



Institut für Prozeßtechnik,  
Prozeßautomatisierung  
und Meßtechnik

*Fachgebiet Kraftwerks-, Dampferzeuger- und Feuerungstechnik*



Hochschule  
Zittau/Görlitz

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES



Europäische Union

Europa fördert Sachsen.



Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung



# Forschungsbericht: Katalytische Vergasungsversuche am Holzvergaser-BHKW des TCV

Institut für Prozeßtechnik, Prozeßautomatisierung und Meßtechnik  
Fachgebiet Kraftwerks-, Dampferzeuger- und Feuerungstechnik

Autor(en):

Dipl.-Ing. (FH) Roman Schneider

Dipl.-Ing. (FH) Ralf Pohl

Dr.-Ing. Ulf Sénéchal

Prof. Dr.-Ing. habil. Tobias Zschunke

Zittau, 25.01.2017

# Inhalt

1	Zusammenfassung.....	5
2	Motivation und Ziel .....	6
3	Vorgehen.....	7
4	Kurzbeschreibung der Anlage .....	11
5	Kurzbeschreibung der Messtechnik.....	12
6	Beschreibung der Messfahrten.....	13
6.1	Allgemeines Vorgehen .....	13
6.2	Übersicht Messfahrten.....	13
7	Laboranalysen von Brennstoff und Filterstaub .....	14
7.1	Analysemethoden zur Bestimmung.....	14
7.1.1	Wassergehaltsbestimmung im Trockenschrank .....	14
7.1.2	Kurzanalyse .....	14
7.1.3	Brennwertbestimmung .....	14
7.1.4	Elementaranalyse.....	14
7.1.5	PAK-Analyse .....	15
7.2	Probenmaterial.....	15
7.3	Ergebnisse der Brennstoffanalyse.....	15
7.4	Ergebnisse der Filterstaubanalyse .....	16
7.5	Zusammenfassende Darstellung.....	20
8	Auswertung der Messfahrten.....	24
8.1	Stoffströme .....	27
8.1.1	Brennstoff.....	27
8.1.2	Produktgas / Vergasungsmittel.....	27
8.1.3	Filterstaub.....	52
8.2	Störungen.....	59
8.3	Betreiberaufwand hinsichtlich Mischung HHS und Katalysator .....	59
8.4	Anlagenfahrweise.....	59
9	Bewertung der Katalysatorwirkung beim Einsatz in einem kleintechnischen Holzvergaser .....	61

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Temperaturverläufe der Reformierluft vor dem Reformereintritt, MF 28.9.16 .....	7
Abbildung 3-2:	Zugabe des Katalysators zu den HHS .....	8
Abbildung 3-3:	Mischung von HHS und Katalysator.....	8
Abbildung 3-4:	KAT-HHS.....	8
Abbildung 3-5:	KAT-HHS im Tagesbehälter .....	8
Abbildung 3-6:	Messstelle MS1 (Produktgas nach Reformier).....	9
Abbildung 3-7:	Messstelle MS3 (Produktgas vor Gewebefilter).....	9
Abbildung 3-8:	Messstelle MS3 (Produktgas vor Motor) .....	9
Abbildung 3-9:	Produktgasabsaugung und Waschflaschenapparatur MS2.....	9
Abbildung 3-10:	Produktgasabsaugung und Waschflaschenapparatur MS1.....	9
Abbildung 3-11:	Filterstaubaustragsschleuse mit Sammelbehälter .....	10
Abbildung 5-1:	Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der MF zur Bewertung des Katalysatoreinsatzes .....	12
Abbildung 7-1:	Darstellung der PAK-Beladung des Filterstaubes bei Standard- und KAT-HHS, MF 14.4.16.....	18
Abbildung 7-2:	Darstellung der PAK-Beladung des Filterstaubes bei Standard- und KAT-HHS, MF 28.9.16.....	19
Abbildung 7-3:	Grafische Darstellung der Kurzanalysenergebnisse des Filterstaubes (PN...Probenahme), MF 14.4.16 .....	21
Abbildung 7-4:	Grafische Darstellung der Kurzanalysenergebnisse des Filterstaubes (PN...Probenahme), MF 2.5.16.....	22
Abbildung 7-5:	Grafische Darstellung der Kurzanalysenergebnisse des Filterstaubes (PN...Probenahme), MF 28.9.16 .....	23
Abbildung 8-1:	Zusammensetzung des Produktgases während MF3 mit Kennzeichnung des Zeitraumes der KAT-Wirkung .....	25
Abbildung 8-2:	Temperaturverlauf des Produktgases am Austritt des Reformers während der MF.....	26
Abbildung 8-3:	Darstellung der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung von Standard-HHS (braun) inkl. Vergleich mit KAT-HHS (grün), MF 14.4.16.....	30
Abbildung 8-4:	Darstellung der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung von Standard-HHS (braun) inkl. Vergleich mit KAT-HHS (grün) sowie der berechneten isothermen Gleichgewichte für Standard-HHS (blau) und KAT-HHS (gelb), MF 2.5.16 .....	31
Abbildung 8-5:	Darstellung der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung von Standard-HHS (braun) inkl. Vergleich mit KAT-HHS (grün) sowie der berechneten adiabaten Gleichgewichte für Standard-HHS (blau) und KAT-HHS (gelb), MF 2.5.16 .....	32
Abbildung 8-6:	Darstellung der chemischen Gleichgewichte im Produktgas unter isothermen sowie adiabaten Bedingungen, basierend auf den Produktgaszusammensetzungen und -temperaturen bei der Vergasung von Standard-HHS und KAT-HHS, MF 2.5.16 .....	33
Abbildung 8-7:	Darstellung der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung von Standard-HHS (braun) inkl. Vergleich mit KAT-HHS (grün), MF 28.9.16.....	34
Abbildung 8-8:	Darstellung der PAK-Beladung des Produktgases bei Standard-HHS, MF 14.4.16 .....	35

Abbildung 8-9:	Darstellung der PAK-Beladung des Produktgases bei KAT-HHS, MF 14.4.16 .....	36
Abbildung 8-10:	Vergleich der Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motor, MF 14.4.16 .....	37
Abbildung 8-11:	Vergleich der Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motor, MF 2.5.16 .....	38
Abbildung 8-12:	Vergleich der Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motor, MF 28.9.16 .....	39
Abbildung 8-13:	Vergleich der Normvolumenströme für Produktgas und Vergasungsmittel hinsichtlich MF 14.4.16 .....	40
Abbildung 8-14:	Vergleich der Normvolumenströme für Produktgas und Vergasungsmittel hinsichtlich MF 2.5.16 .....	41
Abbildung 8-15:	Vergleich der Normvolumenströme für Produktgas und Vergasungsmittel hinsichtlich MF 28.9.16 .....	42
Abbildung 8-16:	Vergleich der Produktgasenergieströme und der BHKW-Leistung, MF 14.4.16 .....	43
Abbildung 8-17:	Vergleich der Produktgasenergieströme und der BHKW-Leistung, MF 2.5.16 .....	44
Abbildung 8-18:	Vergleich der Produktgasenergieströme und der BHKW-Leistung, MF 28.9.16 .....	45
Abbildung 8-19:	Darstellung der berechneten Luftzahl bei der MF 14.4.16 .....	46
Abbildung 8-20:	Darstellung der berechneten Luftzahl bei der MF 2.5.16 .....	47
Abbildung 8-21:	Darstellung der berechneten Luftzahl bei der MF 28.9.16 .....	48
Abbildung 8-22:	Gebläseleistung und Absolutdrücke in der Produktgasstrecke während der MF 14.4.16 .....	49
Abbildung 8-23:	Gebläseleistung und Absolutdrücke in der Produktgasstrecke während der MF 2.5.16 .....	50
Abbildung 8-24:	Gebläseleistung und Absolutdrücke in der Produktgasstrecke während der MF 28.9.16 .....	51
Abbildung 8-25:	Massenströme von Brennstoff und Filterstaub, MF 14.4.16 .....	53
Abbildung 8-26:	Massenströme von Brennstoff und Filterstaub, MF 2.5.16 .....	54
Abbildung 8-27:	Massenströme von Brennstoff und Filterstaub, MF 28.9.16 .....	55
Abbildung 8-28:	Asche- und $C_{fix}$ -Anteile des Filterstaubes, MF 14.4.16 .....	56
Abbildung 8-29:	Asche- und $C_{fix}$ -Anteile des Filterstaubes, MF 2.5.16 .....	57
Abbildung 8-30:	Asche- und $C_{fix}$ -Anteile des Filterstaubes, MF 28.9.16 .....	58
Abbildung 8-31:	Verlauf der Druckverhältnisse in der Produktgasstrecke während der MF 28.9.16 .....	60

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten .....	8
Tabelle 5-1:	Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme .....	12
Tabelle 6-1:	Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten .....	13
Tabelle 7-1:	Wassergehalt der getrockneten HHS bei der jeweiligen MF .....	15
Tabelle 7-2:	Kurzanalysenergebnisse der Standard-HHS.....	16
Tabelle 7-3:	Elementaranalyse der Standard-HHS.....	16
Tabelle 7-4:	Kurzanalysenergebnisse der Filterstäube geordnet nach MF und Versuchsphase .....	16
Tabelle 7-5:	Elementaranalysenergebnisse der Filterstäube geordnet nach Messfahrt und Versuchsphase .....	17
Tabelle 7-6:	Zusammenfassende Darstellung der Analysenergebnisse .....	20
Tabelle 8-1:	Brennstoffbedarf bei Verwendung von Standard- bzw. KAT-HHS.....	27
Tabelle 8-2:	Heizwert des Produktgases bei Verwendung von Standard- bzw. KAT-HHS...	27
Tabelle 8-3:	Volumenstrom Produktgas und Vergasungsmittel sowie Produktgasleistung in den Auswertungszeiträumen.....	29
Tabelle 8-4:	Anfall und Charakterisierung der Filterstaubproben .....	52
Tabelle 9-1:	Zusammenfassung der erfassten BHKW-Leistungen und berechneten BHKW- Wirkungsgraden .....	61

# 1 Zusammenfassung

Die Vergasungsversuche mit dem an der Hochschule Zittau/Görlitz (HSZG) für Zwecke der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung betriebenen Holzvergaser-BHKW bei Verwendung einer Mischung aus Standard-Hackschnitzeln (Standard-HHS) und drei Katalysatoren der Fa. GNS haben im Vergleich mit dem Einsatz von ausschließlich Standard-HHS eine Veränderung des Vergasungsverhaltens bestätigt. Hinsichtlich des Brennstoffmassenstroms konnte aufgrund fehlender Tendenz keine Aussage zu einem ggf. steigenden oder sinkenden Brennstoffbedarf bei Einsatz der Katalysatoren getroffen werden. Jedoch wurden während der Vergasungsversuche mit Zumischung der Katalysatoren signifikante Unterschiede der Stoff- und Energieströme im Vergleich zur Vergasung der Standard-HHS bei identischen Anlageneinstellungen festgestellt. Hinsichtlich der aufgeführten Auswirkungen wurden auch Unterschiede zwischen den verwendeten Katalysatoren (KAT) festgestellt. So waren diese bei Einsatz des KAT1 deutlicher ausgeprägt als bei KAT2 und KAT3.

Die wesentlichen zu beobachtenden Auswirkungen des Katalysatoreinsatzes waren folgende:

- Absinken der Reaktionstemperaturen
- Steigerung des Ascheanteils im Filterstaub
- Anstieg der PAK-Beladung im Filterstaub

Darüber hinaus führte die tendenzielle Änderung der Produktgaszusammensetzung zu einer Steigerung des Produktgasheizwertes, wobei in diesem Zusammenhang die Messunsicherheiten der jeweiligen Sensoren und die Schwankungsbreite der Messdaten berücksichtigt werden müssen. Vor allem die Änderung der Produktgaszusammensetzung und als Folge dessen die Steigerung des Produktgasheizwertes bildet die Grundlage für die Bewertung des Katalysatoreinsatzes. Somit konnte tendenziell bei Zumischung der Katalysatoren mehr Brennstoffenergie in chemisch gebundene Energie des Produktgases umgewandelt werden. Jedoch konnte das entstehende energetisch höherwertigere Produktgas nicht äquivalent im BHKW in elektrische Energie umgewandelt werden. Demzufolge sank bei Katalysatoreinsatz der Motorwirkungsgrad. Die beschriebenen Effizienzverbesserungen hinsichtlich der Vergasung wurden somit durch Effizienzverluste der internen motorischen Verbrennung aufgehoben. Die Ursachen für letzteres sind noch nicht abschließend geklärt und sollten in weiterführenden Untersuchungen aufgedeckt werden.

Diesbezüglich konnte im Rahmen der MF auch keine positive Beeinflussung der Anlagenwirtschaftlichkeit durch die Katalysatorzugabe erreicht werden.

## 2 Motivation und Ziel

Am Versuchsstand der HSZG zur Biomassevergasung (Thermochemisches Versuchsfeld (TCV)) werden üblicherweise Nadelholz-Hackschnitzel (HHS) aus Stamm- und Waldrestholz gemäß G30/G50 nach ÖNORM M 7133 (Norm veraltet, neu P31S/P45S nach DIN EN ISO 17225-4) als Brennstoff eingesetzt. Mit dem Ziel, die Vergasungsreaktionen näher an die jeweiligen Gleichgewichtszustände heranzuführen, was als gleichbedeutend mit einer Verbesserung des thermochemischen Umsetzungsprozess angesehen wird, wurden über die Fa. GNS<sup>1</sup> drei verschiedene Prozesskatalysatoren auf Basis carbonatischer bzw. sauerstoffhaltiger Verbindungen erworben. [3]

Im Rahmen der Messfahrten (MF) sollten die auftretenden Prozessänderungen bei Zumischung dieser Katalysatoren zu den HHS mit der vorhandenen Messtechnik erfasst und dargestellt werden, um anschließend diese mit den Referenzfahrten bei Verwendung des Standardbrennstoffes zu vergleichen. Dabei bezog sich die Auswertung hauptsächlich auf den Vergasungsprozess und die entsprechenden Stoffströme (Brennstoff, Vergasungsmittel, Produktgas, Filterstaub), um anschließend die Wirkung des Katalysatoreinsatzes bewerten zu können.

---

<sup>1</sup> <http://www.gns-halle.de>

### 3 Vorgehen

Für die Durchführung der Vergasungsversuche wurde im Rahmen des TCV folgende Anlage eingesetzt:

- Holz-Kraft-Anlage der Fa. Spanner Re<sup>2</sup> GmbH (30 kW<sub>el</sub> Nennleistung; 70 kW<sub>th</sub> Nennleistung)

Als Referenz wurden zu Beginn der jeweiligen MF Standard-HHS als Brennstoff eingesetzt. Für den Vergleich zwischen den Standard- und KAT-HHS wurde die jeweilige MF immer an einem Tag durchgeführt, sodass im Rahmen der MF (14.4.16; 2.5.16; 28.9.16) im ersten Teil die Standard-HHS und im zweiten Teil die KAT-HHS eingesetzt wurden. Um eine Entmischung der HHS und des Katalysators zu verhindern, wurde die vorhandene Feinanteilsiebung in der Hackschnitzelzufuhr blockiert und dies für alle MF beibehalten. Der zeitliche Bereich der Versuchsdatenauswertung wurde erst nach dem Erreichen des jeweiligen stationären Zustandes ausgewählt und nahm bei den MF zwei bis drei Stunden ein. Die Bestimmung des zeitlichen Beginns des stationären Zustandes erfolgte durch die Temperatur des Vergasungsmittels (Messstellenbezeichnung T1206) direkt am Eintritt des Reformers. Konnte eine konstante Temperatur der Luft (ca. 235 °C) nach der Vorwärmung nachgewiesen werden, wurde von einem stationären Betrieb ausgegangen (siehe Abbildung 3-1).

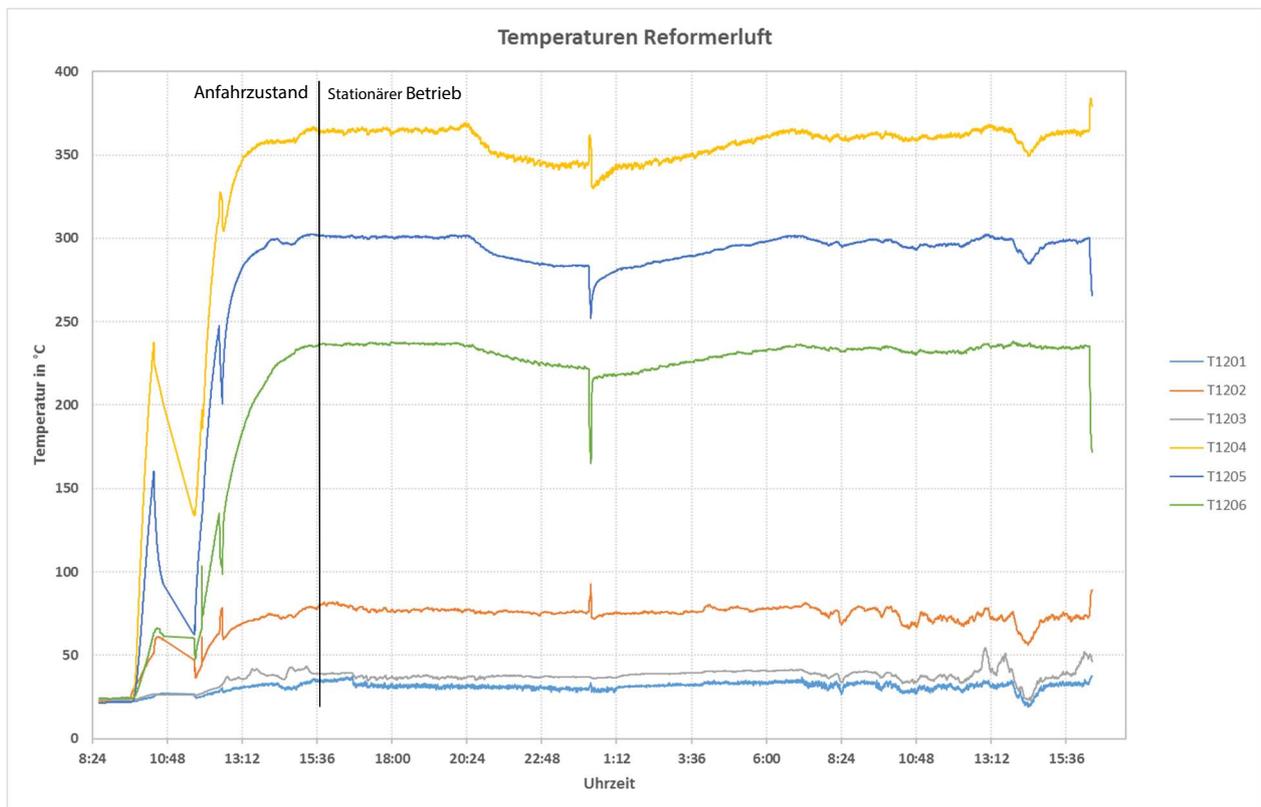


Abbildung 3-1: Temperaturverläufe der Reformierluft vor dem Reformereintritt, MF 28.9.16

Nach Umstellung auf die Fahrweise mit Zugabe der Katalysatoren wurde ca. 2 bis 3 h abgewartet und dann die Versuchsdatenauswertung wieder über zwei bis drei Stunden durchgeführt. Im Rahmen der MF kamen drei verschiedene Katalysatormaterialien (KAT1; KAT2; KAT3) zum Einsatz. Die Zugabeintensität der Katalysatoren betrug nach Absprache mit der Fa. GNS bei den MF 2 Ma.-% bezogen auf das Brennstoffinput. Der Wassergehalt der getrockneten HHS nahm bei der ersten MF ca. 7 bis 9 Ma.-%, bei der zweiten MF ca. 8 bis 10 Ma.-% und bei der dritten MF ca. 6 Ma.-% ein.

Tabelle 3-1: Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

	Einheit	Messfahrten		
Datum		14.4.16	2.5.16	28.9.16
Bezeichnung		KAT1	KAT2	KAT3
Zugabeintensität KAT	Ma.-%*	2	2	2
Auswertungszeitraum	h	2,0	2,0	3,0
Wassergehalt HHS	Ma.-%	ca. 7 bis 9	ca. 8 bis 10	ca. 6

\*die Angabe bezieht sich auf die Brennstoffinputmasse

Hinsichtlich der Anlageneinstellungen wurde diese bei allen MF unverändert beibehalten. Die Mischung der getrockneten HHS und des Katalysators erfolgte **manuell** in Mischbehältern (vgl. Abbildung 3-2, Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4), die dann wieder dem Tagesbehälter zugegeben wurden (vgl. Abbildung 3-5). Die HHS wurden zuvor dem Tagesbehälter entnommen, abgewogen und die entsprechende Masse Katalysator wie beschrieben zugegeben. Für die nachfolgende Auswertung wird die Mischung aus HHS und Katalysator mit KAT-HHS bezeichnet.



Abbildung 3-2: Zugabe des Katalysators zu den HHS



Abbildung 3-4: KAT-HHS



Abbildung 3-3: Mischung von HHS und Katalysator



Abbildung 3-5: KAT-HHS im Tagesbehälter

Bei der Durchführung der Versuche erfolgte die Erfassung der Produktgaszusammensetzung ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ) und des Betriebsverhaltens der Anlage (Brennstoffbedarf, Filterstaubanfall, Volumenströme, Temperaturen, Absolutdrücke, Leistung, Störungen). Außerdem wurde während der ersten MF die PAK-Beladung des Produktgases an drei verschiedenen Messstellen (MS1=Reformeraustritt, MS2=Eintritt Gewebefilter, MS3=Eintritt Motor) er-

fasst. Die Probenahmen und anschließende Analysen wurde durch die RWTH Aachen (Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER)) vorgenommen.

