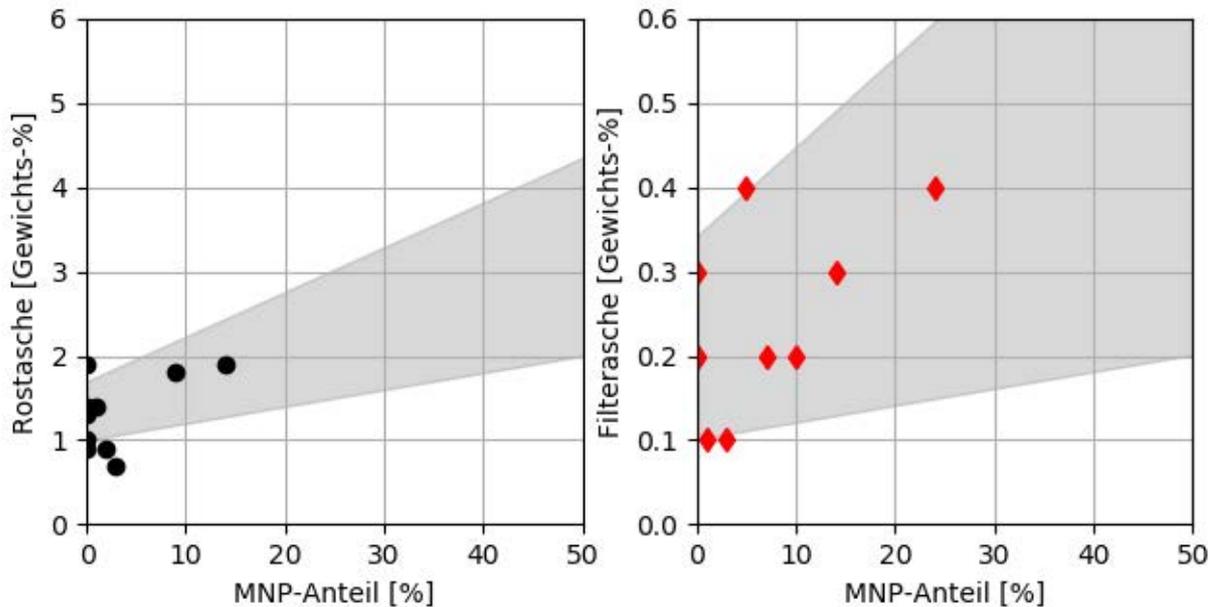


Bild 20 Gehalt an Rostasche (links) und Filterasche (rechts), berechnet aus den entsorgten Aschemengen und den zwischen zwei Entsorgungsintervallen verbrannten Brennstoffmengen, in Funktion des MNP-Energieanteils. Der Brennstoffverbrauch wurde aus der gemessenen Wärmeproduktion und dem Wirkungsgrad bestimmt. Grau hinterlegt sind die Bereiche mit der aus den Brennstoffanalysen zum Glührückstand erwarteten Aschegehalten unter der Annahme, dass die Filterasche 10 % bis 20 % der Gesamtasche ausmacht und der Glührückstand dem Aschegehalt entspricht.



4.11 Saisonbetrieb

Die Biomassefeuerung hat eine Nennleistung von 2.5 MW im Thermoöl und 0.4 MW im Heisswasser. Die zwei fossilen Feuerungen verfügen über eine Leistung von zusammen 7 MW im Thermoöl, sodass insgesamt 9.5 MW Thermoölleistung installiert sind.

Bild 21 zeigt die wöchentliche Wärmeproduktion des Biomassekessels und der gesamten Heizzentrale. Als weitere Information sind zudem die Bereiche der Tagesmittelwerte für die Biomassefeuerung und die Heizzentrale dargestellt. Aus den Verläufen gehen folgende Trends zum Anlagenbetrieb hervor:

Gesamtleistung der Heizzentrale (obere Grafik):

- Die Tagesmittelwerte schwankten zwischen 600 kW an den Wochenenden und 4.2 MW an Werktagen.
- Die Wochenmittelwerte schwankten zwischen 1.8 MW und 3.7 MW und zeigen eine saisonale Schwankung. Es ist ein Anstieg um rund 1 MW von rund 2.5 MW im Sommer 2018 auf rund 3.5 MW im Winter 2018/2019 zu erkennen.
- Die Bandbreite der Tagesmittelwerte ist im Sommer mit rund 2 MW (von 1 bis 3 MW im Sommer 2018) gleich gross oder grösser als im Winter. Die relativen Leistungsänderungen der Gesamtanlage sind im Sommer somit grösser (rund Faktor 3) als im Winter (weniger als Faktor 2).

Leistung der Biomassefeuerung (untere Grafik):

- Wie aus dem Leistungsverlauf hervorgeht, unterliegt die Biomassefeuerung keiner saisonalen Schwankung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Wochenmittelwert im Beobachtungszeitraum ganzjährig bei rund 2 MW oder etwa 70 % der Nennleistung limitiert war. Als Folge davon war der Biomasseanteil während der Wintermonate deutlich geringer als im Sommer und betrug etwa im Jahr 2018 im Februar 67 %, im Juli dagegen 85 %. Es wird erwartet, dass der Biomasseanteil insbesondere im Winter durch Optimierung der Regelung noch erhöht werden kann.
- Die höchsten Anforderungen zur Sicherstellung eines guten Anlagenbetriebs treten somit aufgrund der Wochenendabsenkung im Sommer auf. Da die minimale Leistung zum Betrieb der Biomassefeuerung rund 750 kW beträgt und der Bedarf an einigen Wochenenden darunter fiel, wurde die Anlage in dieser Zeit in einem Gluterhaltsbetrieb betrieben. In der Zwischenzeit wurden betriebliche Massnahmen festgelegt, dank denen künftig auch an den Wochenenden die minimale Wärmeleistung von 750 kW abgegeben und Glutbettunterhalt vermieden werden soll.