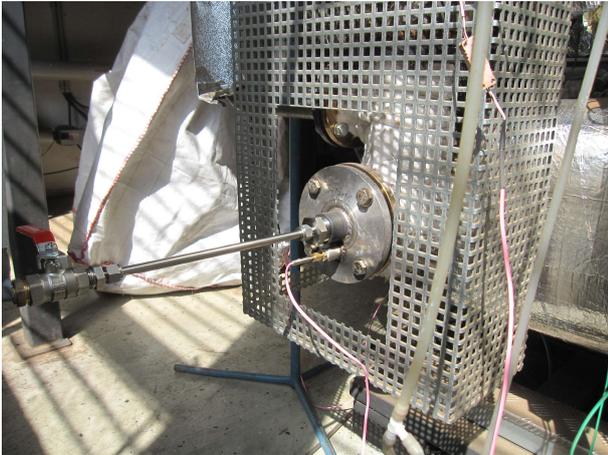


Abbildung 3-6: Messstelle MS1 (Produktgas nach Reformer)



Abbildung 3-9: Produktgasabsaugung und Waschflaschenapparat MS2



Abbildung 3-7: Messstelle MS3 (Produktgas vor Gewebefilter)



Abbildung 3-10: Produktgasabsaugung und Waschflaschenapparat MS1



Abbildung 3-8: Messstelle MS3 (Produktgas vor Motor)

Darüber hinaus wurden Proben des eingesetzten Brennstoffes und des entsprechend anfallenden Filterstaubes genommen und im Labor hinsichtlich ihrer Zusammensetzung etc. analysiert. Die Anlage wurde während der MF ohne Nachreformer betrieben, sodass nur der Filterstaub direkt aus dem Gewebefilter erfasst und analysiert wurde. Dies erfolgte über eine am Gewebefilteraustrag zusätzlich installierte Feststoffschleuse (bestehend aus Schieber; vgl.

Abbildung 3-11), die das standardmäßig verbaute System ersetzte und somit den Nachreformer überbrückte.



**Abbildung 3-11: Filterstaubaustragsschleuse mit Sammelbehälter**

Abschließend erfolgte eine Beschreibung und Auswertung der durchgeführten Arbeiten inkl. Zusammenstellung und Diskussion der ermittelten Daten und Ergebnisse.

## 4 Kurzbeschreibung der Anlage

Bezüglich der Anlagenbeschreibung (Biomassetrocknung, Biomassevergasungs-BHKW) wird auf die vorhandene umfangreiche Dokumentation verwiesen. [1]

## 5 Kurzbeschreibung der Messtechnik

Die im TCV eingesetzte Messtechnik (Brennstoffbedarf, Temperaturen, Produktgasmenge und -zusammensetzung, Anlagenleistung, Datenerfassung etc.) wird in der vorhandenen Dokumentation umfangreich beschrieben. [1]

Einen Überblick der identifizierten Stoffströme und deren für eine Bilanzierung erfassten Eigenschaften gibt Tabelle 5-1 wieder. Die dazu zur Verfügung stehenden Mess- und Probenahmestellen sind in Abbildung 5-1 ersichtlich.

Tabelle 5-1: Erfasste Eigenschaften der maßgeblichen Stoffströme

Stoffstrom	Eigenschaften
Brennstoff (HHS)	Massenstrom, Zusammensetzung
Produktgas	Volumenstrom, Temperatur, Absolutdruck, PAK-Beladung
Filterstaub	Massenstrom, Zusammensetzung, PAK-Beladung
Vergasungsmittel/Vergaserluft	Volumenstrom, Temperatur

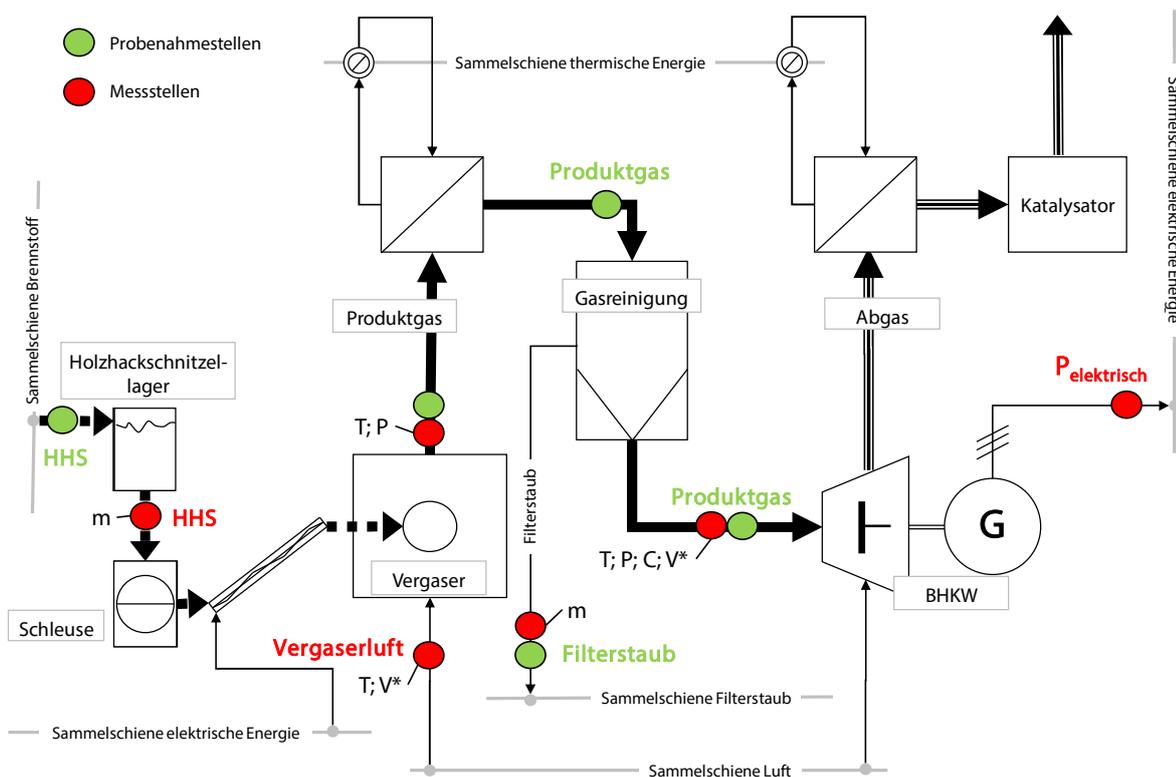


Abbildung 5-1: Übersicht der Mess- und Probenahmestellen im Rahmen der MF zur Bewertung des Katalysatoreinsatzes

## 6 Beschreibung der Messfahrten

### 6.1 Allgemeines Vorgehen

Zur Protokollierung des Versuches wurden alle aktuellen Messdaten (Brennstoffmasse, Temperaturen, Produktgasanalyse, Anlagenleistung) im 10 s Messintervall erfasst und in einer Versuchsdatenbank abgelegt. Außerdem wurden evtl. aufgetretene Anlagenstörungen, durchgeführte Probenahmen u.ä. im Logbuch protokolliert. Während der Versuchsfahrten wurden mehrere Brennstoffproben direkt aus der Fördereinrichtung entnommen. Die Filterstaubprobenahmen erfolgten während der jeweiligen Versuchsfahrt im Zuge der Abwägung der aufgefängenen Filterstaubmasse, die zum Versuchsende aufsummiert wurden.

### 6.2 Übersicht Messfahrten

Zur Übersicht sind in folgender Tabelle 6-1 die durchgeführten Messfahrten dargestellt. Bezüglich der Messfahrt am 13.4.16 wurden nur Standard-HHS ohne Katalysator eingesetzt. Diese MF diente somit nur dem Einfahren der Anlage und dem Test der zu verwendenden Messtechnik. Die verwendeten HHS wurden zuvor getrocknet, wobei versucht wurde, einen einheitlichen Wassergehalt zu erreichen (vgl. Kapitel 8.4).

Am 14.4.16 wurde wiederum die Anlage mit Standard-HHS eingefahren, nach dem Erreichen des stationären Zustandes die Datenauswertung als Referenz vorgenommen (11:35 bis 13:35 Uhr) und ab ca. 13:45 Uhr der KAT1 den HHS im Tagesbehälter beigemischt. Erste Änderungen der Temperatur und Zusammensetzung des Produktgases waren ab ca. 14:30 Uhr zu detektieren. Die entsprechende Datenauswertung erfolgte von 16:30 bis 18:30 Uhr.

Am 2.5.16 wurde in analoger Art und Weise die Anlage mit Standard-HHS eingefahren, im stationären Zustand die Referenzdatenauswertung vorgenommen (13:30 bis 15:30 Uhr) und anschließend auf KAT2 umgestellt (Einsatzbeginn KAT-HHS ab 15:00 Uhr im Tagesbehälter). Erste Änderungen hinsichtlich Temperatur und Zusammensetzung des Produktgases wurden ab ca. 15:46 Uhr festgestellt. Die Datenauswertung zum Katalysatoreinsatz erfolgte im Zeitraum von 16:50 bis 18:50 Uhr.

Zur MF am 28.9.16 wurde der jeweilige Versuchszeitraum von 2 auf 3 h verlängert und die Anlage ab 11:40 Uhr mit Standard-HHS eingefahren. Die Datenauswertung im stationären Zustand erfolgte von 17:00 bis 20:00 Uhr. Die KAT-HHS wurden ab ca. 19:30 Uhr dem Tagesbehälter zugeführt und erste Prozessänderungen (Temperatur und Zusammensetzung des Produktgases) ab ca. 20:16 Uhr festgestellt. Die Auswertung des Katalysatoreinsatzes entsprach dem Zeitraum von 21:15 bis 0:15 Uhr.

Tabelle 6-1: Übersicht der durchgeführten Versuchsfahrten

Datum	Einheit	Messfahrten			
		13.4.16	14.4.16	2.5.16	28.9.16
Bezeichnung			MF 1	MF 2	MF 3
Startzeit	h:min	10:30	08:14	07:55	11:40
Endzeit	h:min	19:15	18:45	18:50	16:25**
Versuchsdauer Gesamt	h	8,75	10,52	10,92	28,75
Versuchsdauer Standard-HHS	h	8,75	6,27	7,85	23,75
Auswertung Standard-HHS	h	-	2,0	2,0	3,0
Versuchsdauer KAT-HHS	h	-	4,25	3,07	5,0
Auswertung KAT-HHS	h	-	2,0	2,0	3,0
Durchsatz-Standard-HHS*	kg/h	28,6	29,2	29,6	28,5
Durchsatz KAT-HHS*	kg/h	-	28,9	29,4	29,5

\*bezieht sich nur auf den Zeitraum der Auswertung

\*\*bezieht sich auf den 29.9.16

## 7 Laboranalysen von Brennstoff und Filterstaub

### 7.1 Analysenmethoden zur Bestimmung

Das Labor für Brennstoffanalytik an der HSZG verfügt über vielfältige Analysemöglichkeiten hinsichtlich der Brennstoffbewertung. Auf das entnommene Probenmaterial wurden folgende Analysemethoden angewendet. Zum einen wurden Kurzanalysen nach DIN 51718-51720 durchgeführt und der Brennwert der Brennstoffproben nach DIN 51900-1/-3 bestimmt. Weiterhin wurde der Wassergehalt der Brennstoffproben nach DIN EN 14774-2 für die jeweilige Messfahrt im Trockenschrank bestimmt. Darüber hinaus wurden sowohl der Brennstoff als auch die Filterstaubproben hinsichtlich ihrer Elementarzusammensetzung nach DIN 51732/51733 und DIN 51724-3 analysiert.

Alle Analysedaten der jeweiligen Probe wurden hinsichtlich ihrer Abweichung zueinander nach den geltenden Normen (DIN 51734 und DIN ISO 5725-5) bewertet und nur die Daten ausgewertet, die hinsichtlich ihrer Abweichung zueinander die Präzisionsvorgaben erreichten.

#### 7.1.1 Wassergehaltsbestimmung im Trockenschrank

Die Brennstoffprobe wird bei einer Temperatur von  $(105\pm 2)$  °C bis zum Erreichen der Massenkonzanz in einem Trockenschrank unter Luftatmosphäre getrocknet. Aus dem Massenverlust der Probe wird der prozentuale Anteil des Gesamtwassers berechnet.

#### 7.1.2 Kurzanalyse

Zur Analyse wird ein Thermogravimetrisches Multianalysensystem TGA701 der Fa. LECO<sup>2</sup> verwendet. Es wird das Gewicht von Grundstoffen (hier im speziellen Fall: Wasser, flüchtige Bestandteile, fixer Kohlenstoff und Asche) in einem Stoffgemisch Brennstoff untersucht. Dazu wird der Gewichtsverlust der Proben in Abhängigkeit von der Ofentemperatur innerhalb einer kontrollierten Gasumgebung gemessen.

#### 7.1.3 Brennwertbestimmung

Mittels eines Verbrennungskalorimeters der Fa. IKA<sup>3</sup> wird die Bestimmung des Brennwertes fester und flüssiger Brennstoffe vorgenommen. Dabei wird in einem geschlossenen Reaktionsgefäß (Aufschlussgefäß/kalorimetrische Bombe) der Brennstoff nach elektrischer Zündung mit überschüssigem Sauerstoff vollkommen und vollständig verbrannt. Die bei der Verbrennung freiwerdende Wärmemenge erhöht die Temperatur eines Wasserbades, in dem sich das Reaktionsgefäß befindet. Diese Temperaturerhöhung ist ein direktes Maß für den Energiegehalt der verbrannten Substanz.

#### 7.1.4 Elementaranalyse

Eine bekannte Masse der Probe wird in Sauerstoff oder in einem Sauerstoff-Trägergas-Gemisch so verbrannt, dass sie in Asche und gasförmige Verbrennungsprodukte umgewandelt wird. Diese bestehen hauptsächlich aus Kohlenstoffdioxid, Wasserdampf, elementarem Stickstoff und/oder Stickstoffoxiden, Schwefeloxiden und -oxosäuren sowie Halogenwasserstoffen. Die Verbrennungsprodukte werden so behandelt, dass sichergestellt ist, dass der Wasserstoff von schwefel- oder halogenidhaltigen Verbrennungsprodukten als Wasserdampf freigesetzt wird. Stickstoffoxide werden zu Stickstoff reduziert und Verbrennungsprodukte,

---

<sup>2</sup> <http://de.leco-europe.com/product/tga701/>

<sup>3</sup> <http://www.ika.de/>

die die nachfolgenden Gas-Analyseverfahren beeinträchtigen könnten, entfernt. Direkt danach werden die gebildeten Verbrennungsgase (Oxidationsprodukte) mit Hilfe eines Trägergases (meist reines Helium) über einen ca. 600 – 900°C heißen Kupfer- oder Wolframkontakt (als Späne oder Granulat) geführt und im Gasstrom enthaltene Stickoxide (NO<sub>x</sub>) vollständig zu molekularem Stickstoff (N<sub>2</sub>) reduziert. Anschließend werden die definierten Verbrennungsgase (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) gaschromatographisch separiert und nacheinander einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) zugeführt und quantifiziert. Da bei dieser Messmethode die Reihenfolge der Elemente (jeweils als sog. Peaks detektiert) in einer Probenmessung technisch exakt festgelegt ist, erlaubt dies sowohl die eindeutige Identifizierung (qualitative Bestimmung) sowie über die Peakflächen (Integral über die Zeit) der Messsignale auch gleichzeitig die Mengenerfassung (quantitative Bestimmung) der einzelnen Elemente als C, H, N, S. Mit Hilfe der bekannten Einwaage und des angegebenen Probenwassergehaltes lässt sich dann der jeweilige Massenanteil (in Prozent oder ppm) bestimmen.

### 7.1.5 PAK-Analyse

Die PAK-Analyse der Produktgasproben zur ersten MF wurde durch die RWTH Aachen mit einem GC-MS-System durchgeführt.

Die PAK-Analyse der Filterstaubproben (MF 1 und MF 3) erfolgte in einem akkreditierten Prüflaboratorium gemäß DIN EN 15527 nach vorheriger Heißextraktion mit Toluol.

## 7.2 Probenmaterial

Als Brennstoff wurden Kiefer-HHS gemäß P31S/P45S<sup>4</sup> verwendet. Diese wurden vor dem Einsatz auf den gewünschten Wassergehalt (ca. 6-10 Ma.-%) getrocknet. Die jeweilige Probenahme erfolgte im Brennstoffstrom bei Eintritt der HHS in den Tagesbehälter. Die Filterstaubproben aus dem Gewebefilter wurden im Zuge der Sammelbehälterabwägung während der jeweiligen Messfahrt entnommen.

## 7.3 Ergebnisse der Brennstoffanalyse

Die Ergebnisse der Wassergehaltsbestimmung der eingesetzten Brennstoffe sind nachfolgend sowohl vor als auch nach der Trocknung für die jeweiligen Messfahrten in Tabelle 7-1 zusammengestellt.

**Tabelle 7-1: Wassergehalt der getrockneten HHS bei der jeweiligen MF**

Messfahrt	Wassergehalt HHS PN Tagesbehälter Ma.-%
2016-04-13	9,2
2016-04-14	8,5
2016-05-02	9,7
2016-09-28	6,3

Die Ergebnisse der Kurzanalyse des eingesetzten Brennstoffes sind nachfolgend, auf wasserfreien Zustand (TS) umgerechnet, in Tabelle 7-2 zusammengestellt.

<sup>4</sup> nach DIN EN ISO 17225-4

**Tabelle 7-2: Kurzanalysenergebnisse der Standard-HHS**

Probennummer	Fixer Kohlenstoff Ma.-% TS	Flüchtige Bestandteile Ma.-% TS	Asche Ma.-% TS
20160030/39/105_MW	16,8	82,7	0,50

Die Elementaranalyse der eingesetzten HHS ergab die in Tabelle 7-3 dargestellten, auf die Trockensubstanz (TS) bezogenen Massenprozent der Elemente N/C/H/S. Der Anteil des Elementes O wurde rechnerisch aus der Summe der analysierten Elemente und der Asche ermittelt.

**Tabelle 7-3: Elementaranalyse der Standard-HHS**

Probennummer	N Ma.-% TS	C Ma.-% TS	H Ma.-% TS	S Ma.-% TS	O_rechn Ma.-% TS	A Ma.-% TS
20160030/39/105_MW	0,04	51,6	5,65	0,00	42,2	0,50

#### 7.4 Ergebnisse der Filterstaubanalyse

Die Ergebnisse der Kurzanalyse bezüglich der jeweiligen Filterstaubproben sind in der Tabelle 7-4 zusammengestellt. Dabei wurde unterschieden zwischen den Filterstaubprobenahmen der jeweiligen Messfahrt. Der Entnahmeort der Proben ist im Kapitel 7.2 beschrieben.

**Tabelle 7-4: Kurzanalysenergebnisse der Filterstäube geordnet nach MF und Versuchsphase**

Probennummer	Versuchsphase	Analysenfeuchtigkeit Ma.-%	Flüchtige Bestandteile Ma.-%	Fixer Kohlenstoff Ma.-%	Asche Ma.-%
MF 14.4.16_20160034	Standard-HHS	2,2	15,4	61,6	20,84
MF 14.4.16_20160035		1,1	11,7	64,6	22,61
MF 14.4.16_20160037	KAT-HHS Typ1	1,4	15,9	56,9	25,88
MF 14.4.16_20160038		1,3	21,6	42,4	34,79
MF2.5.16_20160043	Standard-HHS	0,8	16,1	61,2	21,94
MF 2.5.16_20160044		0,8	14,6	63,5	21,14
MF 2.5.16_20160045	KAT-HHS Typ2	1,8	14,6	60,0	23,60
MF 2.5.16_20160046		1,6	16,4	52,9	29,12
MF 28.9.16_20160100	Standard-HHS	2,3	12,5	70,7	14,54
MF 28.9.16_20160101		2,2	11,7	71,9	14,17
MF 28.9.16_20160103	KAT-HHS Typ3	1,9	18,3	52,2	27,63
MF 28.9.16_20160104		1,8	19,3	52,4	26,49

Die Elementaranalyse der Filterstaubproben ergab die in Tabelle 7-5 dargestellten, auf die Trockensubstanz (TS) bezogenen Massenprozent der Elemente N/C/H/S. Der Anteil des Elementes O wurde rechnerisch aus der Summe der analysierten Elemente und der Asche ermittelt.

Tabelle 7-5: Elementaranalysenergebnisse der Filterstäube geordnet nach Messfahrt und Versuchsphase

Probennummer	Versuchsphase	N Ma.-% TS	C Ma.-% TS	H Ma.-% TS	S Ma.-% TS	O_rechn Ma.-% TS	A Ma.-% TS
MF 14.4.16_20160034	Standard-HHS	0,20	70,9	0,74	0,08	6,77	21,31
MF 14.4.16_20160035		0,18	74,5	0,62	0,00	1,85	22,85
MF 14.4.16_20160037	KAT-HHS Typ1	0,16	67,9	0,83	0,07	4,88	26,16
MF 14.4.16_20160038		0,14	58,6	0,68	0,00	5,42	35,16
MF2.5.16_20160043	Standard-HHS	0,14	73,2	0,85	0,07	5,96	22,12
MF 2.5.16_20160044		0,15	73,6	0,85	0,07	3,39	21,31
MF 2.5.16_20160045	KAT-HHS Typ2	0,18	68,2	0,75	0,04	4,31	24,02
MF 2.5.16_20160046		0,16	64,6	0,77	0,03	1,45	29,59
MF 28.9.16_20160100	Standard-HHS	0,24	82,2	0,76	0,00	1,92	14,88
MF 28.9.16_20160101		0,24	82,1	0,75	0,00	2,40	14,49
MF 28.9.16_20160103	KAT-HHS Typ3	0,18	67,7	0,80	0,00	3,15	28,17
MF 28.9.16_20160104		0,17	68,2	0,83	0,00	3,80	26,98

Die extern durchgeführten Analysen der Filterstaubproben hinsichtlich der PAK-Beladung ergab einen signifikanten Unterschied beim Einsatzvergleich der Standard- und KAT-HHS (vgl. Abbildung 7-1 und Abbildung 7-2). Wird die Summe der EPA-PAK bei Standard-HHS und KAT-HHS miteinander verglichen, kann bei Einsatz der KAT-HHS ein Anstieg der PAK-Beladung um absolut ca. 650 bzw. 1680 mg/kg TS detektiert werden.