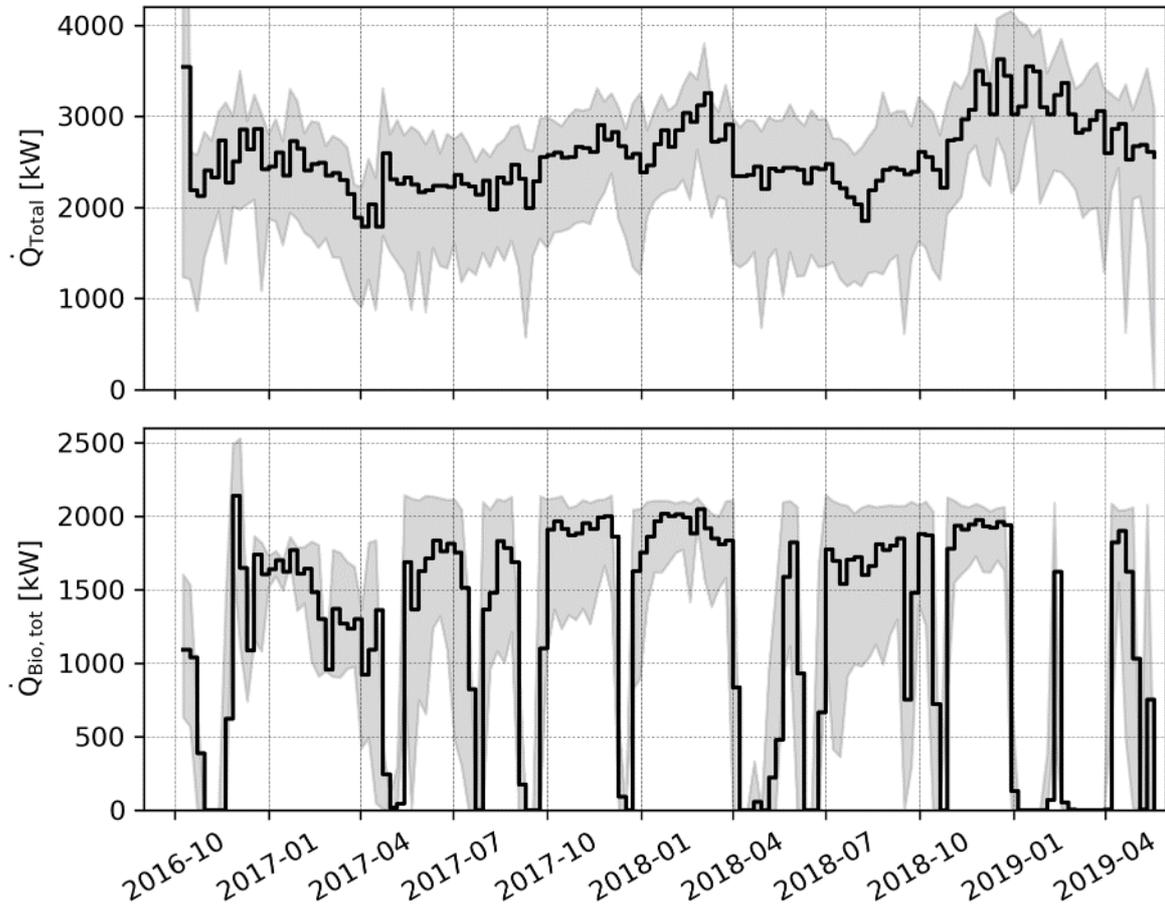


Bild 21 Wärmeproduktion der Heizzentrale (Thermoöl und Warmwasser) von Oktober 2016 bis Mai 2019. Oben: Wochenmittelwerte Gesamtleistung und Bereich der Tagesmittelwerte (graue Fläche). Unten: Wochenmittelwerte Biomassefeuerung und Bereich der Tagesmittelwerte (graue Fläche).



4.12 Dynamisches Verhalten des Wärmebedarfs

Der Betrieb von Backlinien kann rasche Leistungsänderungen verursachen, die für die Wärmezentrale nicht vorhersehbar sind. Wie Bild 22 und Bild 23 zeigen, kann der Wärmeleistungsbedarf innerhalb von 15 Minuten um mehr als 500 kW ändern, was auf das Zu- und Abschalten einzelner Backlinien zurückgeführt wird. Da diese Schwankungen auf dem Thermoölnetz auftreten und im Thermoöl keine Speichermöglichkeit besteht, müssen diese Leistungsänderungen von den Wärmeerzeugern erbracht werden. Leistungsänderungen von 500 kW innerhalb von 15 Minuten entsprechen bei der Biomassefeuerung einer Leistungsänderung um rund 1.5 % pro Minute. Die Planungsrichtlinien von QM-Holzheizwerke empfehlen maximale Leistungsänderungen von 1 % bis 1.5 % pro Minute [QM Holzheizwerke 2008]. Die zu erwartenden Leistungsänderungen sind somit an der Grenze einer Biomassefeuerung. Deshalb werden die schnellen Leistungsänderungen mit den fossilen Kesseln nachgeregelt, so dass die Biomassefeuerung möglichst stabil laufen kann. Um sehr schnelle Schwankungen bei der Biomassefeuerung abzufedern, wurde ein Betriebskühler eingebaut, mit welchem 500 kW aus dem Thermoöl in das Warmwassernetz übertragen werden können (Bild 22). Die Leistungsregelung war im Beobachtungszeitraum sehr defensiv eingestellt, so dass der Biomasseanteil relativ tief war und die Biomassefeuerung dafür kaum Leistungsänderungen vornehmen musste. Eine Optimierung der Regelung für den Betriebskühler bietet Potenzial zur Erhöhung des Biomasseanteils. Bild 22 und Bild 23 zeigen, dass das Zuschalten des Betriebskühler kaum mit Änderungen in der Thermoöl-Wärmeproduktion korreliert, teilweise sogar gegenläufige Trends aufweist. Zudem zeigt die Auswertung in Bild 24, dass die Geschwindigkeit der Leistungsänderung während 90 % der Zeit weniger als 1 % pro Minute beträgt, was Änderungsraten entspricht, die von Biomassefeuerungen in der Regel abgedeckt werden können.

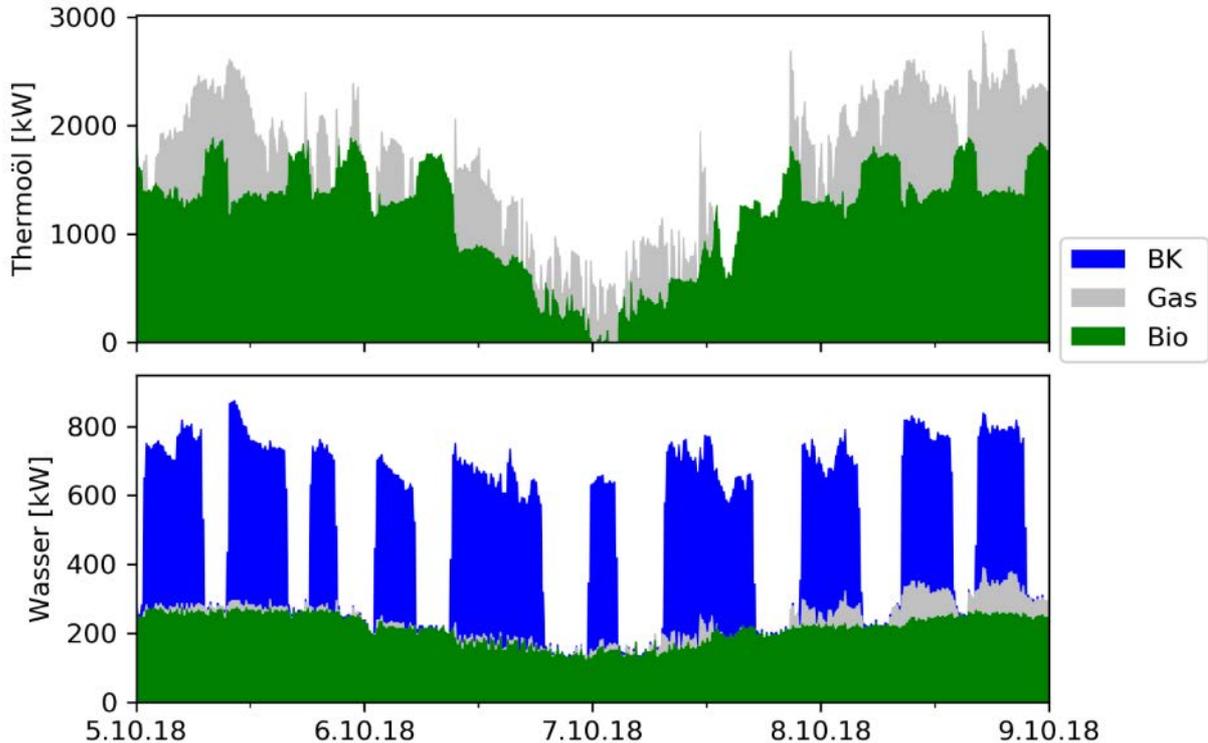


Bild 22 Wärmeproduktion von Freitag bis Montag während einer Woche im Oktober 2018 aufgeteilt auf Thermoöl (oben) und Wasser (unten). Die Wärmequellen sind gruppiert als Biomassefeuerung (Bio), Gaskessel (Gas) und Betriebskühler (BK) um Energie aus dem Thermoöl der Biomassefeuerung ins Heisswassernetz zu übertragen. Der Wärmezähler für das Thermoöl der Biomassefeuerung ist nach dem Betriebskühler positioniert. Die Daten sind mit einer Zeitauflösung von 15 Minuten dargestellt.