## EPA-PAK Messung im Filterstaub, Standard-/KAT-HHS, 14.4.16

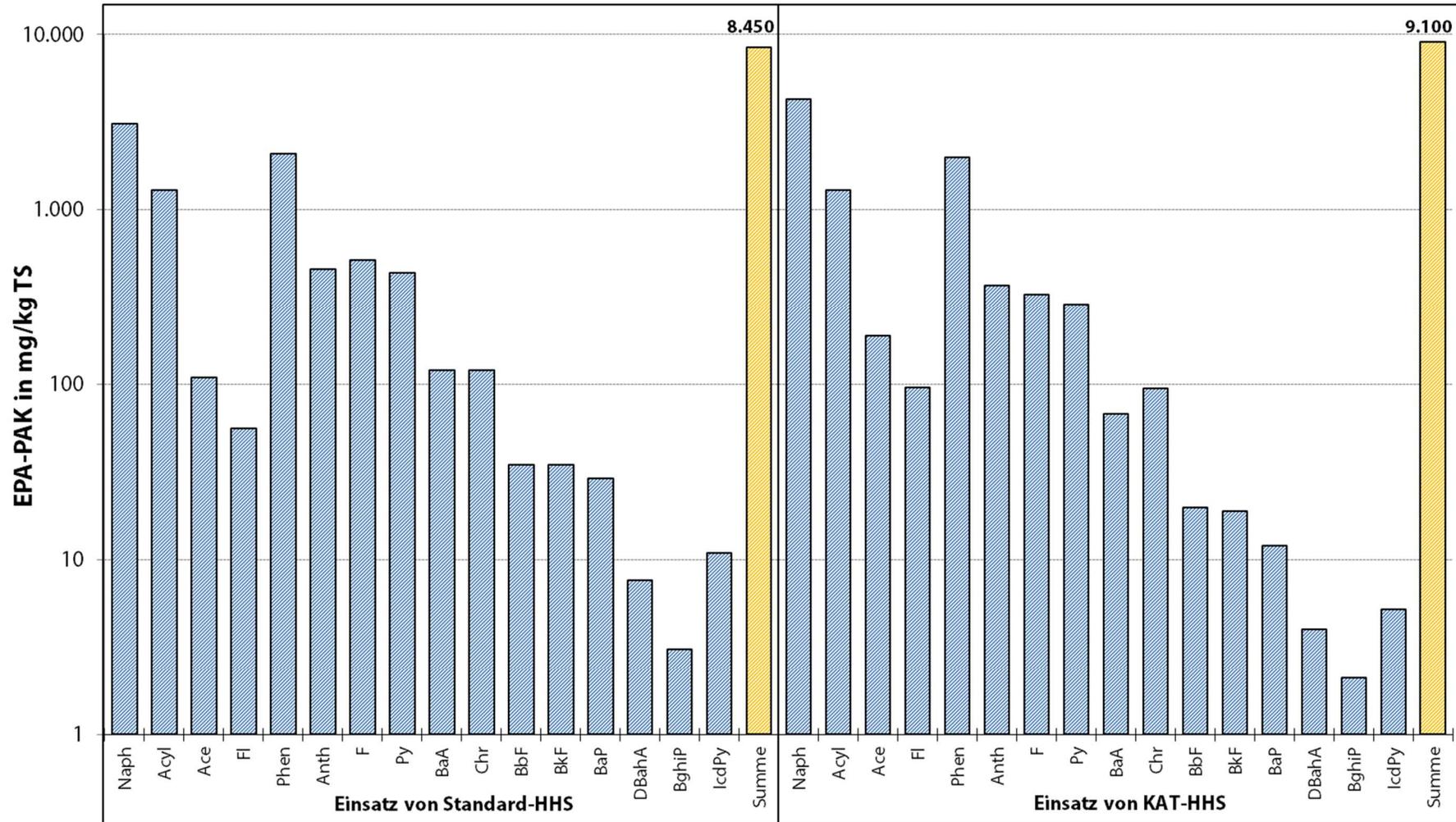


Abbildung 7-1: Darstellung der PAK-Beladung des Filterstaubes bei Standard- und KAT-HHS, MF 14.4.16

## EPA-PAK Messung im Filterstaub, Standard-/KAT-HHS, 28.9.16

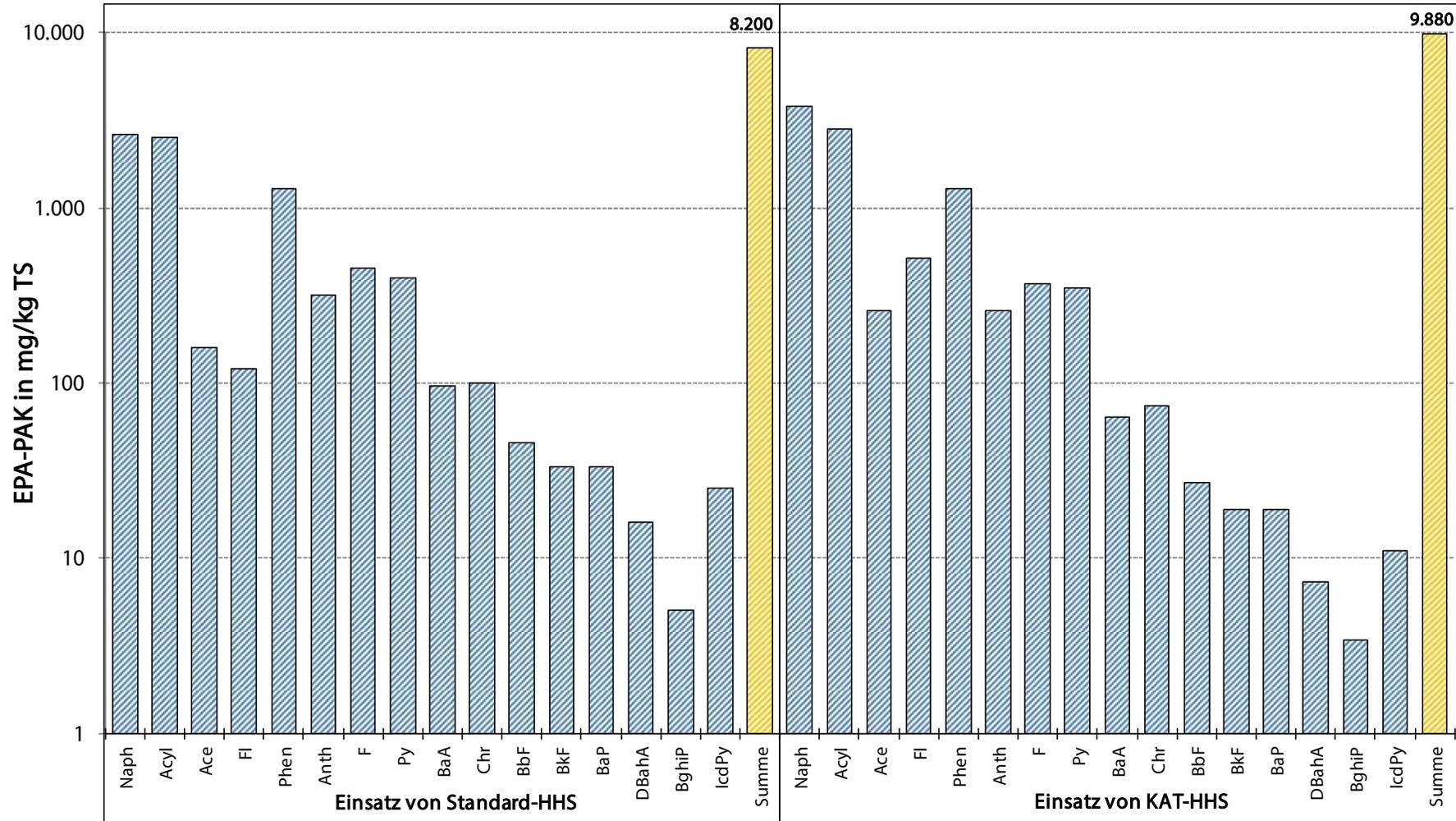


Abbildung 7-2: Darstellung der PAK-Beladung des Filterstaubes bei Standard- und KAT-HHS, MF 28.9.16

## 7.5 Zusammenfassende Darstellung

Als Überblick werden in Tabelle 7-6 die Ergebnisse der wichtigsten Brennstoff- und Filterstaubanaysen (unterteilt in Art und Datum der MF) dargestellt.

Tabelle 7-6: Zusammenfassende Darstellung der Analyseergebnisse

		MF14.4.16			MF 2.5.16		MF 28.9.16	
	Einheit	Standard-HHS	Filterstaub Standard	Filterstaub KAT1	Filterstaub Standard	Filterstaub KAT2	Filterstaub Standard	Filterstaub KAT3
A	Ma.-%	0,46	21,73	30,34	21,54	26,36	14,36	27,06
W*	Ma.-%	8,4	1,6	1,3	0,8	1,7	2,3	1,9
F	Ma.-%	75,8	13,6	18,8	15,4	15,5	12,1	18,8
C <sub>fix</sub>	Ma.-%	15,4	63,1	49,6	62,3	56,5	71,3	52,3
C	Ma.-% TS	51,6	72,7	63,3	73,4	66,4	82,2	68,0
H	Ma.-% TS	5,65	0,68	0,76	0,85	0,76	0,76	0,82
N	Ma.-% TS	0,04	0,19	0,15	0,15	0,17	0,24	0,18
S	Ma.-% TS	0,00	0,04	0,04	0,07	0,04	0,00	0,00
O	Ma.-% TS	42,2	4,3	5,2	3,8	5,8	2,2	3,5

\* bezieht sich auf die Analysenfeuchtigkeit

Um die durchgeführten katalytischen Vergasungsversuche grafisch zusammenfassend darzustellen, sind die entsprechenden Analyseergebnisse der zugehörigen Proben des Filterstaubes in Abbildung 7-3, Abbildung 7-4 und Abbildung 7-5 der entsprechenden Messfahrten dargestellt. Darüber hinaus sind die Aschegehalte der jeweiligen Probe als Zahlenwert im Diagramm aufgeführt. Dabei ist ersichtlich, dass sich der Aschegehalt des Filterstaubes mit Einsatz der Katalysatoren erhöht. Dies könnte auf folgende Ursachen zurückzuführen sein:

- Der Brennstoffumsatz wird mit Zugabe der Katalysatoren verbessert.
- Durch die mit dem Katalysator zusätzlich in den Prozess zugeführte Asche erhöht sich der Aschegehalt im Filterstaub.

Um den Ascheanteil des Katalysators in seiner Größenordnung beschreiben zu können, wurde ein Katalysator einer Kurzanalyse unterzogen. Dabei wurde ein Ascheanteil von ca. 80 Ma.-% TS analysiert. Da folglich mit dem Katalysator ein nicht unerheblicher Anteil an Asche dem Prozess zusätzlich zugeführt wird, kann die bewertende Aussage, dass mit dem Katalysatoreinsatz eine Verbesserung des Brennstoffumsatzes verbunden ist, durch die gestiegenen Ascheanteile in den Filterstäuben nicht belegt werden. Weitere Betrachtungen zur Thematik werden in Kapitel 8.1.3 vorgenommen.

Zwischen den einzelnen MF traten Unterschiede hinsichtlich der Filterstaubzusammensetzung auf. So ist der Ascheanteil bei Zugabe des KAT1 ausgeprägter als bei KAT2 und KAT3. Außerdem ist erkennbar, dass die Veränderung der Filterstaubzusammensetzung eine relativ große zeitliche Verzögerung zum Beginn des Katalysatoreinsatzes einnimmt. Daher sollte bei zukünftigen Messfahrten ein längerer Betrieb gewährleistet werden. Dies wurde bei dem Versuch KAT3 berücksichtigt und eine größere Menge des Katalysators (3 kg statt wie bisher 2 kg) eingesetzt, um somit eine längere Versuchsfahrt zu ermöglichen (3 h statt wie bisher 2 h). Außerdem wurde bei MF 3 nach der Fahrweise mit KAT-HHS direkt anschließend die Anlage mit Standard-HHS weiter betrieben. Dabei wurde deutlich, dass die Wirkung des Katalysators bis zu 6 Stunden nach der letzten Zugabe nachlassend nachgewiesen werden kann (vgl. Abbildung 8-1). Die Ursache hierfür könnte eine gewisse Entmischung des Katalysators von den HHS auf dem Weg durch die Transportschnecken und der Schleusen sein.

## Kurzanalyse Filterstaub; MF 14.4.16

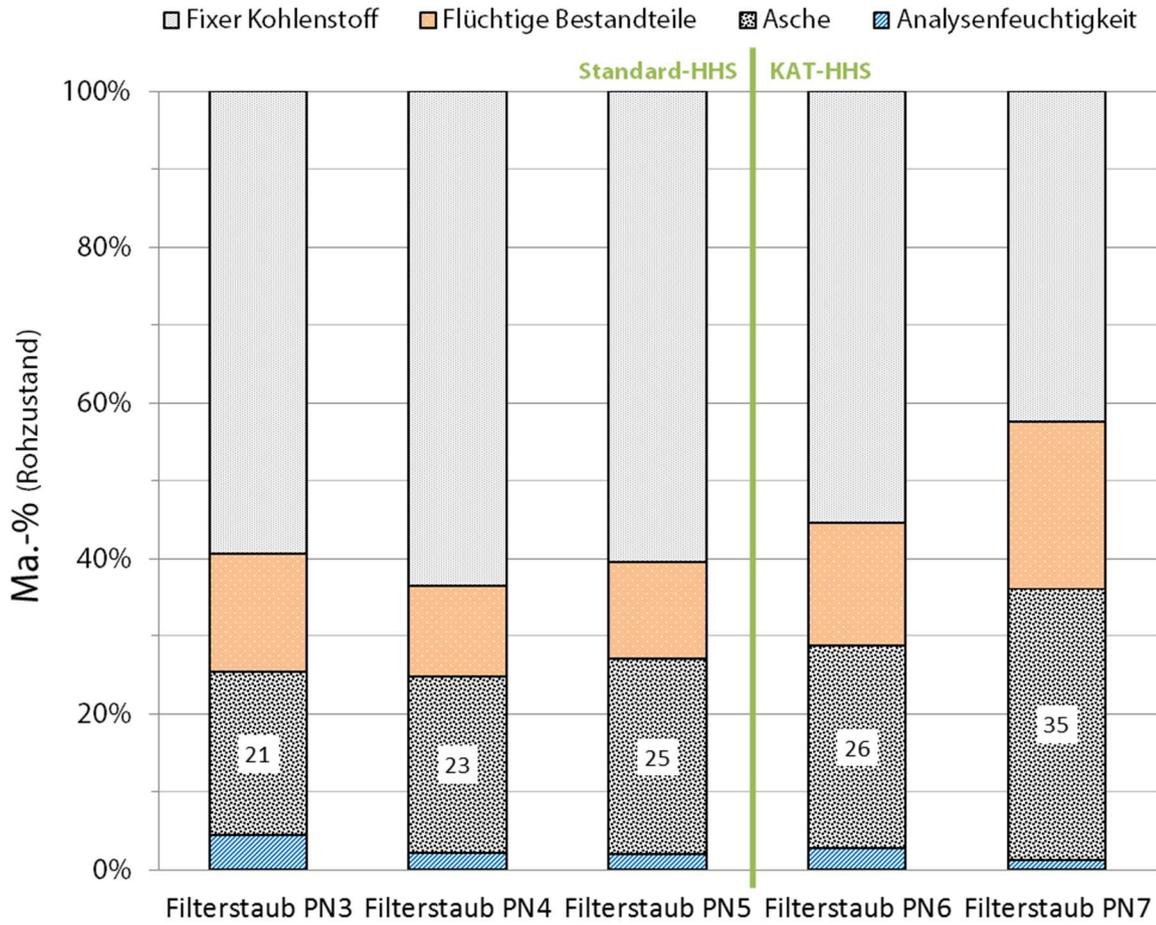


Abbildung 7-3: Grafische Darstellung der Kurzanalysergebnisse des Filterstaubes (PN...Probenahme), MF 14.4.16

## Kurzanalyse Filterstaub, MF 2.5.16

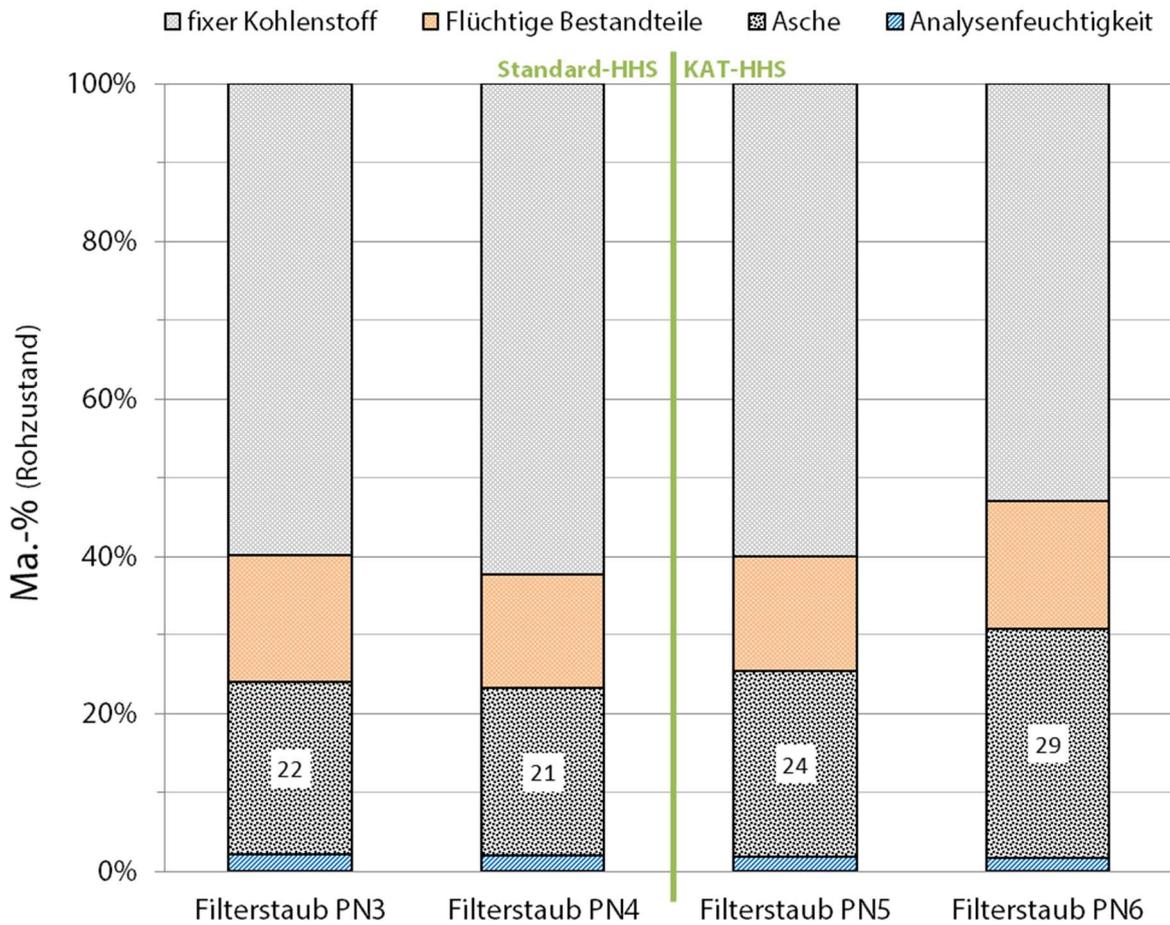


Abbildung 7-4: Grafische Darstellung der Kurzanalysergebnisse des Filterstaubes (PN...Probenahme), MF 2.5.16

## Kurzanalyse Filterstaub, MF 28.9.16

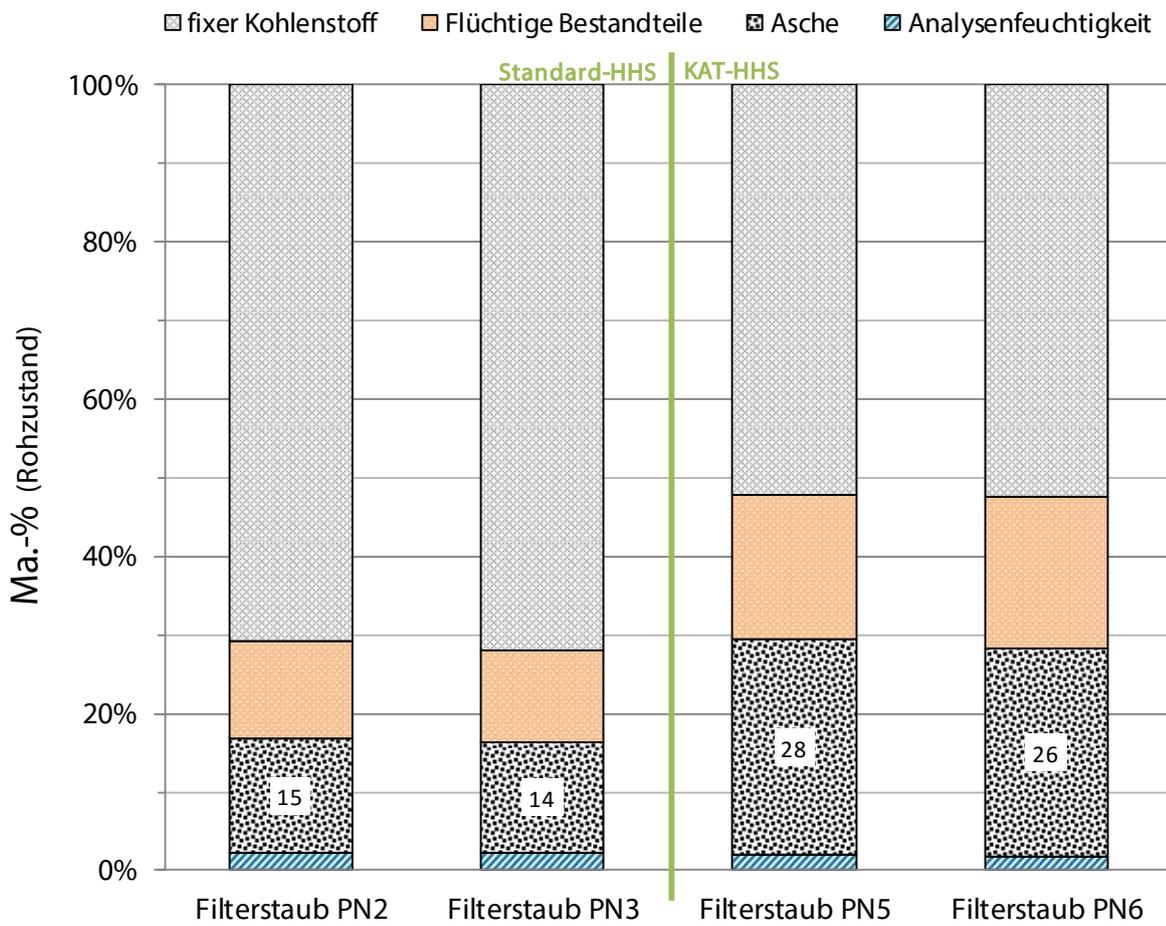


Abbildung 7-5: Grafische Darstellung der Kurzanalysergebnisse des Filterstaubes (PN...Probenahme), MF 28.9.16

## 8 Auswertung der Messfahrten

Zur Bewertung der Einsetzeignung der zur Verfügung stehenden Katalysatoren als Brennstoffmischung für die Vergasung in einem Holzvergaser-BHKW wurden die Messfahrten im Nennlastbereich der Anlage durchgeführt. Bei der Auswertung wurde primär auf die Vergasungsparameter und die mit dem Reformier (Vergasungsreaktor) in Verbindung stehenden Stoffströme geachtet und abschließend mit der Verwendung des Standardbrennstoffes bei identischen Anlageneinstellungen verglichen.

Um den Verlauf einer MF zu charakterisieren, ist in Abbildung 8-1 der zeitliche Verlauf der im Rahmen von MF 3 erfassten Produktgaszusammensetzung dargestellt. Außerdem wurden im Diagramm die Zeiträume der jeweiligen Datenauswertung (Standard-HHS und KAT-HHS) und der nachweisbaren KAT-Wirkung grafisch gekennzeichnet. Die peakartige kurze Veränderung der Gaszusammensetzung um 0:18 Uhr ist auf eine kurze Anlagenstörung zurückzuführen, die manuell sofort behoben wurde.

Des Weiteren ist mit Hilfe der Abbildung 8-2 die Katalysatorwirkung durch den Temperaturverlauf des Produktgases am Reformeraustritt sichtbar. Erkennbar ist außerdem, dass während der MF 1 und MF 2 erst zum Ende des jeweiligen KAT-Versuches kein weiterer Temperaturabfall zu verzeichnen war. Daraufhin wurde im Rahmen der MF 3 nach den KAT-HHS wieder direkt anschließend Standard-HHS eingesetzt. Somit konnte der gesamte Zeitrahmen der Katalysatorwirkung dargestellt werden (s.a. Abbildung 8-1).

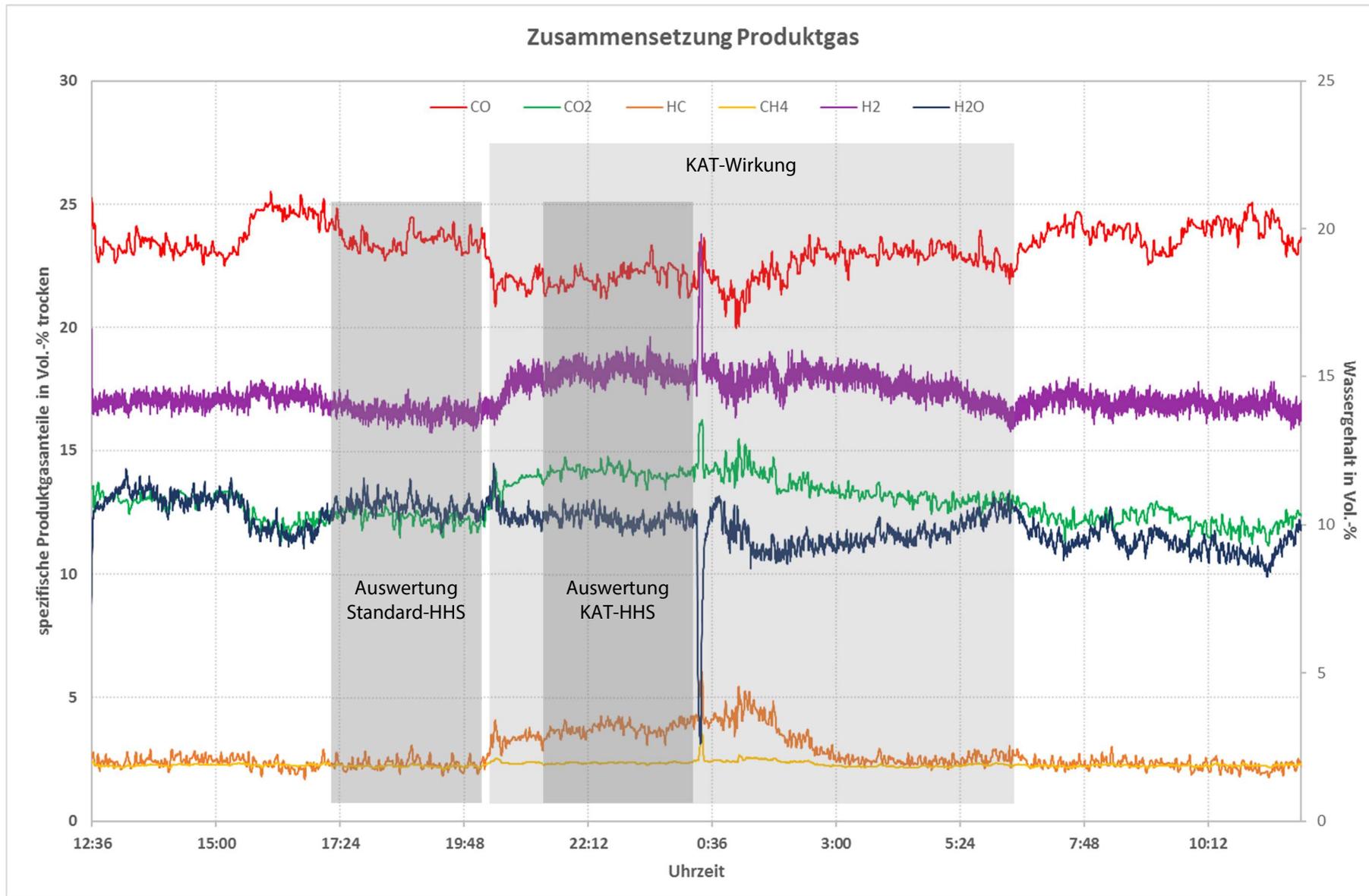


Abbildung 8-1: Zusammensetzung des Produktgases während MF3 mit Kennzeichnung des Zeitraumes der KAT-Wirkung

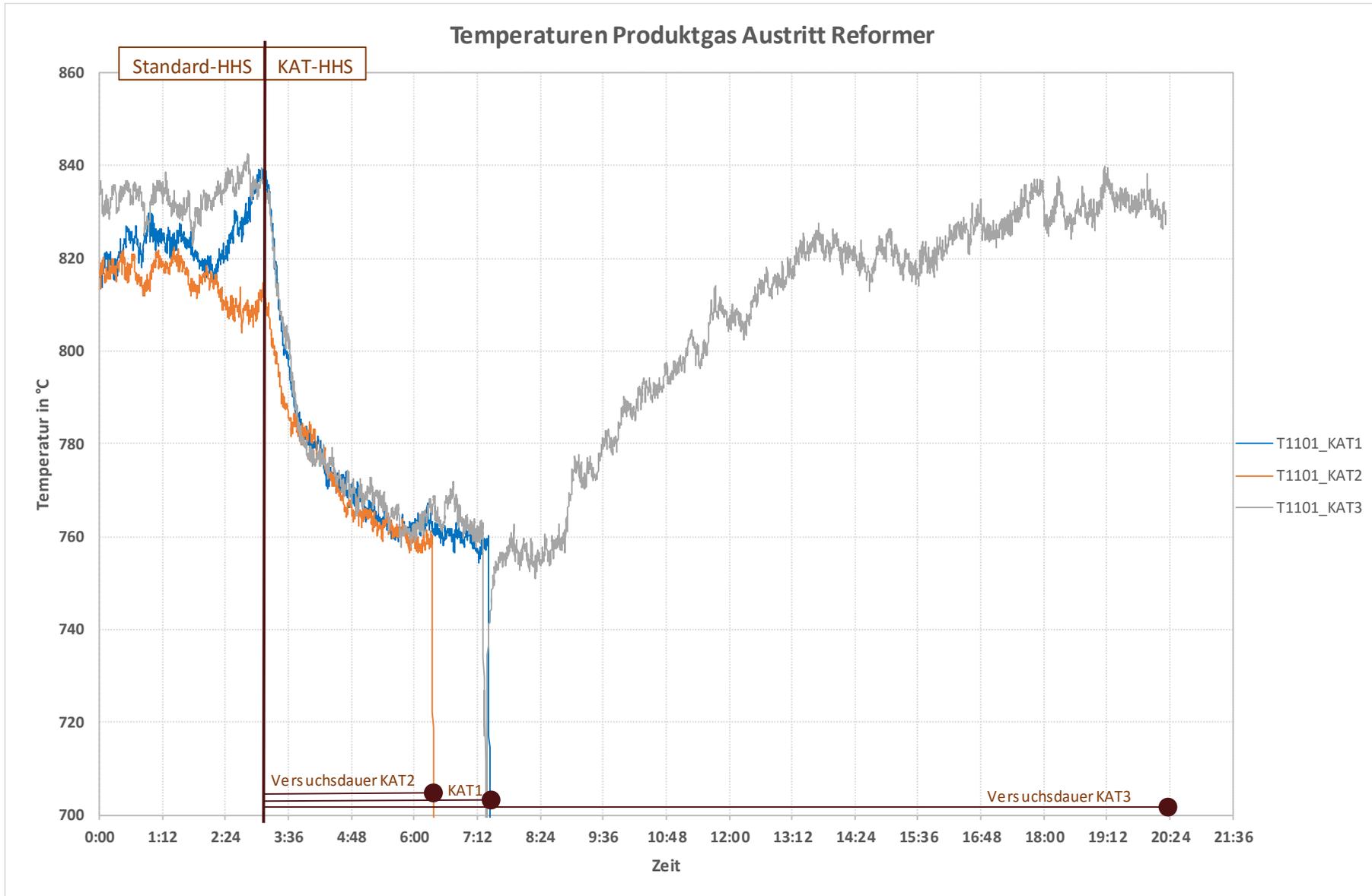


Abbildung 8-2: Temperaturverlauf des Produktgases am Austritt des Reformers während der MF

## 8.1 Stoffströme

### 8.1.1 Brennstoff

Wie in Tabelle 8-1 ersichtlich, wurde allg. ein Brennstoffbedarf von ca. 28,6 bis 29,6 kg/h für den jeweiligen Auswertungszeitraum erfasst. Werden die MF Standard und KAT hinsichtlich des Brennstoffmassenstroms miteinander verglichen, ist erkennbar, dass keine Aussage zu einem ggf. steigenden oder sinkenden Brennstoffbedarf bei Einsatz der KAT getroffen werden kann. Die erfassten Brennstoffmassenströme sind grafisch in Abbildung 8-25 (MF 14.4.16) und Abbildung 8-26 (MF 2.5.16) und Abbildung 8-27 (MF 28.9.16) in Kapitel 8.1.3 abgebildet.

**Tabelle 8-1: Brennstoffbedarf bei Verwendung von Standard- bzw. KAT-HHS**

Datum	Einheit	Messfahrten							
		13.4.16	14.4.16	14.4.16	2.5.16	2.5.16	28.9.16	28.9.16	
Fahrweise		Standard	Standard	KAT	Standard	KAT	Standard	KAT	
Auswertungszeitraum	h	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	
Brennstoffbedarf	kg	57,21	58,44	57,74	59,21	58,87	85,46	88,41	
	kg/h	28,6	29,2	28,9	29,6	29,4	28,5	29,5	
Wassergehalt HHS	Ma.-%	9,2	8,5	8,5	9,7	9,7	6,3	6,3	

### 8.1.2 Produktgas / Vergasungsmittel

In Abbildung 8-3, Abbildung 8-4 und Abbildung 8-7 werden die ermittelten Produktgasanteile (in Vol.-%, feucht) mit Verwendung der drei Katalysatortypen dargestellt (braun). Zu Vergleichszwecken sind weiterhin die Gaszusammensetzungen bei Verwendung der Standard-HHS dargestellt (grün). Hinsichtlich des Vergleiches der Produktgasqualität bei der Vergasung der Standard-HHS und der KAT-HHS konnten v.a. signifikante Unterschiede bei den höheren Kohlenwasserstoffverbindungen (HC-Messwert wird durch die Autoren erfahrungsgemäß als Ethan interpretiert) und beim Wasserstoff festgestellt werden. Hier stiegen die Anteile um jeweils ca. 1,3 bis 1,7 Vol.-% und führen somit zu einer deutlichen Erhöhung des Produktgasheizwertes (vgl. Tabelle 8-2), da CO und CH<sub>4</sub> bei den Vergleichsmessfahrten keine signifikanten Änderungen ihres Volumenanteils aufwiesen. Der bei Einsatz der KAT-HHS deutlich gesunkene Wassergehalt im Produktgas wurde der chemischen Wirkung des Katalysators zugeschrieben. Nach Aussage des Herstellers katalysiert das Material auch die Wassergasreaktion, wodurch Wasser umgesetzt wird und der Wassergehalt im Produktgas entsprechend sinkt. [2]

**Tabelle 8-2: Heizwert des Produktgases bei Verwendung von Standard- bzw. KAT-HHS**

Datum	Einheit	Messfahrten					
		14.4.16	14.4.16	2.5.16	2.5.16	28.9.16	28.9.16
Fahrweise		Standard	KAT	Standard	KAT	Standard	KAT
Auswertungszeitraum	h	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0
Heizwert Produktgas	MJ/m <sup>3</sup> (i.N.)	6,35	7,56	6,59	7,74	6,34	7,21
	MJ/kg	5,84	7,00	6,08	7,13	5,74	6,54

Die angesprochene Erhöhung des Heizwertes bei Einsatz der KAT-HHS ist im Einklang mit theoretischen Betrachtungen: auf Basis der messtechnisch ermittelten Produktgaszusammensetzung und -temperaturen bei Einsatz des KAT 2 wurden die chemischen Gleichgewichte der Gasphase für Standard-HHS und KAT-HHS für isotherme sowie für adiabate Bedingungen und die daraus resultierenden Heizwerte bestimmt<sup>5</sup>. Dafür wurde der Sauerstoffanteil im Produktgas zu Null gesetzt und für den Messwert HC im Produktgas Ethan angenommen. Im

<sup>5</sup> Berechnung mit Gri-Mech 3.0 in Cantera

Ergebnis der Gleichgewichtsberechnungen verschieben sich unter isothermen Bedingungen die Anteile im Produktgas bei Einsatz des Katalysators hin zu einem höheren Anteil von CO und H<sub>2</sub> bei gleichzeitiger Senkung des Anteils CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O (siehe Abbildung 8-4 und Abbildung 8-6). Die Zusammensetzung des theoretisch berechneten Produktgases führt dabei im Vergleich zum gemessenen Produktgas zu einem höheren Heizwert von 6,63 MJ/m<sup>3</sup> i.N. (vgl. Tabelle 8-2). Unter adiabaten Berechnungsbedingungen verändern sich die Produktgasanteile von CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O nicht, lediglich für CH<sub>4</sub> lässt sich eine deutliche Steigerung feststellen (siehe Abbildung 8-5 und Abbildung 8-6).

Die Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motoreintritt wurden ebenfalls erfasst und in Abbildung 8-10, Abbildung 8-11 und Abbildung 8-12 wieder als Vergleich zwischen Standard und KAT grafisch dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass die Gastemperaturen bei KAT-Einsatz direkt nach dem Reformier ggü. Standard deutlich abfielen (um ca. 50 bis 67 K) und dieser Temperaturabfall sich bei den folgenden Messstellen bis hin zum Motor immer weiter abschwächte. Dies ist u.a. mit der Temperaturspeicherwirkung der Bauteile und sich verändernden Wärmeströmen zu erklären. Der Temperaturabfall des Produktgases bei Einsatz des KAT ergibt sich aus der Tatsache, dass der KAT die endothermen Reaktionen verstärkt. [2] Dieser Temperaturabfall ist ebenfalls im Einklang mit theoretischen Gleichgewichtsberechnungen und lässt sich unter adiabaten Berechnungsbedingungen abbilden. Die berechnete Temperatur des Produktgases sinkt dabei im Vergleich zur gemessenen Temperatur um 23 K (von 655 °C zu 627 °C).

Wie zuvor beschrieben führte eine Arbeitsgruppe<sup>6</sup> der RWTH Aachen im Rahmen der MF vom 14.4.16 an drei verschiedenen Messstellen jeweils zwei Probenahmen des Produktgases durch, die zeitgleich erfolgten und analysierte diese im Labor auf die 16 polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) nach EPA<sup>7</sup>. Die ermittelten Analysedaten sind als Mittelwerte der zwei Proben in Abbildung 8-8 (Standard-HHS) und Abbildung 8-9 (KAT-HHS) grafisch dargestellt. Dabei waren die Massenkonzentrationen der PAK direkt nach dem Reformier am höchsten und im gereinigten Produktgas vor dem Motor nur noch marginal. Den größten Anteil im Produktgas direkt nach dem Reformier nahm Naphthalin ein. Im Vergleich der Fahrweise mit Standard- und KAT-HHS ist eine Reduzierung der PAK-Konzentration beim Einsatz der KAT-HHS am Reformeraustritt um absolut ca. 29 mg/m<sup>3</sup> bzw. relativ ca. 20 % festzustellen. Im gereinigten Produktgas konnte keine Unterschiede hinsichtlich der PAK-Konzentrationen detektiert werden.

Die Volumenströme des Produktgases und des zugeführten Vergasungsmittels Luft wurden ebenfalls erfasst und für den Vergleich der MF auf Normbedingungen nach DIN 1343 umgerechnet. Die resultierenden Normvolumenströme von Produktgas und Luft sind in Abbildung 8-13 (MF 14.4.16), Abbildung 8-14 (MF 2.5.16) und Abbildung 8-15 (MF 28.9.16) aufgeführt. Im Vergleich zwischen Standard- und KAT-HHS im Rahmen der MF vom 14.4.16 sinken der Volumenströme des Produktgases um absolut 3,6 m<sup>3</sup>/h (i.N.) (relativ 4,6 %) und der Luft um 0,3 m<sup>3</sup>/h (i.N.) (relativ 0,8 %). Der Vergleich der Daten aus der MF vom 2.5.16 ergab ein Absinken der Volumenströme des Produktgases um absolut 3,6 m<sup>3</sup>/h (i.N.) (relativ 4,9 %) und der Luft um 0,4 m<sup>3</sup>/h (i.N.) (relativ 1,1 %). Hinsichtlich der MF vom 28.9.16 sanken die Volumenströme des Produktgases um absolut 2,2 m<sup>3</sup>/h (i.N.) (relativ 3,1 %) und der Luft um 0,1 m<sup>3</sup>/h (i.N.) (relativ 0,3 %).

---

<sup>6</sup> Lehr und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe (TEER)

<sup>7</sup> US-Environmental Protection Agency

Durch die Erfassung der Zusammensetzung und des Volumenstromes des Produktgases konnte die Produktgasleistung (entspricht dem chemischen Produktgasenergiestrom) berechnet und für die jeweiligen Versuchsphasen miteinander verglichen werden. Da der Heizwert des Produktgases beim Einsatz der KAT-HHS ggü. dem Einsatz der Standard-HHS stieg (vgl. Tabelle 8-2, Abbildung 8-3, Abbildung 8-4, Abbildung 8-7, Abbildung 8-13, Abbildung 8-14, Abbildung 8-15) ergab sich ein deutlich höherer chemischer Energiestrom (vgl. Abbildung 8-16, Abbildung 8-17 und Abbildung 8-18). Die diesbezügliche Steigerung betrug absolut ca. 13 bis 17 kW (relativ ca. 10 bis 13 %). Im Vergleich der elektrischen BHKW-Leistungen nach Abbildung 8-16, Abbildung 8-17 und Abbildung 8-18, stieg diese beim Einsatz der KAT-HHS absolut um 0,1 bis 0,9 kW.

Anhand der erfassten Zusammensetzung und Volumenströme des Vergasungsmittels Luft und des Brennstoffes wurde die Luftzahl der Vergasung berechnet und in Abbildung 8-19 (MF 14.4.16), Abbildung 8-20 (MF 2.5.16) und Abbildung 8-21 (MF 28.9.16) dargestellt. Erkennbar ist kein Unterschied der Luftzahl im Vergleich Standard- und KAT-HHS festzustellen. Bei den ersten zwei MF lag dieser bei ca. 0,36 und bei MF3 bei ca. 0,34.

Die zuvor beschriebenen Mess- und Berechnungsdaten der jeweiligen Auswertungszeiträume sind zusammengefasst in Tabelle 8-3 aufgeführt.

**Tabelle 8-3: Volumenstrom Produktgas und Vergasungsmittel sowie Produktgasleistung in den Auswertungszeiträumen**

Datum	Einheit	Messfahrten					
		14.4.16	14.4.16	2.5.16	2.5.16	28.9.16	28.9.16
Fahrweise		Standard	KAT	Standard	KAT	Standard	KAT
Auswertungszeitraum	h	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0
Volumenstrom Produktgas	m <sup>3</sup> /h (i.N.)	73,4	69,8	73,2	69,6	71,7	69,5
Volumenstrom Vergasungsmittel	m <sup>3</sup> /h (i.N.)	38,1	37,8	38,1	37,7	38,3	38,2
Luftzahl		0,36	0,36	0,37	0,37	0,35	0,34
Produktgasleistung	kW	129,5	146,6	133,8	149,6	126,3	139,1
Elektrische BHKW-Leistung	kW	31,1	32,0	31,9	32,3	31,8	31,9

Zu weiteren Information und Auswertung dienen Abbildung 8-22, Abbildung 8-23 und Abbildung 8-24. Hier wurden die erfassten Absolutdrücke in der Gasleitung zwischen Reformer und Motor sowie die eingestellte Leistung des Seitenkanalverdichters für das Vergasungsmittel abgebildet.