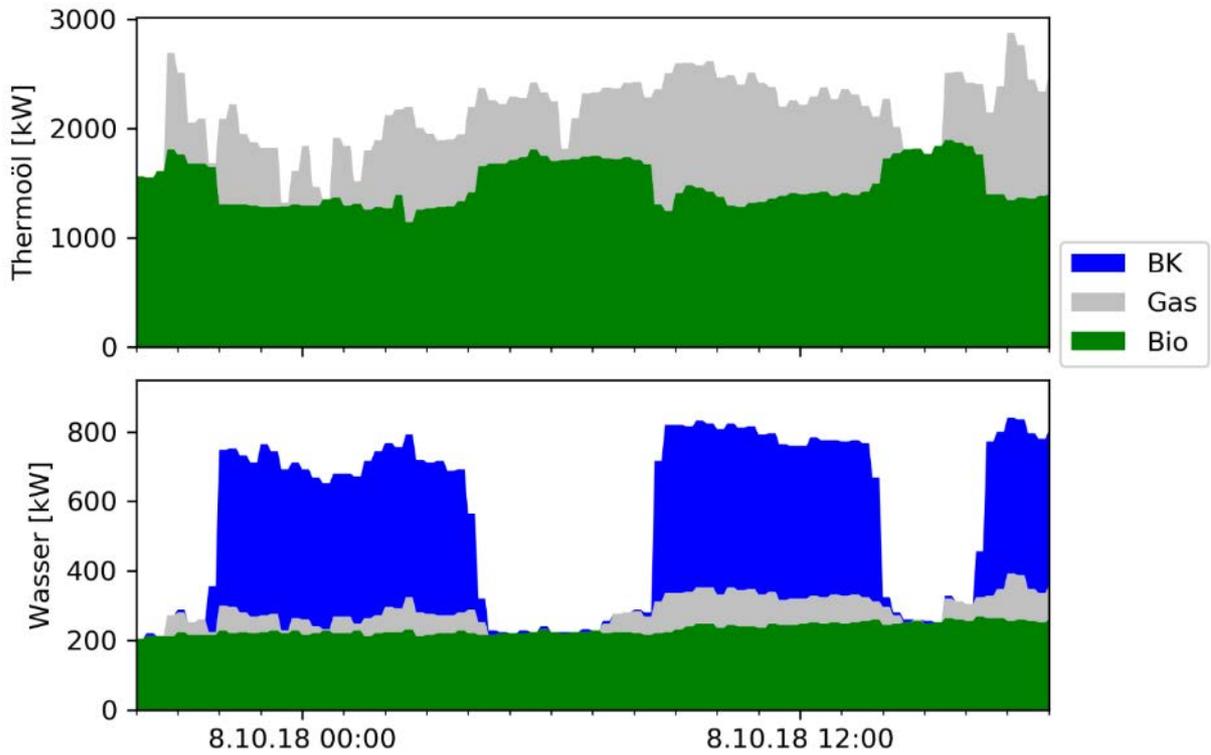


Bild 23 Wärmeproduktion während eines Tages aufgeteilt auf Thermoöl (oben) und Wasser (unten).

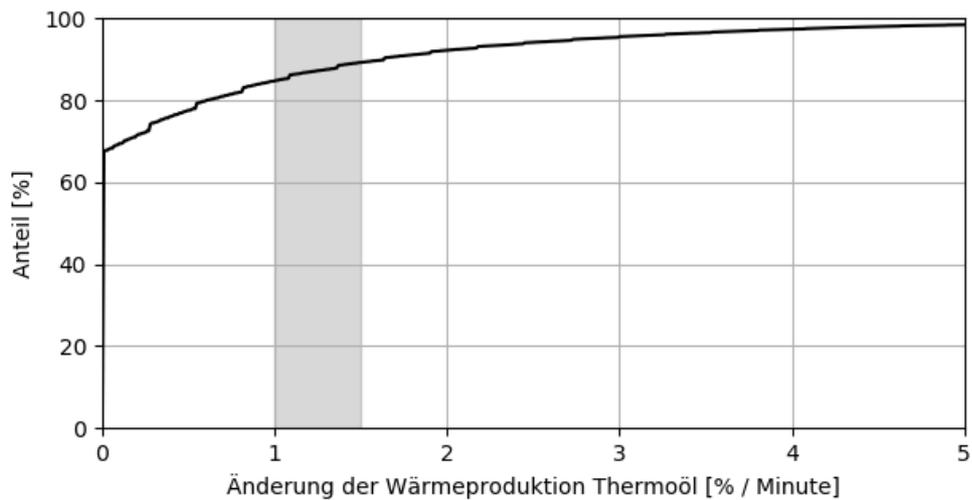


Bild 24 Anteil der Betriebszeit in Funktion der Änderungsgeschwindigkeit. Die ausgewerteten Daten des Jahres 2018 haben eine Zeitauflösung von 15 Minuten.



4.13 Verschmutzung

Erste Versuche mit der Zufeuerung von MNP-Pellets nach der Inbetriebnahme der Anlage im Jahr 2016 führten zu starken Ablagerungen insbesondere im Heisswasser-Economizer, Multizyklon und Abgasventilator (Bild 25). In Bild 26 ist in der obersten Grafik der Unterdruck an zwei Stellen im Abgassystem dargestellt. Daraus geht hervor, dass der Druckverlust nach einer Abreinigungsphase innerhalb von weniger als drei Monaten deutlich anstieg.

Um die Ablagerungen zu mindern, wurde im Dezember 2016 die SNCR-Anlage nachgerüstet, damit ein belagsminderndes Additiv (ERC, Carbamin 5000) auf Basis von Magnesiumverbindungen eingesetzt werden konnte. Mehrere Versuchsphasen mit diesem Additiv zeigten jedoch, dass dieses Additiv die Ablagerungen nicht verhindern konnte. Die Versuche hatten auch gezeigt, dass die Ablagerungen durch thermische Spannung teilweise wieder abfielen. Dies wurde insbesondere im Heisswasser-Economizer beobachtet, welcher mittels Bypass-Betrieb phasenweise auskühlte.

In einem zweiten Schritt wurde deshalb im Heisswasser-Economizer ein Wärmeübertrager mit grösserer Gassenweite eingebaut und eine deutlich stärkere Druckluft-Abreinigung der Firma Standard Industries (Produktname Airhoc) installiert. Wie anhand der Temperaturanstiege in Bild 26 erkennbar ist, wurde mit den getroffenen Massnahmen der Ort der kritischen Verschmutzung vom Multizyklon zum Economizer und schliesslich in den Thermoöl-Kessel zurück verschoben.

Das Ziel, die Anlage während mindestens drei Monaten mit der Zufeuerung von MNP zu betreiben, konnte mit all diesen Massnahmen nicht erreicht werden. Die längste Betriebsphase mit der Zufeuerung von MNP war von Oktober bis Dezember 2018 und dauerte 64 Tage, wobei der MNP-Anteil gemäss Bild 26 jedoch im Mittel nur etwa 15 % betrug. Da die Zufeuerung von Spezialbrennstoffen auch bei anderen Pilotanlagen zu ähnlichen Herausforderungen führte, wird die Wirkung von Additiven im ERANET Projekt REFAWOOD durch verschiedene Forschungsgruppen in Europa untersucht.



Bild 25 Ablagerungen im Abgaskanal nach dem Betrieb mit MNP-Pellets. Links: Wärmeübertrager-Rohre auf der Eintrittsseite des Heisswasser-Economizers mit verstopften Zwischenräumen. Rechts: Leitschaufeln aus dem Einlauf eines Zyklons im Multizyklon.

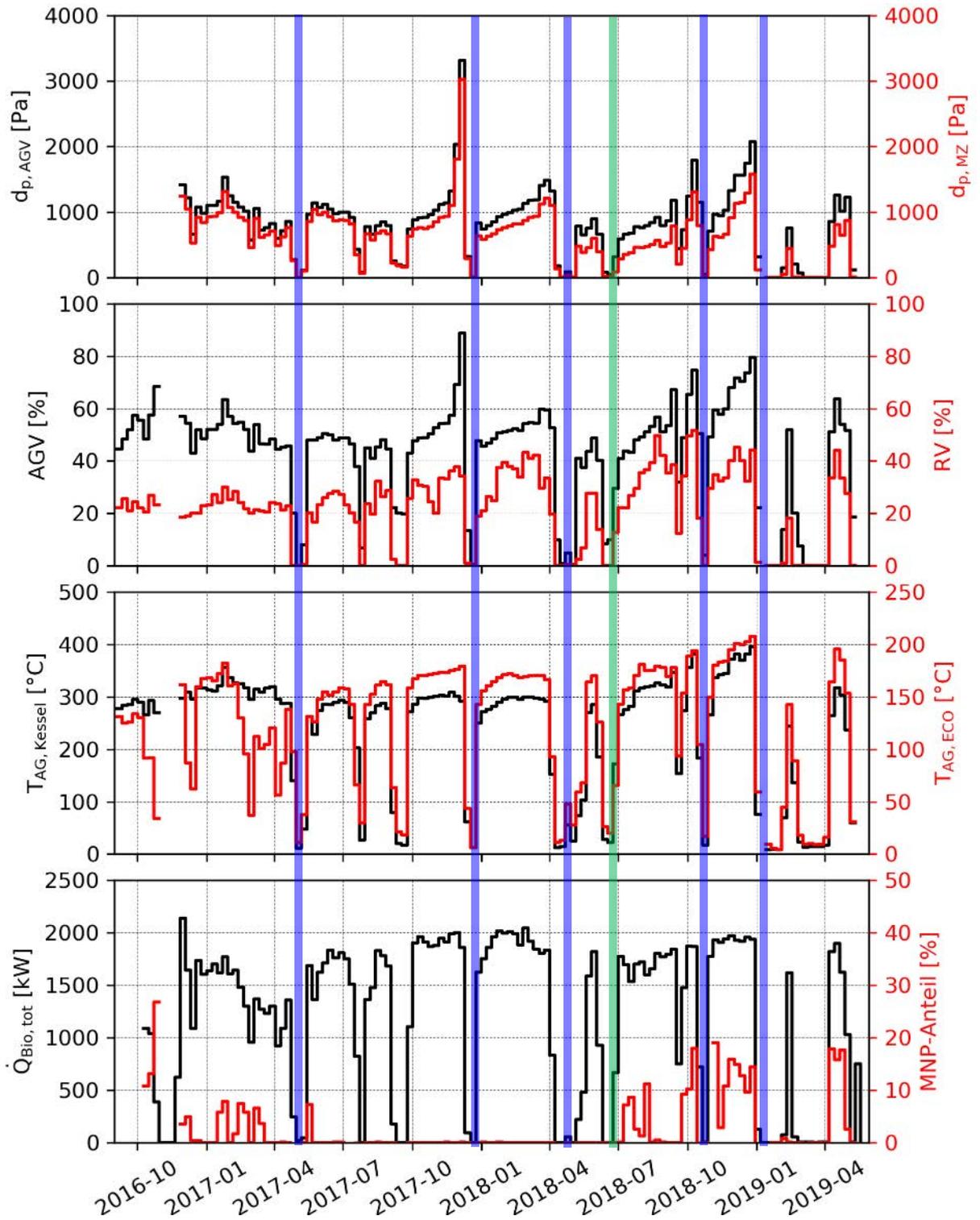


Bild 26 Kenngrößen zur Darstellung der Verschmutzungszunahme. Dargestellt sind Wochenmittelwerte von: Unterdruck beim Abgasventilator ($d_{p,AGV}$), Unterdruck vor dem Multizyklon ($d_{p,MZ}$), Leistung von Abgasventilator (AGV) und Rezirkulationsventilator (RV), Abgastemperatur nach dem Thermoöl-Kessel ($T_{AG,Kessel}$), Abgastemperatur nach dem Heisswasser-Economizer ($T_{AG,ECO}$), Wärmeleistung der Biomassefeuerung ($\dot{Q}_{Bio,tot}$) und MNP-Energieanteil (MNP-Anteil). Blau hinterlegt: Reinigungen, grün hinterlegt: Umbau Heisswasser-Economizer und Einbau Airshoc-Abreinigung.



5 Schlussfolgerungen und Fazit

5.1 Potenzial und Logistik

Die Schlussfolgerungen zu den Arbeitspaketen 2 (Potenzial) und 3 (Logistik) werden aus den Berichten Sres (2015), Hälgi & Nussbaumer (2015) und Trecco & Hennemann (2015) wie folgt zusammengefasst:

- In der Schweiz besteht ein Potenzial an Müllereinebenenprodukten (MNP) zur Substitution fossiler Energieträger von rund 0.48 % des heutigen Endenergieverbrauchs. Daneben fallen weitere Biomasserückstände der Nahrungsmittelkette an, die jedoch nur geringe Potenziale aufweisen (Getreideabgang, Kaffee und Nüsse) oder die mit höherer Wertschöpfung genutzt werden (Zuckerrüben, Reis, Pflanzenöle und Kakaorückstände).
- Wenn der Energieverbrauch der Biomassefeuerung in Schafisheim wie ursprünglich geplant zur Hälfte mit MNP betrieben wird, beansprucht dies rund 1 % der in der Schweiz anfallenden Menge an MNP. Somit besteht ein grosses Potenzial für weitere Anlagen.
- Zur Deckung des Energieverbrauchs für den Backprozesse genügen am Beispiel von Brot rund 30 % der bei der Mehlproduktion anfallenden MNP. Die Brotherstellung führt somit zu einem Überschuss an biogenen Reststoffen, die anderweitig genutzt werden können.
- Für die Versorgung der Energiezentrale Schafisheim mit MNP ab der Getreidemühle Swissmill in Zürich wurde ein Konzept mit Pelletierung der staubförmig anfallenden MNP gewählt, da die Einsparungen bei Transport, Lagerung und Verbrennung als vorteilhaft beurteilt wurden.
- Um eine erhöhte Flexibilität für die Versorgung mit der Möglichkeit eines rein mit Holz befeuerten Betriebs zu erhalten, wurde ein Konzept gewählt, bei dem feuchte Waldhackschnitzel als Basisbrennstoff dienen, dem trockene MNP-Pellets vor der Feuerung beigemischt werden. Für die Verrechnung der zugekauften Holzschnitzel wurde festgelegt, dass der Energieinhalt der verbrannten Holzschnitzel aus einer Differenz zwischen Messungen zu Wärmemengen und Energieinhalt der MNP bestimmt.
- Zur Vermeidung von Ascheproblemen kommen Rostkühlung und Abgasrezirkulation zum Einsatz. Zur Staubabscheidung dient ein Elektroabscheider und zur Reduktion der durch MNP-Zugabe erhöhten Stickoxidemissionen wird eine Abgasentstickung nach dem SNCR-Verfahren genutzt.
- Die Erzeugung von Thermoöl zur Versorgung der Backlinien ermöglicht eine örtliche Trennung zwischen Wärmeerzeugung und Bäckerei und damit einen sicheren Einsatz von Biomassebrennstoffen in der Lebensmittelverarbeitung mit hohen Hygieneanforderungen. Damit können die fossilen CO₂-Emissionen nach Auslegung um mehr als 70 % reduziert und ein wichtiger Beitrag an die Klimaziele von Coop geleistet werden. Mit der Biomassezentrale werden jährlich rund 4000 Tonnen CO₂ eingespart.