## Vergleich der Produktgaszusammensetzung ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ1

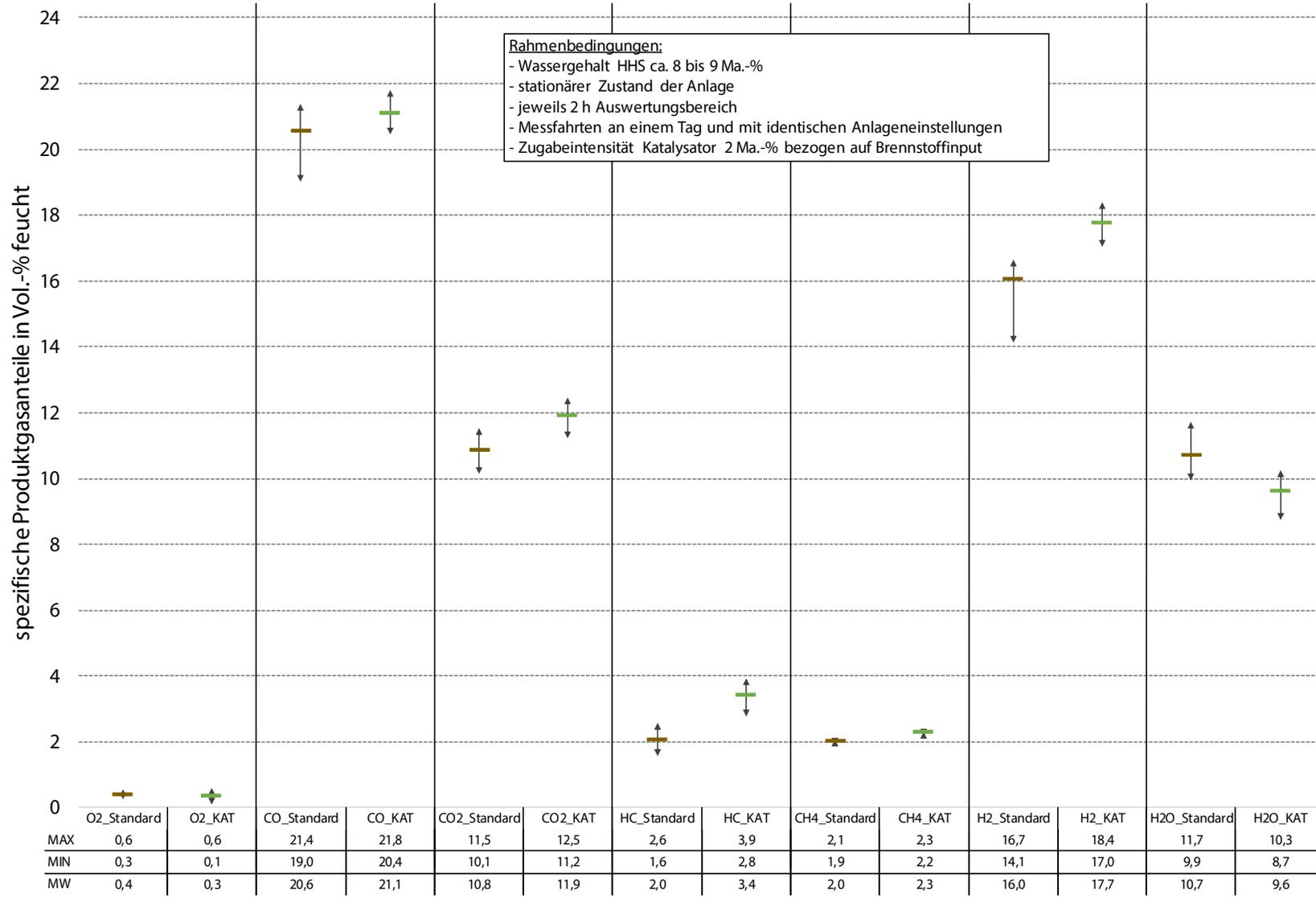


Abbildung 8-3: Darstellung der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung von Standard-HHS (braun) inkl. Vergleich mit KAT-HHS (grün), MF 14.4.16

## Vergleich der Produktgaszusammensetzung ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ2 sowie chemischem Gleichgewicht unter isothermen Bedingungen

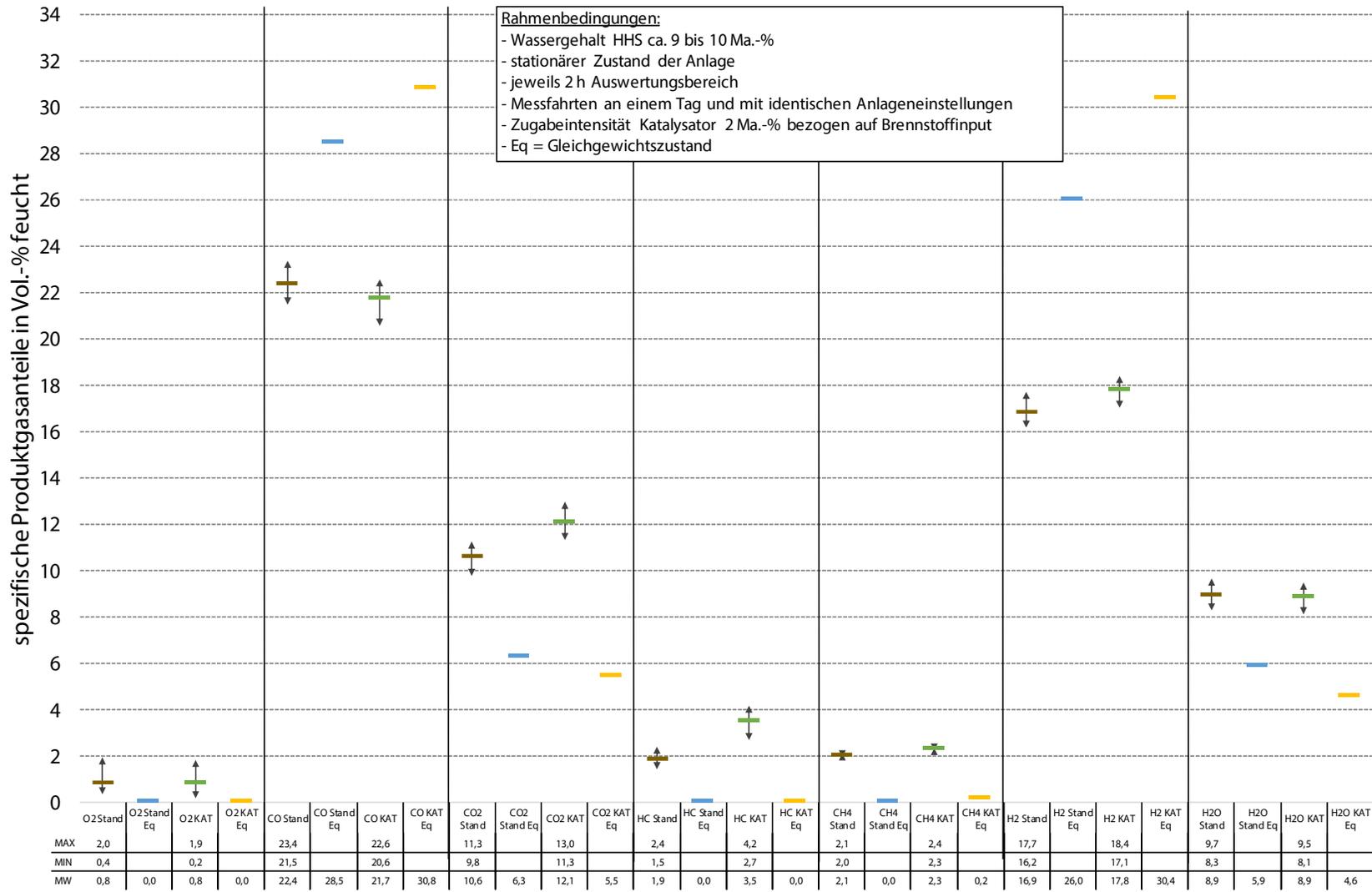


Abbildung 8-4: Darstellung der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung von Standard-HHS (braun) inkl. Vergleich mit KAT-HHS (grün) sowie der berechneten isothermen Gleichgewichte für Standard-HHS (blau) und KAT-HHS (gelb), MF 2.5.16

## Vergleich der Produktgaszusammensetzung ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ2 sowie chemischem Gleichgewicht unter adiabaten Bedingungen

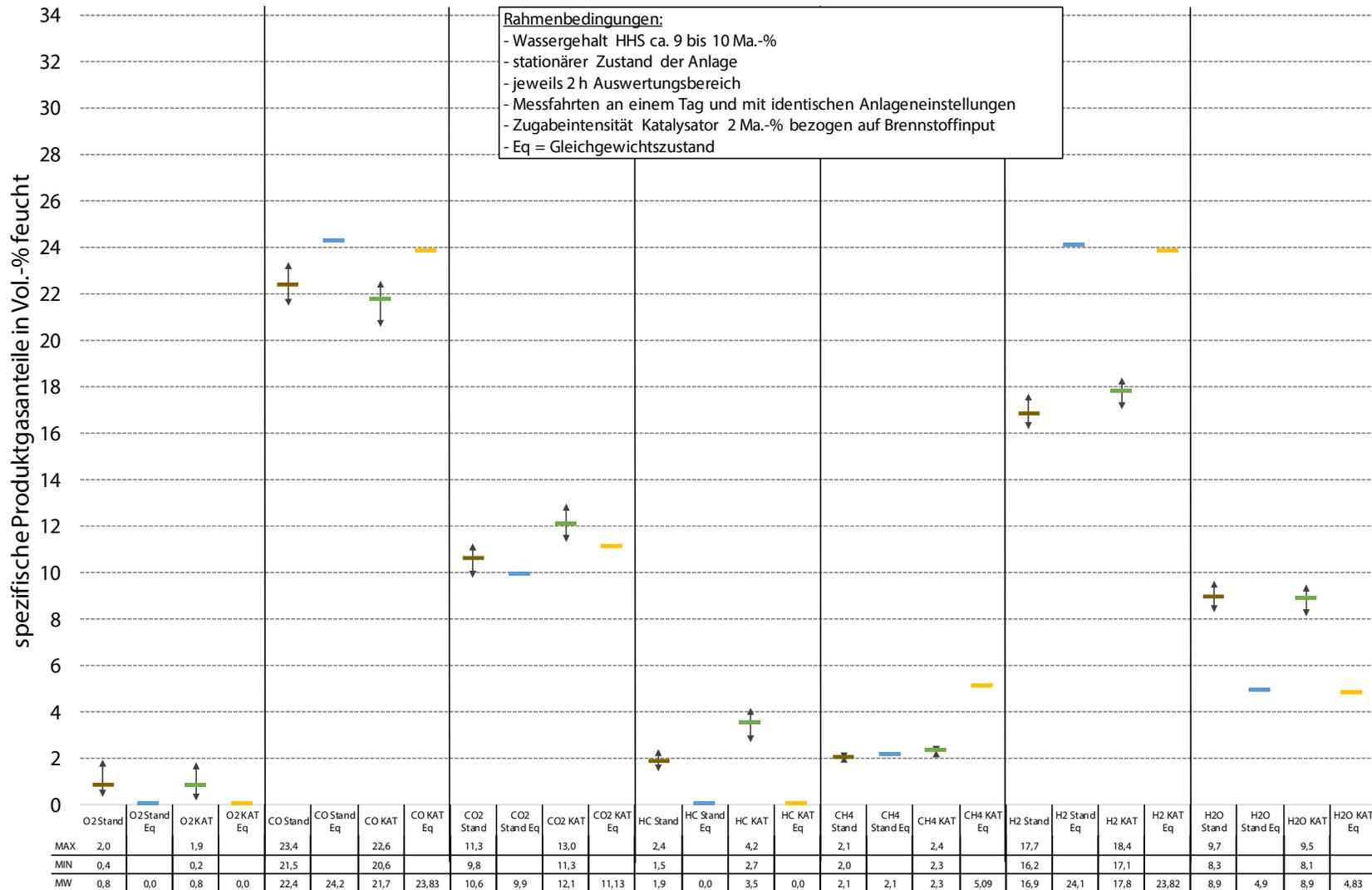


Abbildung 8-5: Darstellung der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung von Standard-HHS (braun) inkl. Vergleich mit KAT-HHS (grün) sowie der berechneten adiabaten Gleichgewichte für Standard-HHS (blau) und KAT-HHS (gelb), MF 2.5.16

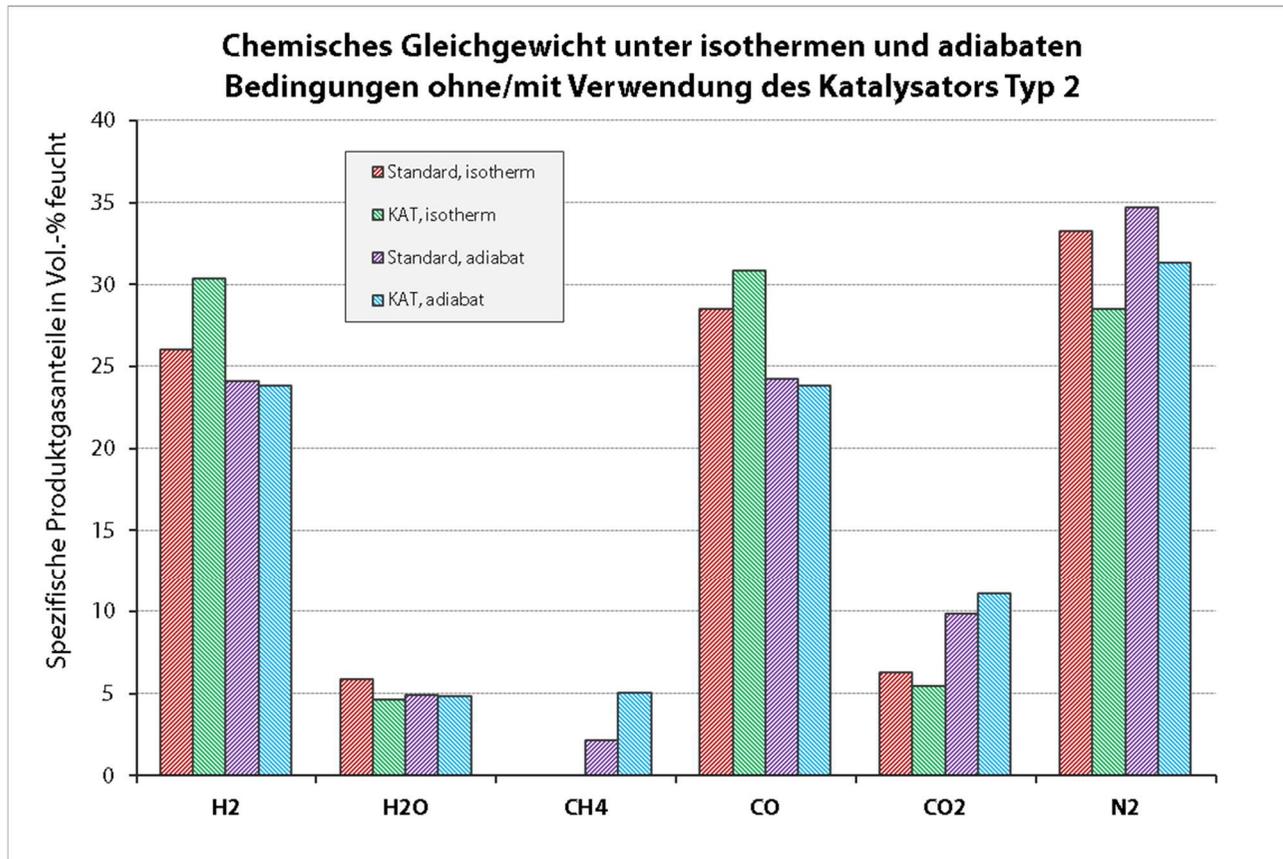


Abbildung 8-6: Darstellung der chemischen Gleichgewichte im Produktgas unter isothermen sowie adiabaten Bedingungen, basierend auf den Produktgaszusammensetzungen und -temperaturen bei der Vergasung von Standard-HHS und KAT-HHS, MF 2.5.16

### Vergleich der Produktgaszusammensetzung ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ3

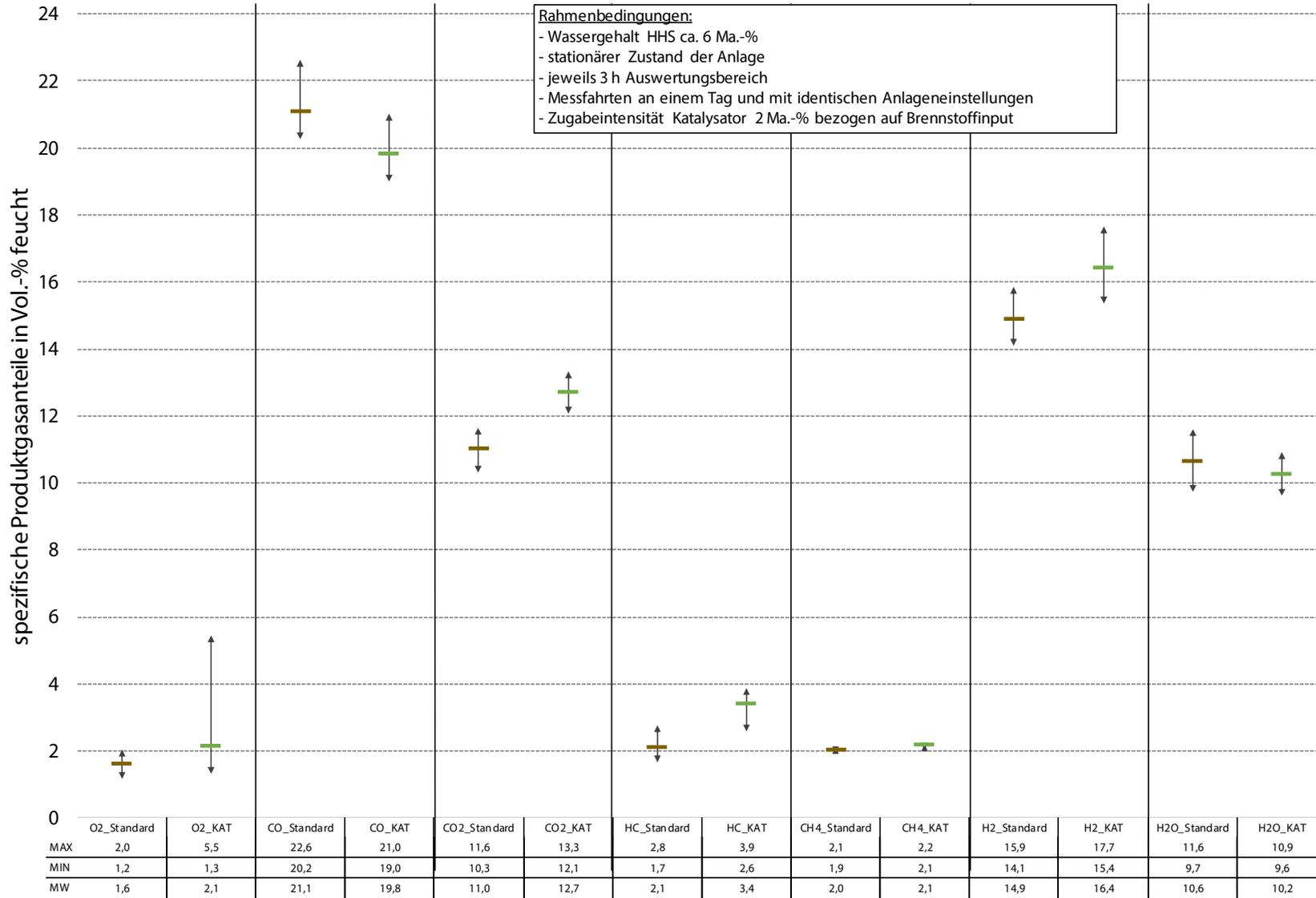


Abbildung 8-7: Darstellung der Produktgaszusammensetzung bei der Vergasung von Standard-HHS (braun) inkl. Vergleich mit KAT-HHS (grün), MF 28.9.16

## EPA-PAK Messung im Produktgas, Standard-HHS, 14.4.16

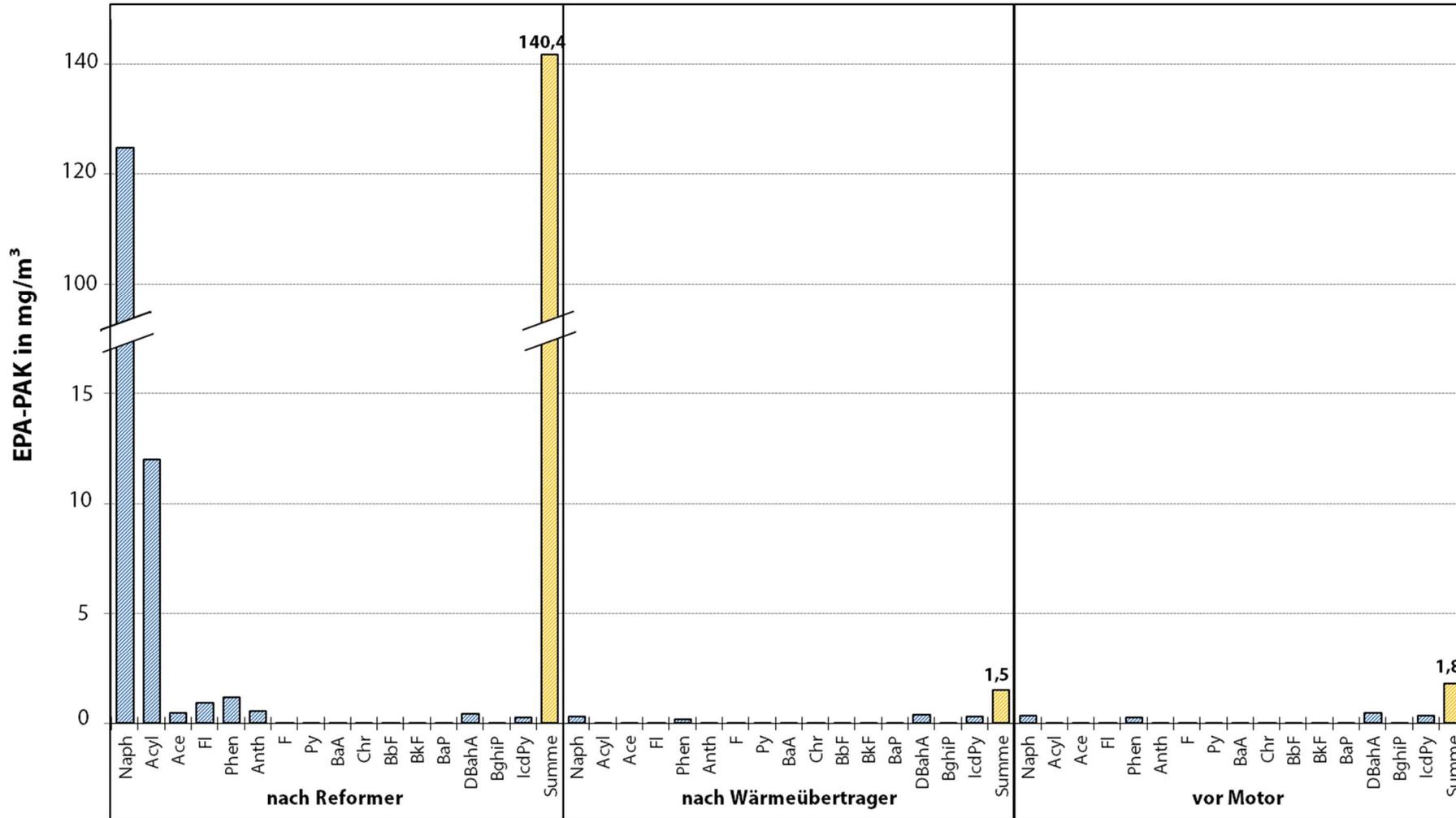


Abbildung 8-8: Darstellung der PAK-Beladung des Produktgases bei Standard-HHS, MF 14.4.16