5.2 Betrieb und Optimierung

Aus den im vorliegenden Bericht beschriebenen Resultaten werden für die Arbeitspakete 1 (Betrieb) und 4 (Optimierung) folgende Schlussfolgerungen zur Zielerreichung abgeleitet:

Ziel 1: Biogener Deckungsgrad

Der biogene Deckungsgrad zur Wärmeerzeugung soll mindestens 70 % erreichen. Mit der Anlagenauslegung der Biomassefeuerung auf rund einen Drittel der Spitzenlast der Gesamtanlage kann im Sommer ein biogener Deckungsgrad von über 80 % erreicht werden. Im Jahresmittel wurde bis anhin jedoch nur ein biogener Deckungsgrad von 55 % erzielt und der Zielwert somit nicht erreicht. Dies ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen:

1. Die Biomassefeuerung wurde bis anhin mit sehr defensiver Einstellung der Gesamtanlage betrieben, sodass die fossilen Kessel nicht nur für kurzfristige Leistungsspitzen zum Einsatz kamen, sondern während längerer Betriebsphasen bei hoher Leistung betrieben wurden. Besonders stark wirkt sich dies im Winter aus, wenn der Biomasseanteil bei erhöhtem Wärmebedarf auf einen tieferen Wert als im Sommer absinkt (im Beispiel von zwei Monaten im Jahr 2018 bei rund 67 % gegenüber rund 85 %). Die Auswertungen dazu zeigen, dass die Biomassefeuerung auch bei längeren Phasen mit hohem Wärmeleistungsbedarf nur mit rund 70 % der Nennleistung betrieben wird und dass der Betriebskühler die Regelung nicht geeignet verbessert.
2. Der Jahresmittelwert des Biomasseanteils wurde bis anhin dadurch eingeschränkt, dass die Biomassefeuerung aufgrund der MNP-Zuführung deutlich längere Stillstandszeiten für Reinigung und Unterhalt aufwies als geplant. Es wird davon ausgegangen, dass die entsprechende Ausfallzeit durch technische und betriebliche Massnahmen noch reduziert werden kann.

Ziel 2: Anteil Müllereinebenprodukte

Die Auslegung von Feuerungsanlage, Brennstofflagerung und Logistik basiert auf der Zielsetzung, die Biomassefeuerung mit 50 % Energieanteil an MNP zu betreiben. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen ist die Anlage nicht in der Lage, diesen Zielwert für einen Praxisbetrieb mit Reisezeiten von knapp 6 Monaten und zwei jährlichen Unterhaltsabschaltungen zu erreichen. Bis anhin war ein kurzfristiger Betrieb mit bis zu rund 35 % MNP möglich, während ein Betrieb über mehrere Wochen bis anhin erst mit MNP-Anteilen von weniger als 20 % gefahren werden konnte. Während sich die Zuführung von MNP nicht negativ auf die Schadstoffemissionen auswirkte (betreffend NO_x dank SCNR), führte sie zu betrieblichen Problemen und Einschränkungen infolge von Ablagerungsbildung in den der Brennkammer nachgeschalteten Bereichen der Anlage wie Wärmeübertragerflächen und Multizyklon. Obwohl die Situation durch aufwändige Nachrüstungen wie einer leistungsfähigeren Kesselabreinigung und der Vergrößerung der Gassenbreiten im Abgasweg des Economizers verbessert werden konnte, konnten die Ziele in Bezug auf Reisezeit und MNP-Anteil bis anhin nicht erreicht werden.

Die dadurch notwendige Limitierung des MNP-Anteils führt zu Einschränkungen in Bezug auf die Verwendung der als intern anfallende Rückstände verwendbaren MNP und verschlechtert die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Die als Motivation angestrebte Reduktion der CO₂-Emissionen aus fossilen Brennstoffen wird durch einen Betrieb mit Waldhackschnitzeln dagegen nicht infrage gestellt.



Ziel 3: CO-Emissionen

Der Zielwert der CO-Emissionen von weniger als 250 mg/m³ bei 11 Vol.-% O₂ konnte bei einem Regelbetrieb der Anlage nach einer Einschränkung der Brennstoffbandbreite deutlich unterschritten werden. Aufgrund des bisherigen Betriebs mit wiederholten Störungen und Einschränkungen betreffend Brennstoffanteilen wurden jedoch die Anforderungen der LRV an Stunden- und Tagesmittelwerte in einem Betriebsjahr nicht eingehalten. Die bisherigen Erfahrungen zeigen zudem, dass für einen emissionsarmen Betrieb der Anlage eine Einschränkung des Brennstoffwassergehalts auf einen Bereich zwischen rund 35 % und 50 % und auf Nadelholz erforderlich ist. Es wird davon ausgegangen, dass bei Einschränkung des Brennstoffsortiments auf diesen Wassergehalt verbunden mit der Vermeidung von Laubholz die Zielwerte der CO-Emissionen künftig eingehalten werden können.

Ziel 4: NO_x-Emissionen

Der Zielwert der NO_x-Emissionen von maximal 180 mg/m³ bei 11 Vol.-% O₂ als Mittelwert über eine Woche kann sicher eingehalten bzw. mit weniger als 120 mg/m³ deutlich unterschritten werden, sofern die Harnstoffeindüsung für die Abgasentstickung mittels SNCR-Anlage freigeschaltet ist. Im Jahr 2018 wurde der Wochenmittelwert einmal überschritten, was darauf zurückzuführen ist, dass die Harnstoffeindüsung nur bei Zufeuerung von MNP freigeschaltet war, was bei reinem Holzbetrieb zu erhöhten NO_x-Emissionen von bis zu knapp 250 mg/m³ führte.

Ziel 5: Staubemissionen

Der Elektroabscheider erzielt im Reingas bei Verbrennung von Waldhackschnitzeln mit oder ohne Zugabe von MNP Staubemissionen von weniger als 3 mg/m³ bei 11 Vol.-% O₂ und damit deutlich unter dem Grenzwert von 10 mg/m³. Die Überwachung der Verfügbarkeit zeigt, dass der Elektroabscheider bei einem Regelbetrieb der Feuerung ab 30 % Leistung eine hohe Verfügbarkeit von über 98 % aufweist und dass er auch während Phasen mit tageweisem Glutbettunterhaltsbetrieb der Feuerung in Betrieb blieb. Der Zielwert der Staubemissionen wurde damit sicher eingehalten und die Staubfracht wird im Vergleich zum für die Umweltverträglichkeitsprüfung angenommenen Wert deutlich unterschritten.

Ziel 6: Feuerungswirkungsgrad

Der Zielwert von 85 % Feuerungswirkungsgrad wurde im Abnahmebetrieb erreicht.



6 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Nach Abschluss des P+D-Projekts sind folgende Umsetzungsmassnahmen vorgesehen:

- Die Biomassefeuerung soll mit Waldhackschnitzel als Hauptbrennstoff betrieben werden, der durch Zugabe von MNP-Pellets als Zweitbrennstoff ergänzt und der MNP-Anteil dabei soweit erhöht wird, dass ein stabiler Betrieb mit einer Reisezeit von 3 bis 6 Monaten erreicht wird.
- Die Regelung der Energiezentrale soll so optimiert werden, dass das Einsatzpotenzial der Biomassefeuerung ausgeschöpft und der fossile Anteil durch Verminderung des Spitzenlastanteils auch im Winterbetrieb auf unter 30 % reduziert und im Jahresbetrieb ein biogener Deckungsgrad von deutlich über 70 % erreicht wird.
- Um auch im reinen Holzbetrieb NO_x-Emissionen von unter 120 mg/m³ im Wochenmittel sicher zu stellen, sollen die Blockierung der Harnstoffeindüsung bei Holzbetrieb aufgehoben und die Regelung der Eindüsung an die tieferen Rohgasgehalte für diesen Betrieb angepasst werden.
- Zum jährlichen Nachweis des Betriebsverhaltens und der Schadstoffemissionen wird im Verlauf des Jahres 2019 eine Auswertung der Betriebsdaten implementiert, die auf einem aus den Erfahrungen der bisherigen Anlagenüberwachung erarbeiteten Vorschlag basiert und von der Behörde bewilligt wurde. Dazu werden alle notwendigen Messwerte direkt aus dem Emissionsmessrechner und nicht wie für die Überwachung aus der Steuerung der Feuerung ausgelesen und die Daten zusammenfassend ausgewertet.
- Wie die Erfahrungen zeigen, wurde die Verwendung einer Mischung von zwei Biomassebrennstoffen unterschätzt, da die vorgesehene Brennstoffmischung mit der Anlage nach heutigem Stand der Technik nicht befriedigend genutzt werden kann. Um eine künftige Nutzung biogener Rückstände als Energieträger zu ermöglichen, wird empfohlen, vertiefte Grundlagenuntersuchungen zum Einsatz biogener Rückstände aus der Nahrungsmittelkette durchzuführen und für die Planung künftiger Anlagen zur Verfügung zu stellen.



7 Nationale und internationale Zusammenarbeit

- Im Rahmen der schweizerischen Mitarbeit in der Internationalen Energie-Agentur (IEA), insbesondere dem Bioenergy Agreement und der IEA Bioenergy Task 32 «Biomass Combustion», besteht eine Zusammenarbeit zu technischen und ökonomischen Fragen. Für das Projekt besonders relevant sind dabei die Themen Prozesswärme aus Biomasse sowie Nutzung anspruchsvoller Biomassebrennstoffe zur Energieerzeugung. Im Rahmen des Projekts wurde die P+D-Anlage unter anderem der IEA vorgestellt und als «Hot Case» auf der IEA Homepage dokumentiert.
- Die Erfahrungen aus dem P+D-Projekt fließen über die Hochschule Luzern in die Zusammenarbeit mit Partnerinstituten im SCCER Biosweet ein, darunter FHNW, PSI und HEIG.
- Im Rahmen eines ERA-NET-Projekts erfolgte in den Jahren 2016 bis 2019 eine Zusammenarbeit mit Institutionen aus Österreich (Bioenergy 2020+) und Schweden (Umea University und Lulea University of Technology) zur Entwicklung einer Feuerungstechnik für aschereiche Brennstoffe. Das schweizerische Projektteam von Verenum, Hochschule Luzern und Schmid AG energy solutions modellierte und konstruierte darin eine 150 kW-Schneckenfeuerung. Parallel dazu wurden an einer Kleinf Feuerung in Österreich und in Laborversuchen in Schweden Untersuchungen zur Verschlackung durchgeführt. Dafür wurden vom vorliegenden P+D-Projekt Brennstoffproben in Form von MNP-Pellets nach Österreich und Schweden geliefert. Aus dieser Zusammenarbeit resultieren gemeinsame Publikationen, unter anderem die Arbeiten von [Barroso et al. 2019].



8 Kommunikation

- Eröffnung der Logistikzentrale und Bäckerei in Schafisheim mit verschiedenen Kommunikations-Aktivitäten wie Tag der offenen Tür im Jahr 2016.
- Vorstellung des Projekts am Holzenergie-Symposium am 16. September 2016 durch das Projektteam ([G. Weinhofer et al. 2016] in Publikationsliste).
- Vorstellung des Projekts an die Mitglieder des IEA Bioenergy Implementing Agreements am 20.10.2017 mit Vortrag G. Weinhofer über Aktivitäten von Coop und von T. Nussbaumer zu Prozesswärmeerzeugung aus Biomass für Bäckerei.
- Medienmitteilungen und Infos auf der Homepage von Coop sowie in der Coop-Zeitung, z.B.: <https://www.coop.ch/de/ueber-uns/medien/medienmitteilungen/2016/coop-eroeffnet-groessten-logistikstandort-und-grossbaeckerei.html>
- Medienmitteilung Handelszeitung, 22.06.2016: Coop eröffnet gewaltige Bäckerei in Schafisheim. <https://www.handelszeitung.ch/unternehmen/coop-eroeffnet-gewaltige-baekerei-schafisheim-1122333>
- Medienmitteilung B. Vogel, Bundesamt für Energie, August 2016: https://www.infothek-biomasse.ch/images//298_2016_BFE_Backhitze.pdf
- Diskussion der Resultate in der Combustion Task des SCCER Biosweet durch T. Nussbaumer.
- Präsentation in der IEA Bioenergy Task 32 «Biomass Combustion» durch T. Nussbaumer.
- Aufarbeitung als «Hot Case» für die IEA Bioenergy durch T. Nussbaumer, November 2018: <http://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/03/The-bakery-that-runs-on-heat-from-biomass.pdf>.



9 Publikationen

- Hälg, L.; Nussbaumer, T.: *Staubförmiger Biomassebrennstoff für den Thermoölprozess, Arbeitspaket 2 - Potenzial (Teil 1. Mengen und Brennstoffeigenschaften)*, Verenum, Zürich 31. März 2015
- Nussbaumer, T.: *The bakery that runs on heat from biomass*, IEA Strategic Study on Renewable Heat – “Hot Cases”, November 2018, <http://task32.ieabioenergy.com>, direkter Link: <http://task32.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2019/03/The-bakery-that-runs-on-heat-from-biomass.pdf>
- Nussbaumer, T.; Lauber, A.; Good, J.: *Vorschlag für Auswertungen Emissionsrechner*. Arbeitspapier zu Händen Amt für Umwelt Kanton Aargau, 10 Seiten, Zürich 24.6.2019 (vertraulich)
- Trecco, S.; Hennemann, P.: *Projekt Staubförmiger Biomasse-Brennstoff für den Thermoölprozess: Optimierung der Aufbereitung und Logistik von MNP zur Nutzung als Brennstoff*, eicher+pauli, Bern und Liestal 3.3.15
- Sres, A.: *Staubförmiger Biomassebrennstoff für den Thermoölprozess, Arbeitspaket 2 - Potenzial (Teil 2: Technologie)*, eicher+pauli, Bern 27. März 2015
- Weinhofer, G.; Hennemann, P.; Nussbaumer, T.: *Grossbäckerei Schafisheim: Backen mit Müllereinebenprodukten und Energieholz*, 14. *Holzenergie-Symposium*. ETH Zürich 16.9.16, Verenum, ISBN 3-908705-31-2, 173–192, www.holzenergie-symposium.ch

10 Literaturverzeichnis

- Barroso, G.; Nussbaumer, T.; Ulrich, M.; Reiterer, T.; Feldmeier, S.: *Scale-up methodology for automatic biomass furnaces*, *Journal of the Energy Institute*, 14 June 2019,
- Barroso, G.; Reiterer, T.; Ulrich, M.; Feldmeier, S.; Nussbaumer, T.: *Schneckenrostfeuerung*, 15. *Holzenergie-Symposium*. ETH Zürich 14.9.18, Verenum Zürich, 89–110
- Lauber, A.; Nussbaumer, T.: *Betriebsüberwachung von Holzfeuerungen mit Elektroabscheider*, 13. *Holzenergie-Symposium*, ETH Zürich 12.9.2014, Verenum 2014, ISBN 3-908705-25-8, 105–127
- LRV: *Der Schweizerische Bundesrat: Luftreinhalte-Verordnung (LRV) vom 16. Dezember 1985*, Stand am 16. April 2019, Artikel 814.318.142.1, www.admin.ch
- Nussbaumer, T., Good, J.: *Wirkungsgradbestimmung bei Holzfeuerungen*, *SIA Zeitschrift*, 11 1994, 169–171
- QM Holzheizwerke: Good, J. et al., *Planungshandbuch, Schriftenreihe QM Holzheizwerke Band 4*, C.A.R.M.E.N. e.V., 2. Auflage, 2008, ISBN 3-937441-94-8, Bezug: www.qmholzheizwerke.ch



11 Anhang

11.1 Berechnungen der Wärmeleistungen aus dem Leitsystem

Tabelle 2 beschreibt die verwendeten Begriffe der Wärmeleistungen.