## EPA-PAK Messung im Produktgas, KAT-HHS, 14.4.16

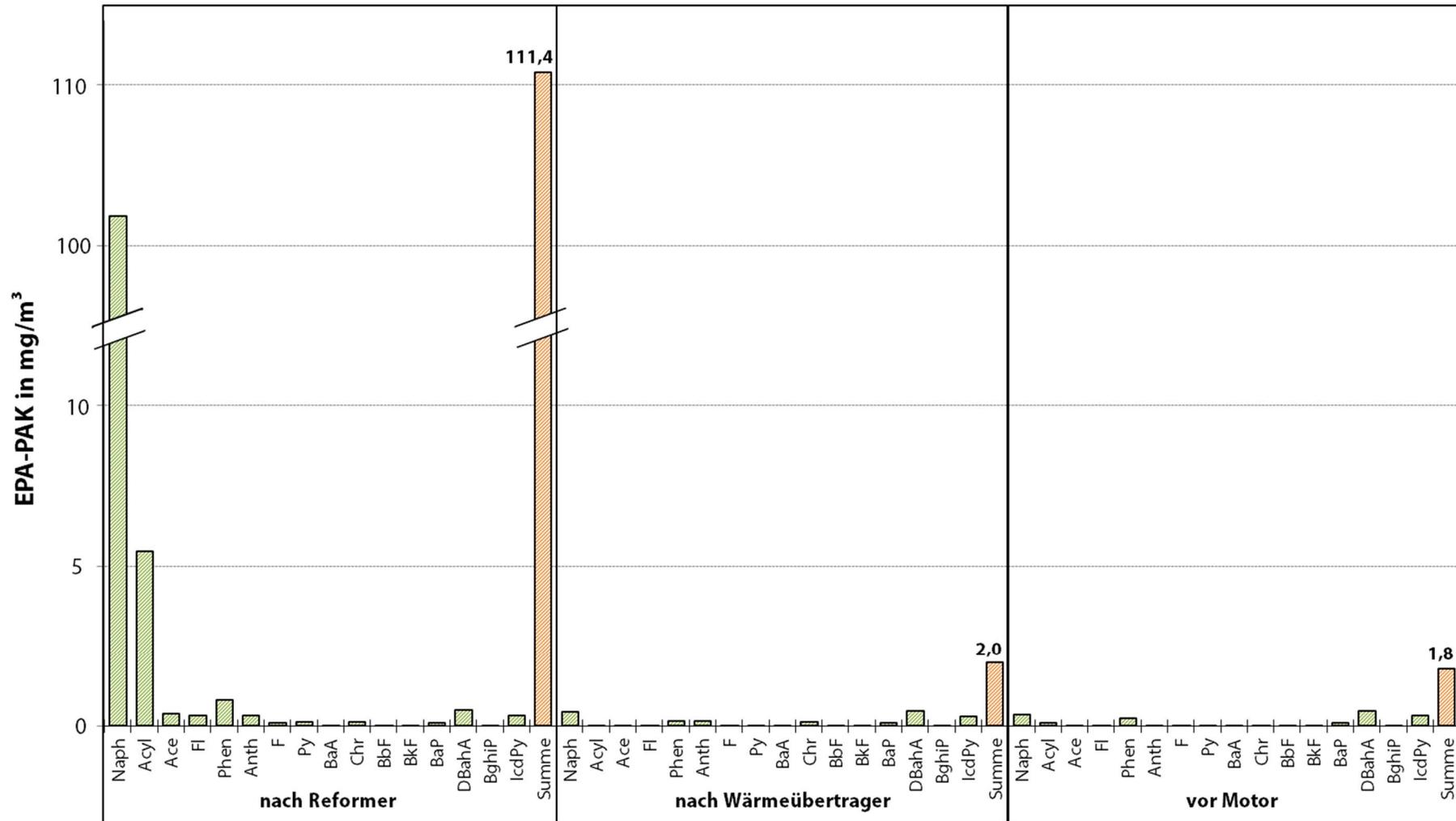


Abbildung 8-9: Darstellung der PAK-Beladung des Produktgases bei KAT-HHS, MF 14.4.16

## Vergleich der Produktgastemperaturen ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ1

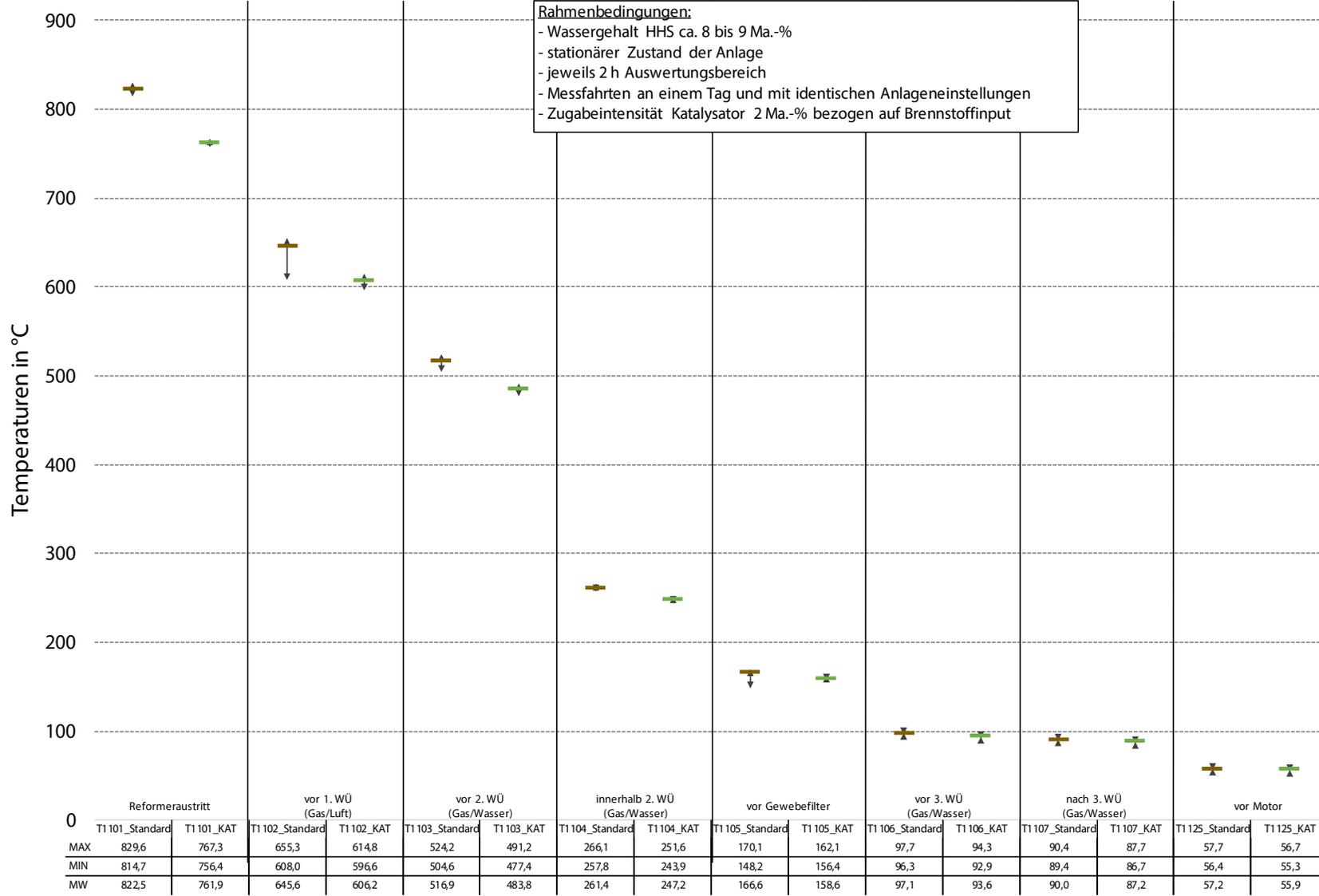


Abbildung 8-10: Vergleich der Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motor, MF 14.4.16

## Vergleich der Produktgastemperaturen ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ2

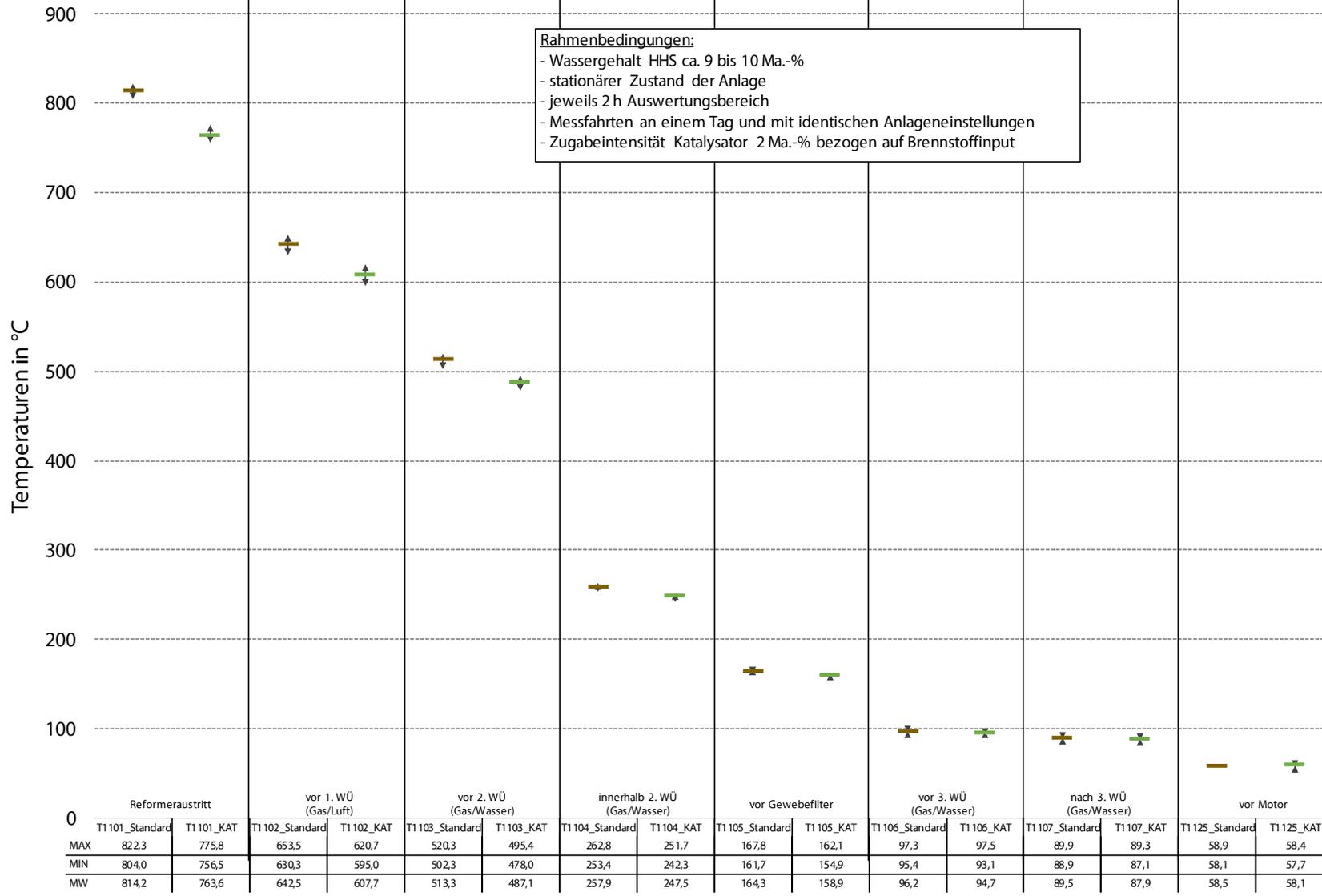


Abbildung 8-11: Vergleich der Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motor, MF 2.5.16

### Vergleich der Produktgastemperaturen ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 3

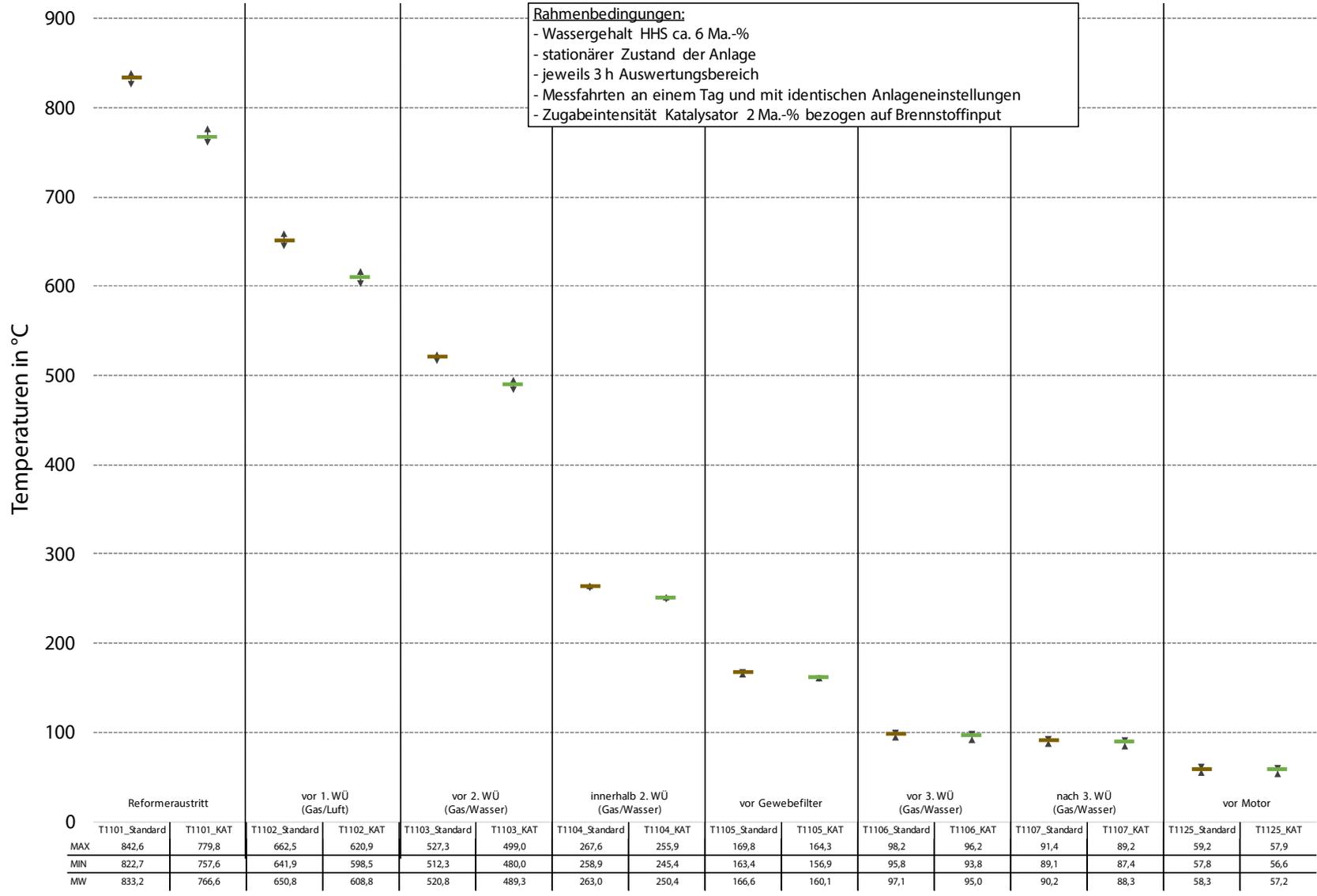


Abbildung 8-12: Vergleich der Produktgastemperaturen vom Reformeraustritt bis hin zum Motor, MF 28.9.16

## Vergleich der Volumenströme ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ1

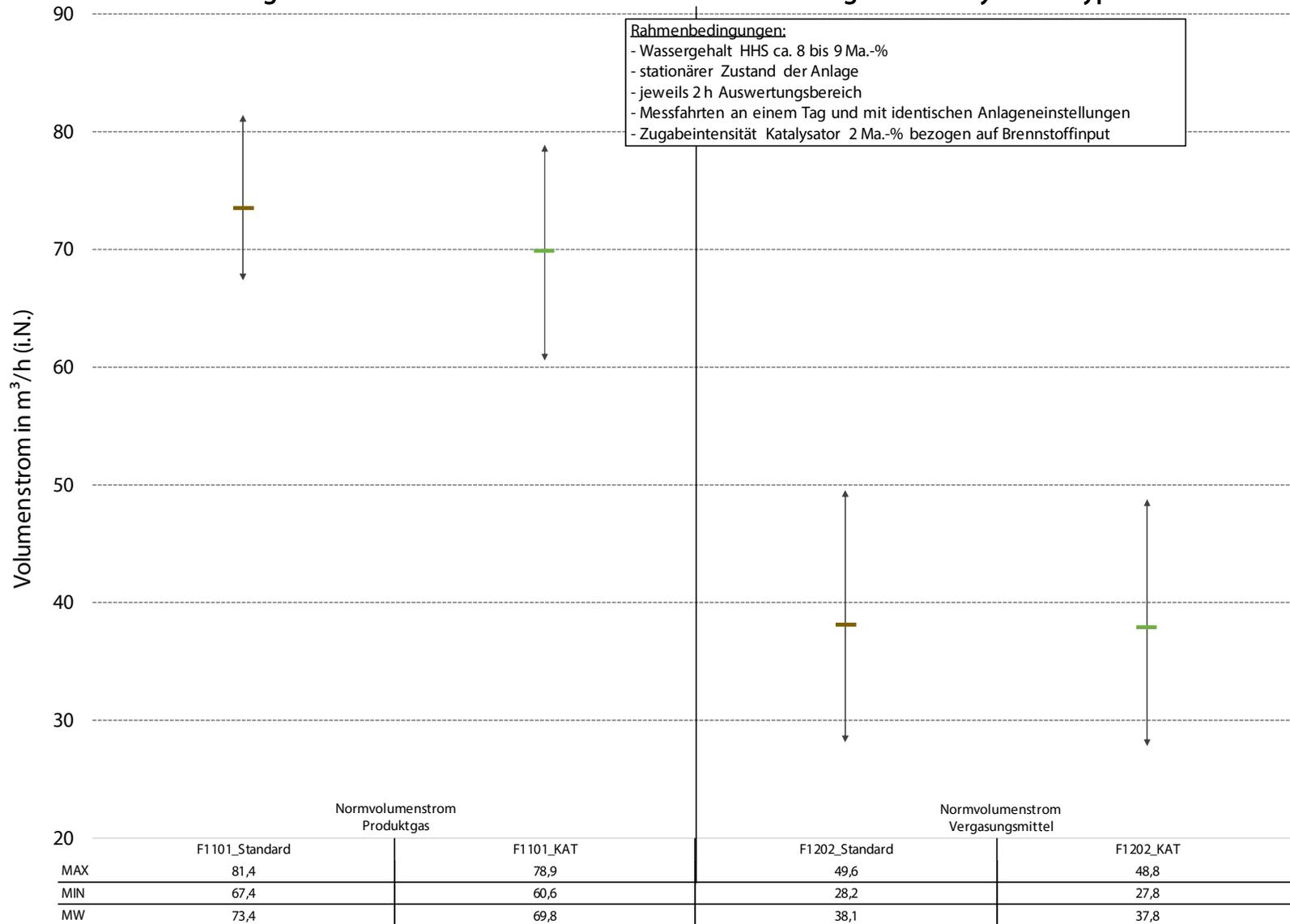


Abbildung 8-13: Vergleich der Normvolumenströme für Produktgas und Vergasungsmittel hinsichtlich MF 14.4.16

## Vergleich der Volumenströme ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 2

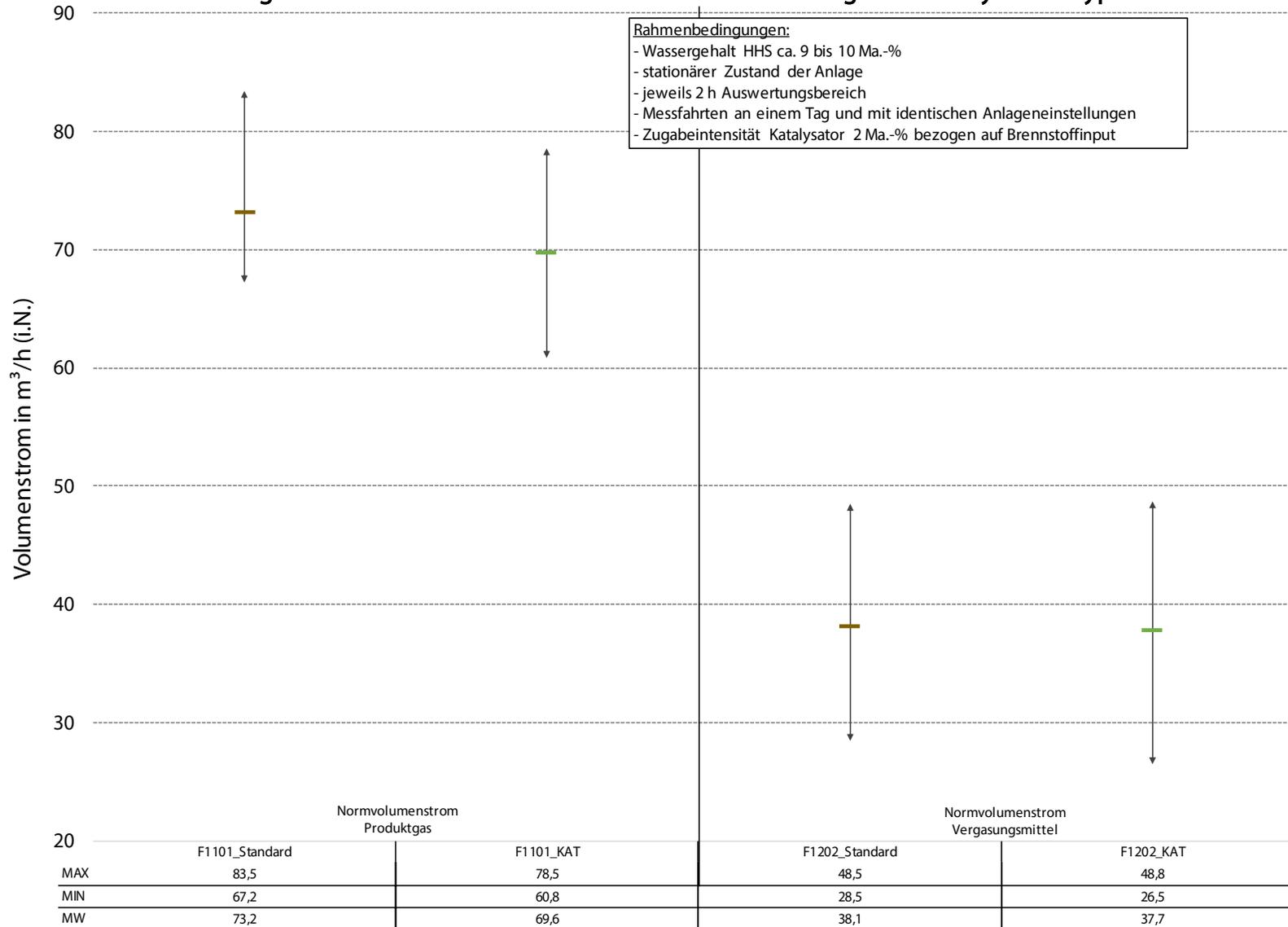


Abbildung 8-14: Vergleich der Normvolumenströme für Produktgas und Vergasungsmittel hinsichtlich MF 2.5.16