Tabelle 2 beschreibt das Vorgehen zur Bestimmung der Leistungen aus Daten aus dem Leitsystem.

Tabelle 1 Begriffe und Symbole der verschiedenen Wärmeleistungen.

Name	Bezeichnung	Einheit
Thermoöl	$\dot{Q}_{\text{Bio, Thermoöl}}$	kW
Betriebskühler	$\dot{Q}_{\text{Bio, Betriebskühler}}$	kW
Wasser Niedertemperatur	$\dot{Q}_{\text{Bio, Wasser}<100\text{C}}$	kW
Wasser Hochtemperatur	$\dot{Q}_{\text{Bio, Wasser}>100\text{C}}$	kW
Wasser Notkühler	$\dot{Q}_{\text{Notkühler}}$	kW
WRG Fossil-Kessel 1	$\dot{Q}_{\text{K1, WRG}}$	kW
WRG Fossil-Kessel 2	$\dot{Q}_{\text{K2, WRG}}$	kW

Tabelle 2 Berechnungsgrundlagen für die Wärmeleistungen aus Daten, die aus dem Gebäudeleitsystem aufgezeichnet wurden. Das Gebäudeleitsystem zeichnet die produzierten Wärmemengen und die verbrauchten Brennstoffmengen in einem Zeitintervall von 15 Minuten auf. Für die Auswertung wird die Differenz zwischen dem ersten und dem letzten Messwert im ausgewerteten Zeitintervall verwendet.

Name	Bezeichnung	Einheit	Berechnung
Gas Fossil-Kessel 1	$\dot{Q}_{\text{K1, Gas}}$	kW	Gas-Volumenstrom \cdot 10 kWh/m ³ \cdot η_{K} $\eta_{\text{K}} = 0.85$ (geschätzt)
Gas Fossil-Kessel 2	$\dot{Q}_{\text{K2, Gas}}$		
Öl Fossil-Kessel 1	$\dot{Q}_{\text{K1, Öl}}$	kW	Öl-Volumenstrom \cdot 11.8 kWh/l \cdot η_{K} $\eta_{\text{K}} = 0.85$ (geschätzt)
Öl Fossil-Kessel 2	$\dot{Q}_{\text{K2, Öl}}$		
Total Biomasse	$\dot{Q}_{\text{Biomasse}}$	kW	$\dot{Q}_{\text{Bio, Thermoöl}} + \dot{Q}_{\text{Bio, Betriebskühler}} + \dot{Q}_{\text{Bio, Wasser}<100\text{C}} + \dot{Q}_{\text{Bio, Wasser}>100\text{C}}$
Total Fossil	\dot{Q}_{Fossil}	kW	$(\dot{Q}_{\text{K1, Gas}} + \dot{Q}_{\text{K1, Öl}} + \dot{Q}_{\text{K1, WRG}}) + (\dot{Q}_{\text{K2, Gas}} + \dot{Q}_{\text{K2, Öl}} + \dot{Q}_{\text{K2, WRG}})$
Biomasseanteil	Biomasse-Anteil	%	$\frac{\dot{Q}_{\text{Biomasse}}}{\dot{Q}_{\text{Biomasse}} + \dot{Q}_{\text{Fossil}}}$



11.2 Auswertung der Emissions- und Feuerungsdaten

Tabelle 3 beschreibt die Grundlagen zur Bestimmung von Emissionswerten und Feuerungskenngrößen aus Daten, die aus der Steuerung der Biomassefeuerung aufgezeichnet wurden. Die Bestimmung der thermischen und chemischen Abgasverluste erfolgt nach [Nussbaumer & Good 1994].

Tabelle 3 Berechnungsgrundlagen zur Auswertung der Messwerte aus der Kohlbach-Steuerung.
Die Datenerfassung erfolgt mit einem Messwert pro Sekunde.

Name	Bezeichnung	Einheit	Berechnung
Sauerstoff Kohlenmonoxid Stickoxide	O ₂ CO NO _x	mg/m ³ bei 11 Vol.-% O ₂	Normierung auf die O ₂ -Bezugsgrösse aus den Mittelwerten über das ausgewiesene Zeitintervall.
Abgastemperatur	T _{AG}	°C	
Wärmeleistung Thermoöl	$\dot{Q}_{\text{Thermoöl}}$	kW	
CO-Messbereichs- überschreitung	t _{CO>Messbereich}	%	Anteil Messwerte ≥ 750 mg/m ³
Wassergehalt	w	%	Annahme: 45 % • (1 – C _{MNP}) + 15 % • C _{MNP}
Heizwert	h _i	kWh/kg	Annahme: 5.08 kWh/kg • (1-C _{MNP}) + 4.4 kWh/kg • C _{MNP}
Thermische-Verluste ²	V _{therm}	%	$\frac{(T_{\text{Abgas}}-20) \cdot 1.39 + \frac{122}{21 \cdot \text{O}_2 - \text{CO}} + 0.02 \cdot u}{\frac{H_{i,\text{atro}}}{100} - 0.2442 \cdot u}$
Chemische-Verluste	V _{chem}	%	$\frac{\text{CO}}{\text{CO}_2 + \text{CO}} \cdot \frac{11800}{\frac{18300}{100} - 0.2442 \cdot u}$
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	η _{Feuerung}	%	100 – (V _{therm, Thermoöl} + V _{chem})
Verfügbarkeit Elektroabscheider	V _{Elektroabscheider}	%	Anteil Messwerte mit U > 0.6 U _{ref} und I > 0.3 I _{ref}
Abgasvolumenstrom	V _{AG}	m ³ /h	$\frac{\lambda \cdot \dot{Q}_{\text{FWL}} \cdot 4.58}{h_i}$
SNCR Molzahl	n _{SNCR}	–	$\frac{V_{\text{HS}} \cdot \frac{2 \cdot C_{\text{Harnstoff}}}{M_{\text{HS}}}}{V_{\text{AG}} \cdot \frac{C_{\text{NO}_x, \text{Rohgas}}}{M_{\text{NO}_2}}}$ mit C _{NO_x, Rohgas} = 380 mg/m ³ (Annahme)
MNP-Massenstrom	\dot{m}_{MNP}	kg/h	Gemittelt über 30 Minuten + zusätzlich rollender Mittelwert über 2 Stunden
Input-Leistung MNP	\dot{Q}_{MNP}	kW	$\dot{m}_{\text{MNP}} \cdot 4.4 \text{ kWh/kg}$
MNP-Anteil	C _{MNP}	%	$\frac{\dot{Q}_{\text{MNP}} \cdot \eta_K}{\dot{Q}_{\text{Thermoöl}}}$



11.3 Berechnung des MNP-Anteils

Zu Beginn des Projekts stand nur der Thermoöl-Wärmezähler von Kohlbach zur Verfügung. Daraus wurde der MNP-Anteil mit starken Vereinfachungen berechnet (Tabelle 4, Variante 1). Für die Output-Leistung wurde der Thermoöl-Wärmezähler von Kohlbach verwendet, welcher den Thermoöl-Kessel und -Economizer beinhaltet. Für die Abgastemperatur wurde jedoch das Signal des Temperaturfühlers zwischen dem Kessel und Economizer verwendet (Bild 27) und weil zur Rostkühlung kein Signal zur Verfügung stand, wurde diese nicht berücksichtigt. Als Folge der nicht kongruenten Bilanzgrenzen sind die Daten somit ungenau.