### Vergleich der Volumenströme ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 3

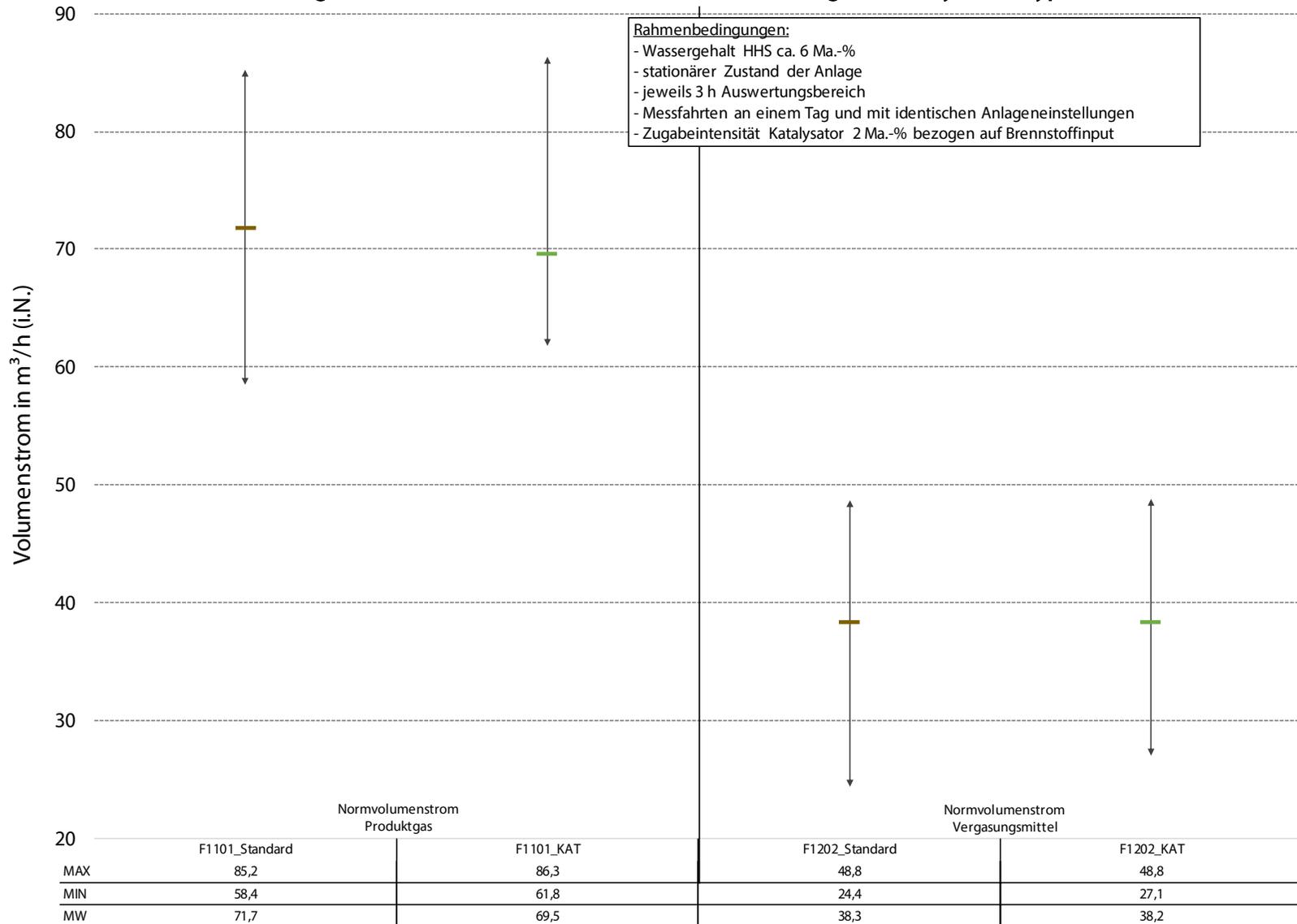


Abbildung 8-15: Vergleich der Normvolumenströme für Produktgas und Vergasungsmittel hinsichtlich MF 28.9.16

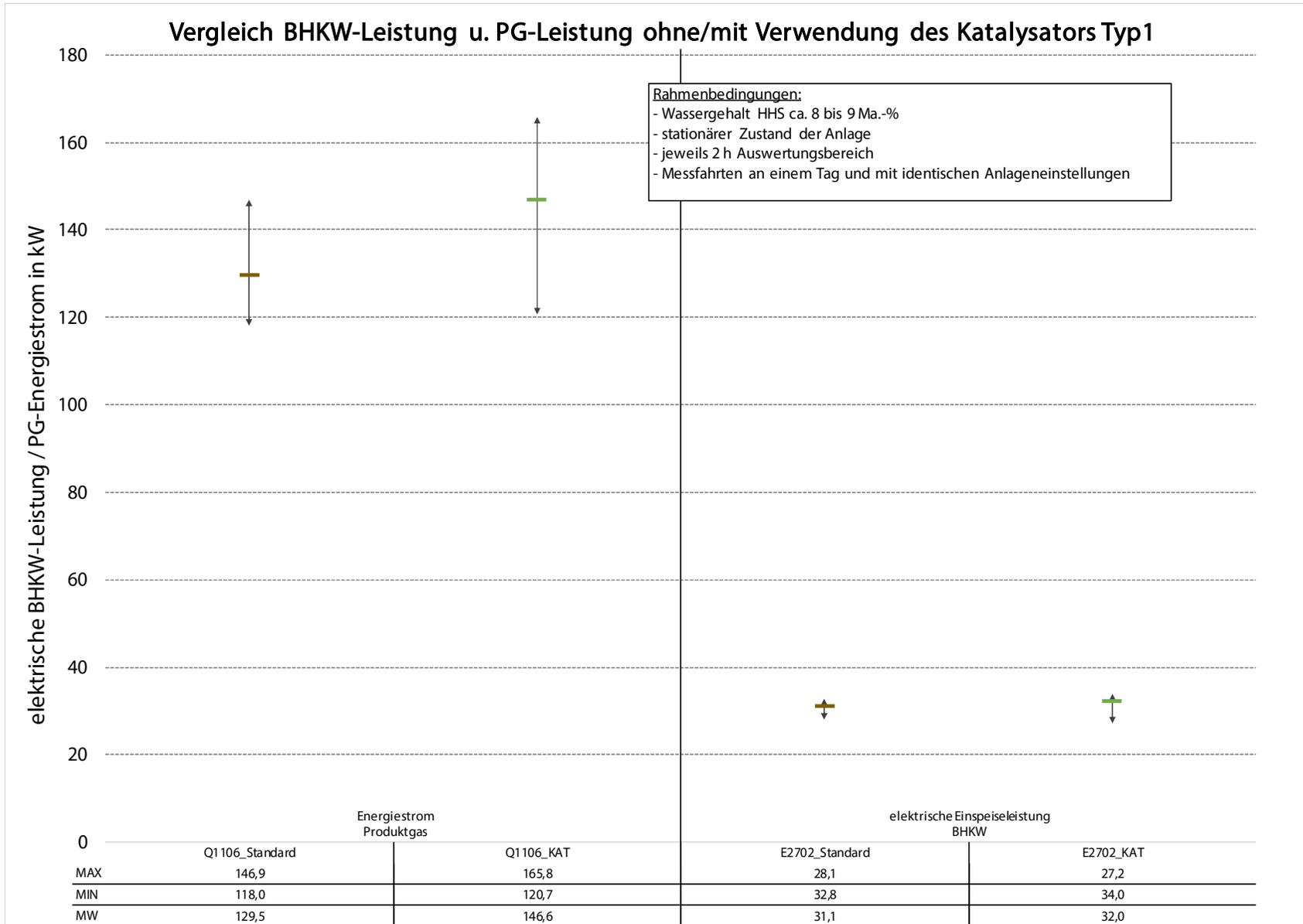


Abbildung 8-16: Vergleich der Produktgasenergieströme und der BHKW-Leistung, MF 14.4.16

## Vergleich BHKW-Leistung u. PG-Leistung ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 2

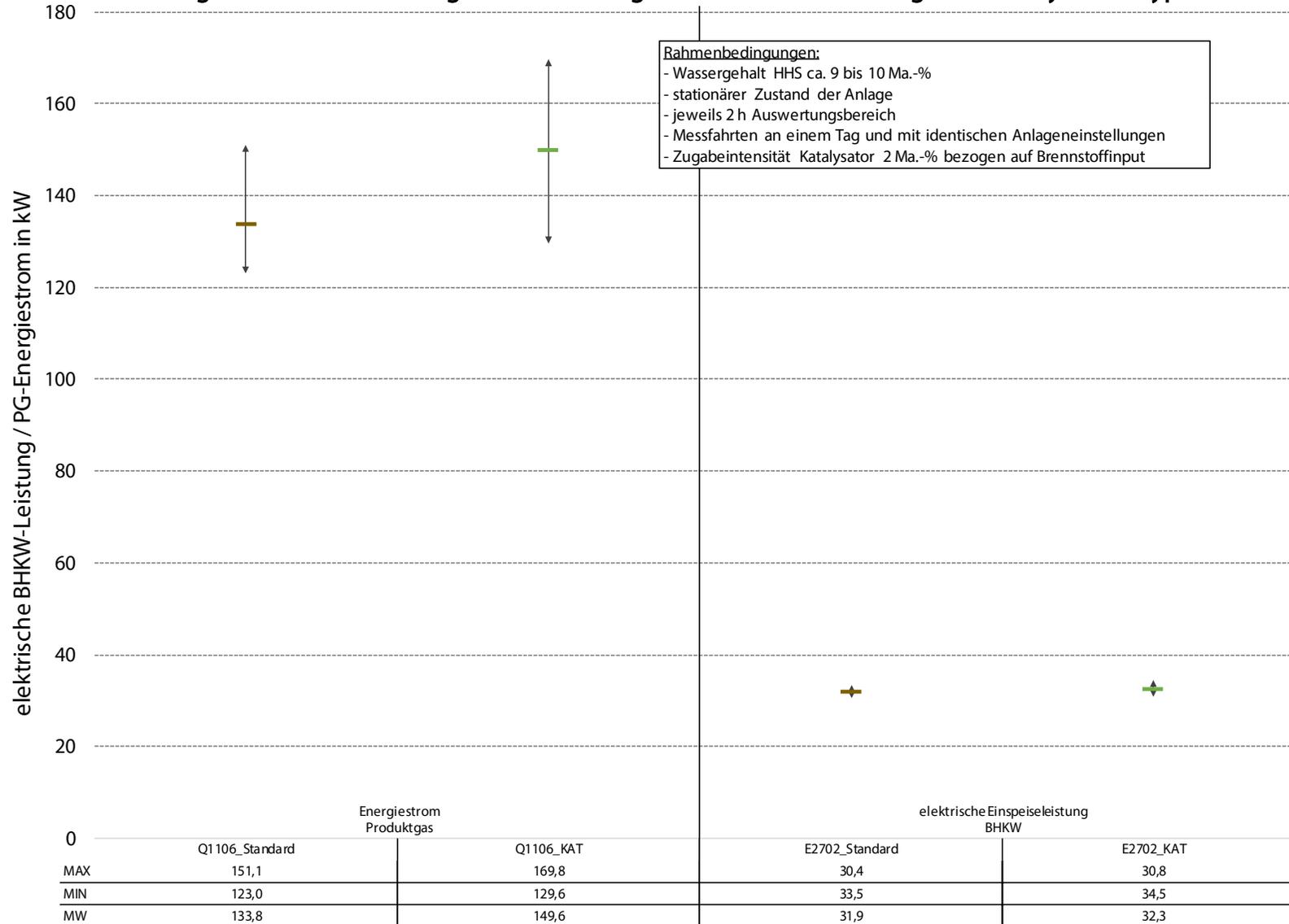


Abbildung 8-17: Vergleich der Produktgasenergieströme und der BHKW-Leistung, MF 2.5.16

### Vergleich BHKW-Leistung u. PG-Leistung ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 3

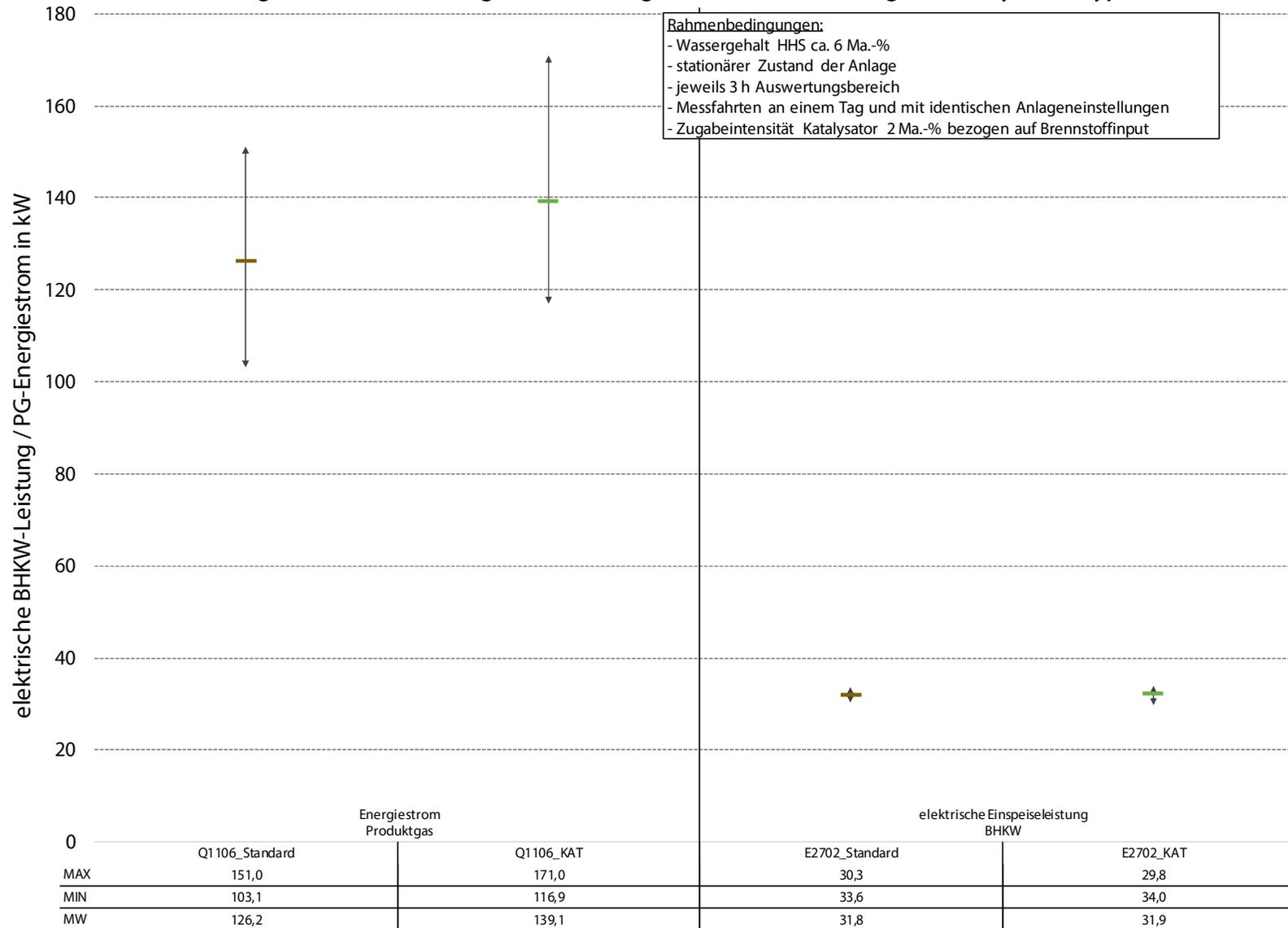


Abbildung 8-18: Vergleich der Produktgasenergieströme und der BHKW-Leistung, MF 28.9.16

## Vergleich der Luftzahl ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ1

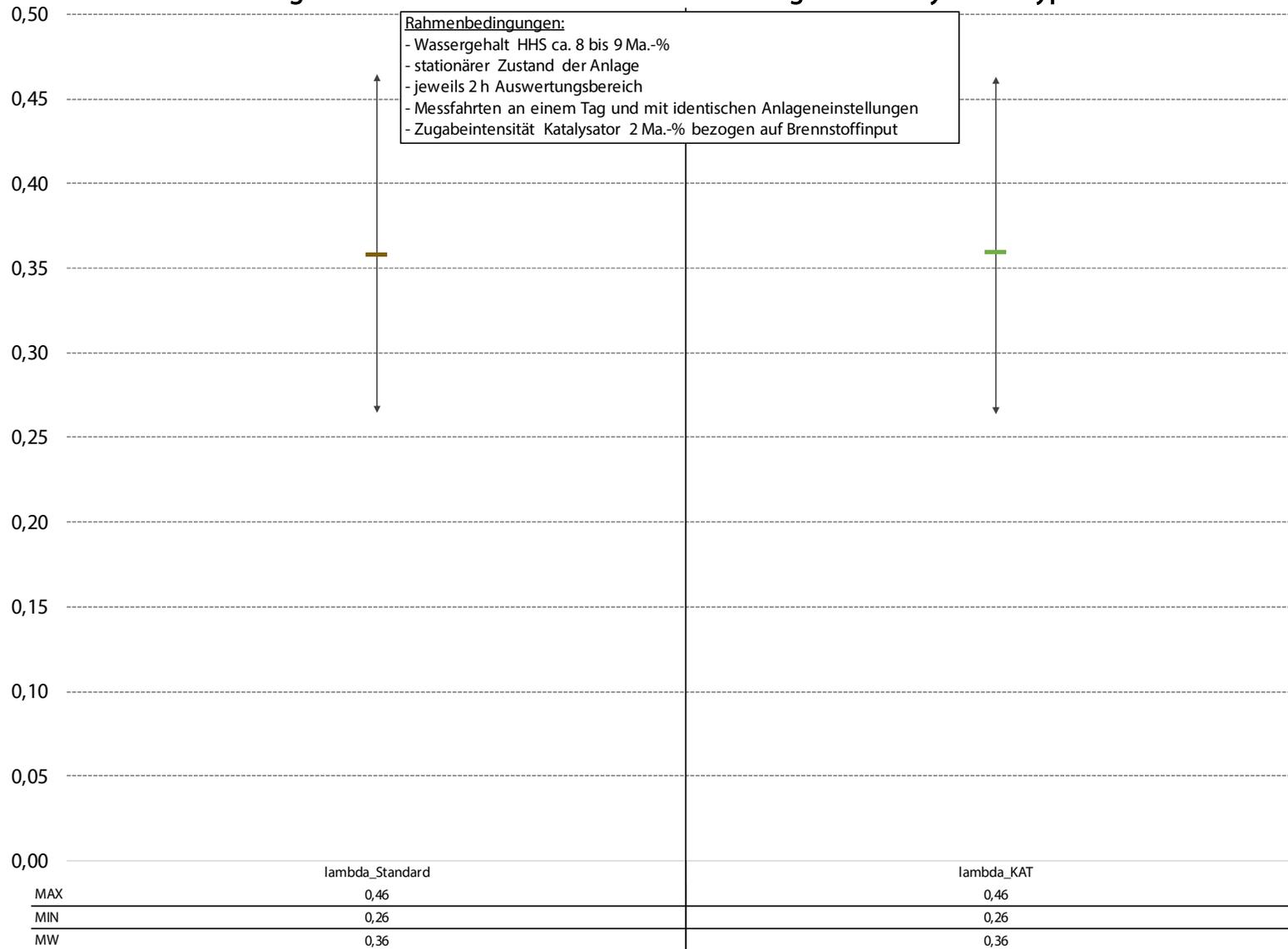


Abbildung 8-19: Darstellung der berechneten Luftzahl bei der MF 14.4.16

## Vergleich der Luftzahl ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 2

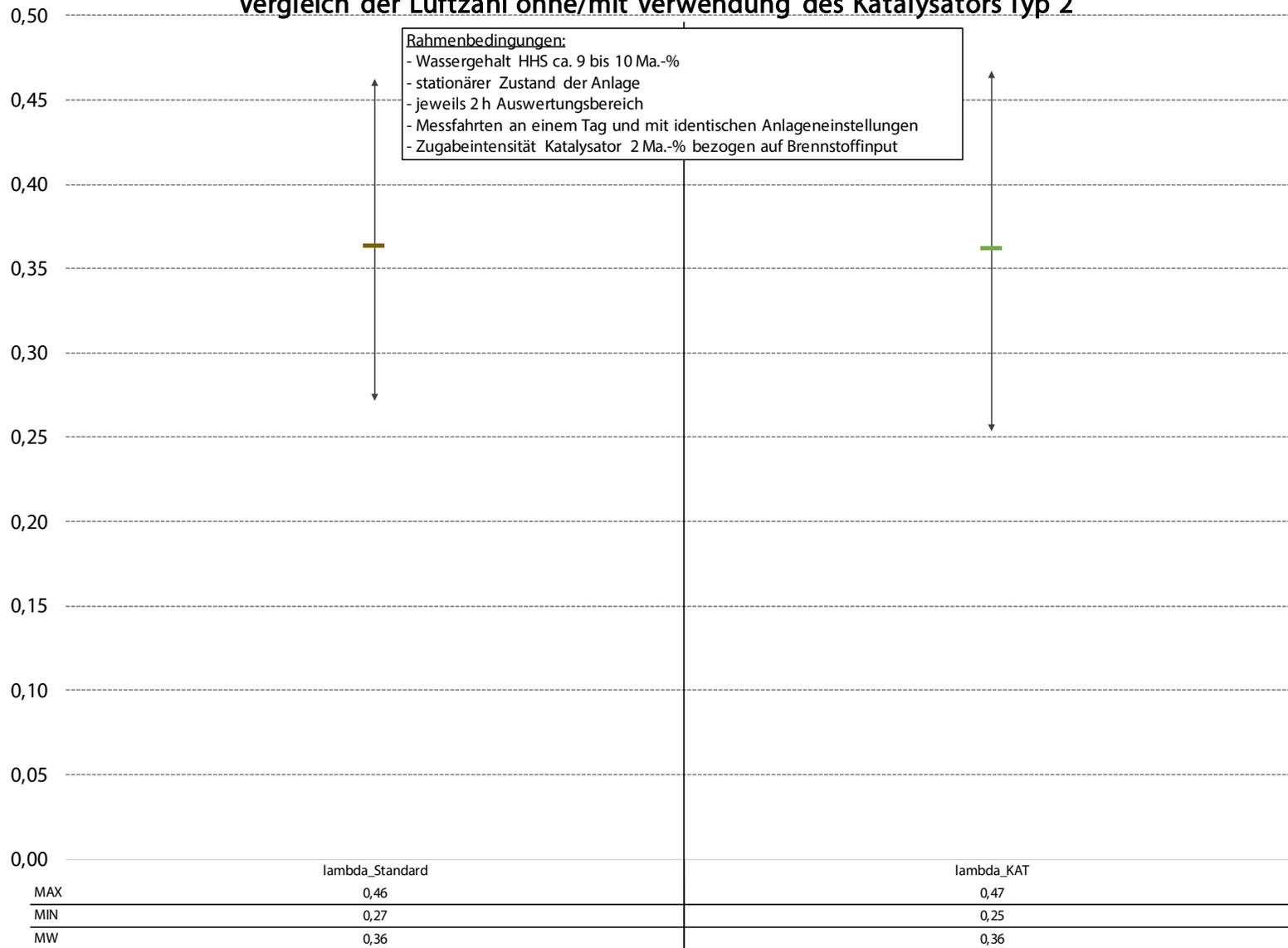


Abbildung 8-20: Darstellung der berechneten Luftzahl bei der MF 2.5.16

### Vergleich der Luftzahl ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 3

Rahmenbedingungen:  
 - Wassergehalt HHS ca. 6 Ma.-%  
 - stationärer Zustand der Anlage  
 - jeweils 3 h Auswertungsbereich  
 - Messfahrten an einem Tag und mit identischen Anlageneinstellungen  
 - Zugabeintensität Katalysator 2 Ma.-% bezogen auf Brennstoffinput