Neu wird der MNP-Anteil gemäss der im Brennstoff-Liefervertrag definierten Formel aus den Wärmezählerdaten von Coop berechnet (Variante 2).

Als dritte Variante kann die Bilanzgrenze nach dem Thermoöl-Kessel gesetzt werden (Variante 3). Diese dritte Variante ergibt höhere MNP-Anteile.

Tabelle 4 Berechnungsgrundlagen zur Ermittlung des MNP-Anteils in Abweichung zu den Formeln aus Tabelle 3. Unterschieden werden die Variante 1 (bisher), Variante 2 (nach Brennstoff-Liefervertrag) und Variante 3 (nach Thermoöl-Kessel).

Name	Bezeichnung	Einheit	Berechnung
Variante 1 (bisher)	\dot{Q}_{Output} T_{AG}	kW °C	$\dot{Q}_{\text{Thermoöl}}$ (Kohlbach-Wärmezähler) Abgastemperatur zwischen Thermoöl-Kessel und Thermoöl-Economizer
Variante 2 (Brennstoff-Liefervertrag)	\dot{Q}_{Output} T_{AG}	kW °C	$\dot{Q}_{\text{Bio, Thermoöl}} + \dot{Q}_{\text{Bio, Betriebskühler}} + \dot{Q}_{\text{Bio, Wasser}<100\text{C}} + \dot{Q}_{\text{Bio, Wasser}>100\text{C}}$ Abgastemperatur nach Heisswasser-Economizer
Variante 3 (Thermoöl-Kessel)	\dot{Q}_{Output} T_{AG}	kW °C	$(\dot{Q}_{\text{Bio, Thermoöl}} + \dot{Q}_{\text{Bio, Betriebskühler}}) / \Delta T_{\text{Thermoöl-Total}} \cdot \Delta T_{\text{Thermoöl-Kessel}} + \dot{Q}_{\text{Bio, Wasser}<100\text{C}}$ Abgastemperatur zwischen Thermoöl-Kessel und Thermoöl-Economizer
Thermische-Verluste	V_{therm}	%	$\frac{(T_{\text{AG}}-20) \cdot 1.39 + \frac{122}{21 \cdot \text{O}_2\text{-CO}} + 0.02 \cdot u}{\frac{H_{\text{i,atro}}}{100} - 0.2442 \cdot u}$
Feuerungstechnischer Wirkungsgrad	η_{Feuerung}	%	$100 - (V_{\text{therm, Thermoöl}} + V_{\text{chem}})$ (Strahlungsverluste sind nicht berücksichtigt)
MNP-Massenstrom	\dot{m}_{MNP}	kg/h	Gemittelt über 30 Minuten und zusätzlich rollender Mittelwert über 2 Stunden
Input-Leistung MNP	\dot{Q}_{MNP}	kW	$\dot{m}_{\text{MNP}} \cdot 4.8 \text{ kWh/kg} \cdot (1 - M_{\text{MNP}})$ (M = 11%)
MNP-Anteil	C_{MNP}	%	$\frac{\dot{Q}_{\text{MNP}} \cdot \eta_{\text{K}}}{\dot{Q}_{\text{Output}}}$

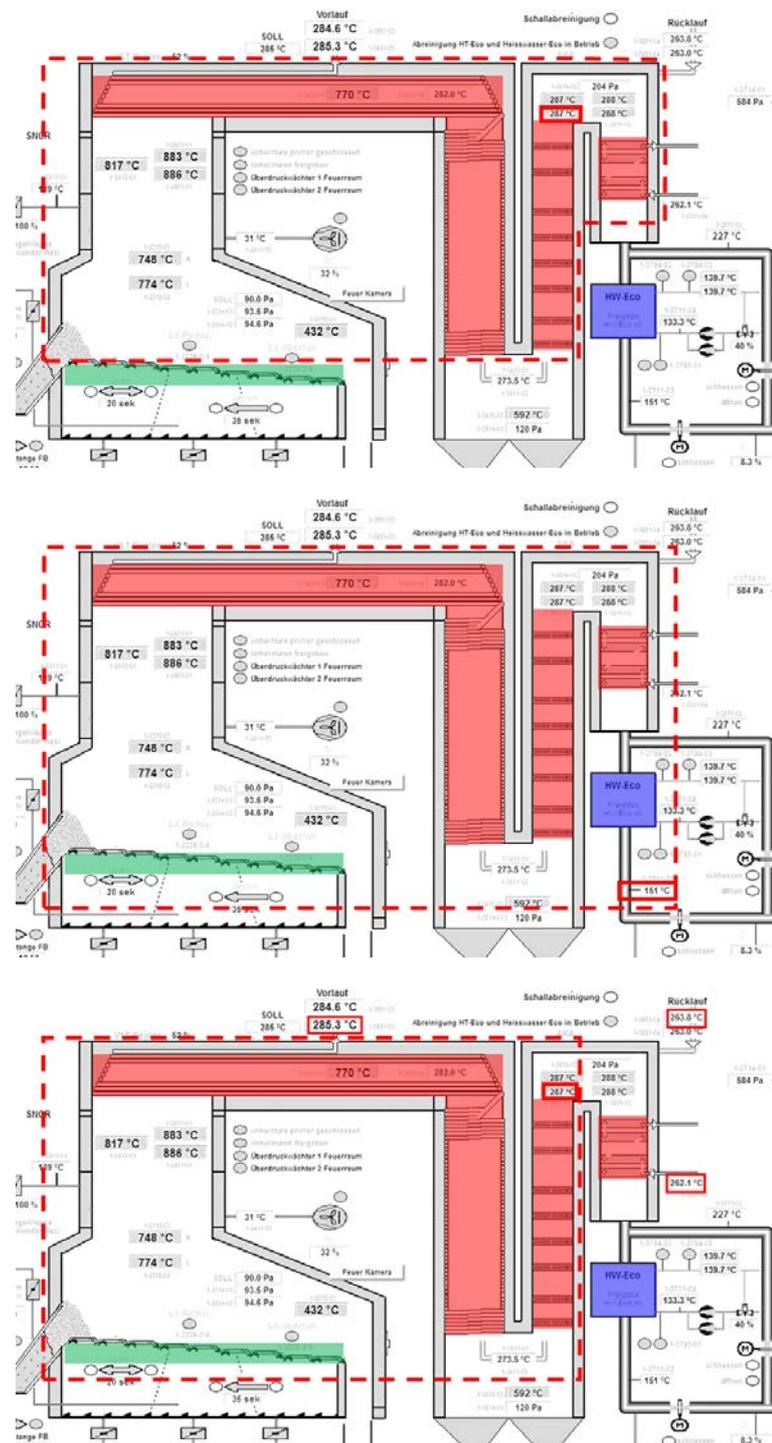


Bild 27 Bilanzgrenzen der drei Varianten zur Berechnung des MNP-Anteils. Die Grenzen unterscheiden sich durch die berücksichtigten Wärmehähler von Thermoöl (rot), Rostkühlung mit Wasser (grün) und Heisswasser-Economizer (blau). Die verwendeten Temperatursensoren sind rot umrandet. Oben: bis Ende 2019 in den Monatsberichten angewendete Variante mit Vereinfachung. Mitte: Variante unter Verwendung aller Wärmehähler gemäss Holzliefervertrag. Unten: Variante mit Bilanzgrenze nach dem Kessel ohne Thermoöl- und Heisswasser-Economizer.