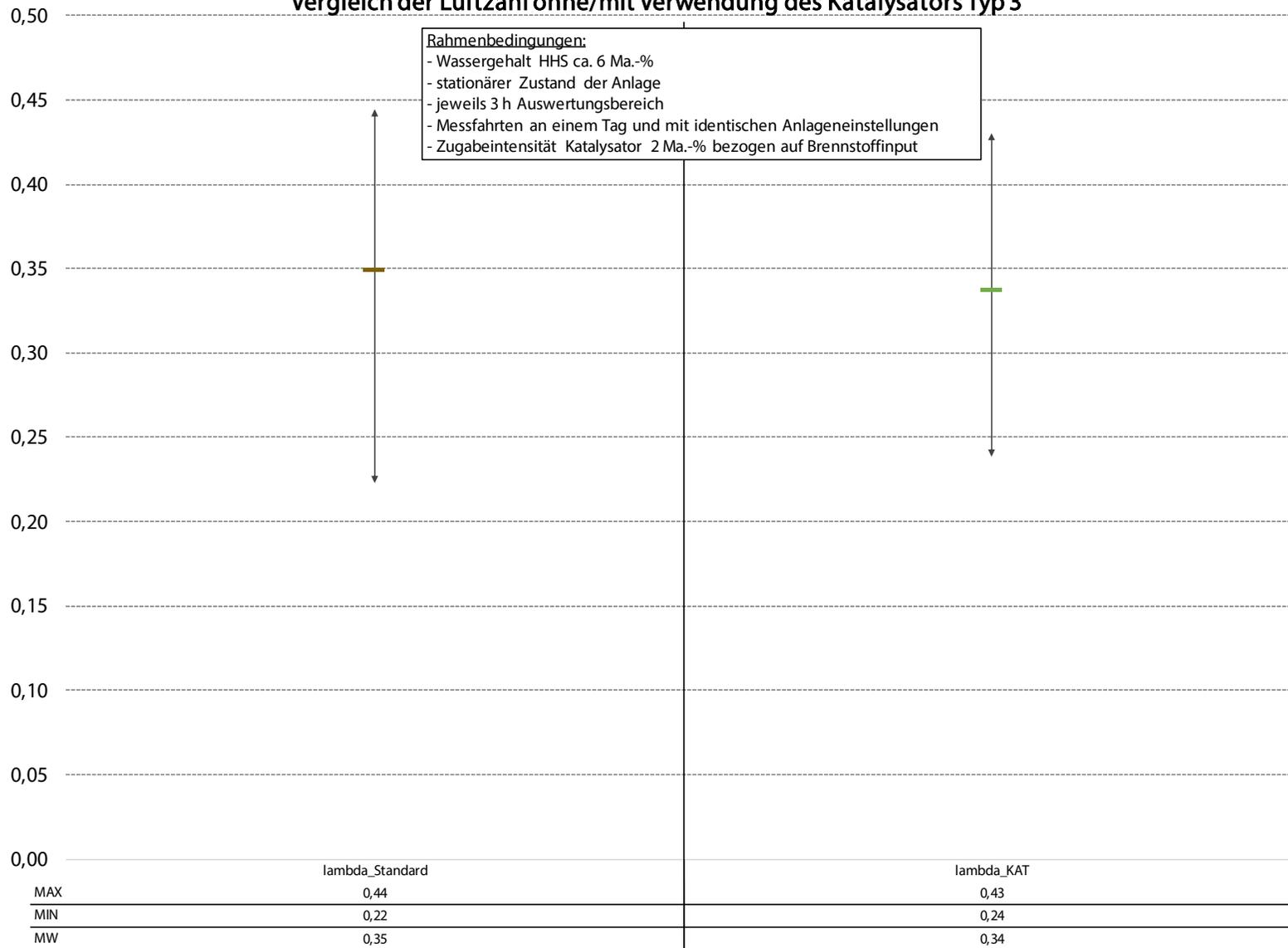


Abbildung 8-21: Darstellung der berechneten Luftzahl bei der MF 28.9.16

## Gebläseleistung und Absolutdrücke ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ1

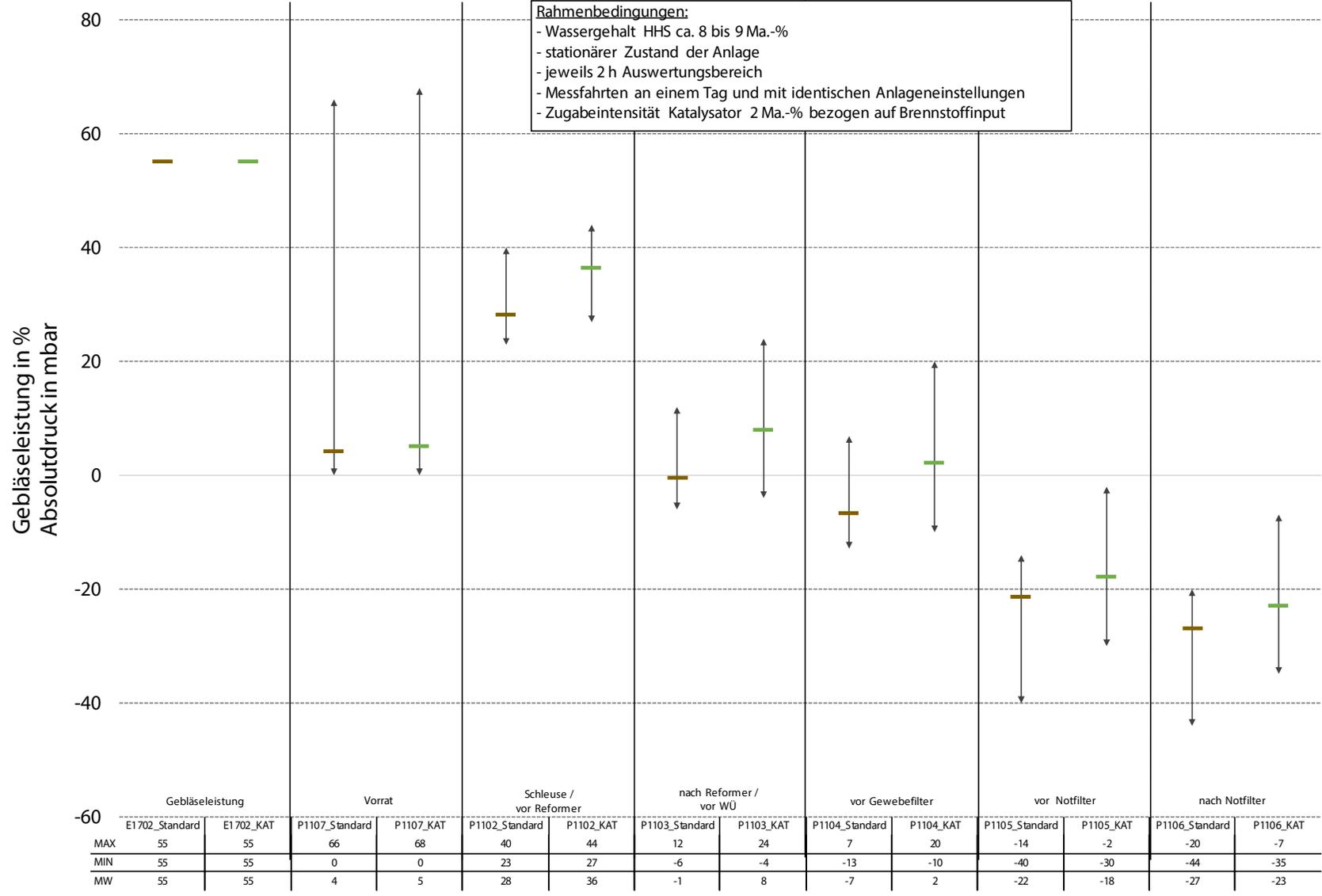


Abbildung 8-22: Gebläseleistung und Absolutdrücke in der Produktgasstrecke während der MF 14.4.16

## Gebläseleistung und Absolutdrücke ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 2

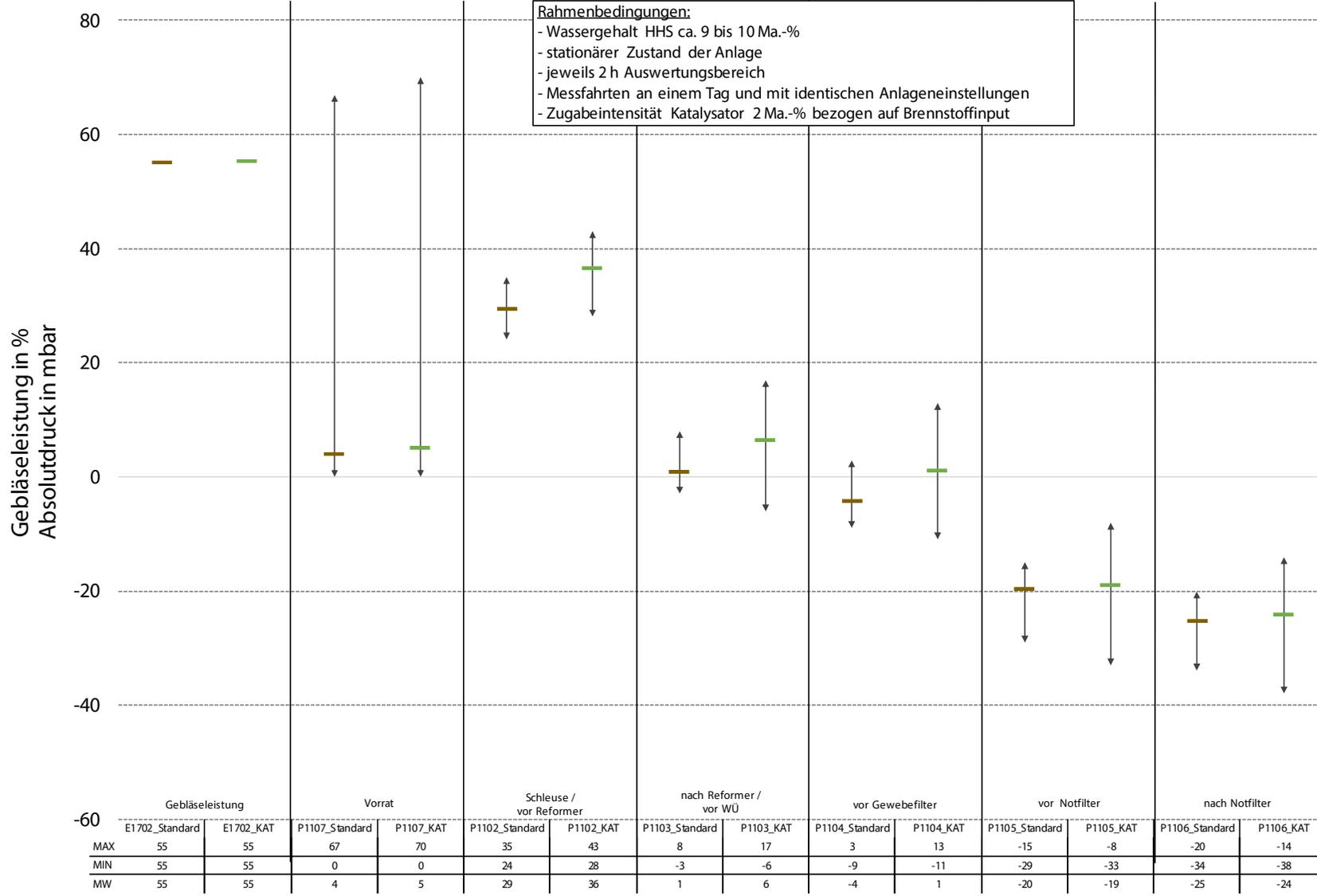


Abbildung 8-23: Gebläseleistung und Absolutdrücke in der Produktgasstrecke während der MF 2.5.16

### Gebläseleistung und Absolutdrücke ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 3

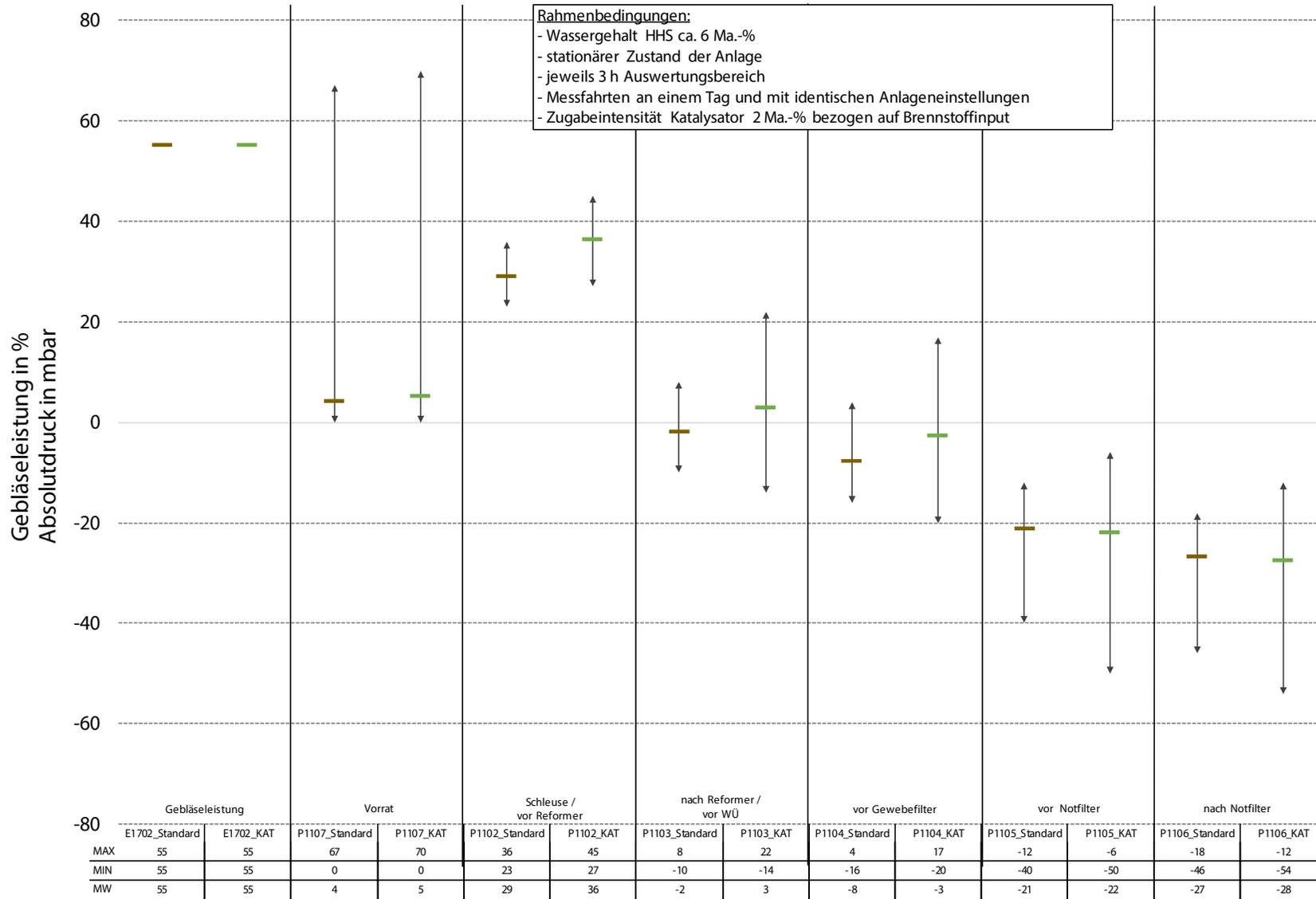


Abbildung 8-24: Gebläseleistung und Absolutdrücke in der Produktgasstrecke während der MF 28.9.16

### 8.1.3 Filterstaub

In Tabelle 8-4 ist der erfasste Filterstaubanfall und dessen Charakterisierung hinsichtlich Asche- und  $C_{\text{fix}}$ -Anteil geordnet nach den Messfahrten dargestellt. Dabei wurde ein Filterstaubanfall von 2,9 bis 4,5 Ma.-% bezogen auf den Brennstoffinput analysiert. Zu erkennen ist außerdem der grundsätzlich höhere Ascheanteil (um ca. 0,4 bis 0,9 Ma.-%) bei Einsatz der Katalysatoren. Wie schon im Kapitel 7.5 beschrieben, kann dies auf den mit dem Katalysator zugeführten zusätzlichen Ascheanteil zurückzuführen sein. Die grafische Darstellung der Filterstaubzusammensetzung ist geordnet nach den MF ebenfalls in Kapitel 7.5 aufgeführt.

Zusätzlich wurde als theoretischer Fall die Filterstaubmenge bei Herausrechnung des Katalysatormaterials berechnet. Dabei wird die Zugabe des Katalysatormaterials zum Brennstoff (jeweils 2 Ma.-% des Brennstoffinputs) und dessen Ascheanteil von ca. 77 Ma.-% berücksichtigt. Wird folglich unter den Annahmen, dass keine Entmischung des Katalysators vom Brennstoff und während des Vergasungsprozesses der vollständige Umsatz der in gasförmige Produkte oxidierbaren Katalysatorbestandteile (ca. 20 Ma.-%) erfolgt, der „Filterstaubanfall netto“ berechnet, ergibt sich ein Rückgang des Filterstaubanfalls von ca. 0,6 bis 1,2 Ma.-%-Punkte ggü. der Standardfahrweise. Da die aufgeführten Annahmen nicht belegt werden können (u.a. geringe Rückstände bzw. Speichereffekte in Tagesbehälter, Brennstoffwaage und Schleuse), wurden diese Angaben in Tabelle 8-4 rot markiert und nicht für die weitere Auswertung verwendet. Darüber hinaus ist eine Herausrechnung der jeweils zugeführten Katalysatormenge nicht möglich, da nach Auskunft des Herstellers ein gewisser Anteil des Katalysators (z.B. die enthaltenen Hydroxid- und Carbonatanteile) im Prozess umgesetzt wird. [2]

Tabelle 8-4: Anfall und Charakterisierung der Filterstaubproben

		Einheit	Messfahrten					
Datum			14.4.16	14.4.16	2.5.16	2.5.16	28.9.16	28.9.16
Fahrweise			Standard	KAT	Standard	KAT	Standard	KAT
Filterstaubanfall	g/h		836	1006*	971	1078*	1023	1331*
	Ma.-%**		2,9	3,5	3,3	3,7	3,6	4,5
Filterstaubabfall netto (theoretischer Fall)	g/h		836	564	971	627	1023	879
	Ma.-%**		2,9	2,0	3,3	2,1	3,6	3,0
Filterstaub- zusammensetzung	A	Ma-% TS	22,1	30,7	21,7	26,8	14,7	27,6
	$C_{\text{fix}}$	Ma-% TS	63,8	50,1	62,8	57,4	73,0	53,3

\* die Angabe bezieht sich auf die erfasste Gesamtmasse (Filterstaub inkl. Katalysatorrest)

\*\* die Angabe bezieht sich auf die Brennstoffinputmasse

Mithilfe der durch die Abwägung des Filterstaubes am Gewebefilteraustrag erfassten Filterstaubmenge wurde der jeweilig auftretende Anfall an Filterstaub als Massenstrom berechnet. Diese Werte wurden für den Vergleich der Versuchsphasen (Standard-HHS / KAT-HHS) zusammen mit den Brennstoffmassenströmen in Abbildung 8-25 (MF 14.4.16), Abbildung 8-26 (MF 2.5.16) und Abbildung 8-27 (MF 28.9.16) grafisch aufbereitet. Durch die Laboranalysen der Filterstaubproben wurde der Asche- und  $C_{\text{fix}}$ -Anteil ermittelt und diese ebenso für den Versuchsphasenvergleich in Abbildung 8-28 (MF 14.4.16), Abbildung 8-29 (MF 2.5.16) und Abbildung 8-30 (MF 28.9.16) dargestellt. Zu erkennen ist zum einen der gestiegene Filterstaubanfall bei Einsatz der KAT-HHS (um absolut 170; 107 bzw. 308 g/h) und zum anderen die sich verändernde Filterstaubzusammensetzung, die durch einen höheren Ascheanteil (um 8,6; 5,1 bzw. 12,9 Ma.-% TS) und einen niedrigeren  $C_{\text{fix}}$ -Anteil (um 13,7; 5,4 bzw. 19,7 Ma.-% TS) gekennzeichnet ist. Zu bemerken ist beim Einsatz der KAT-HHS, dass der Filterstaubanfall auch den am Gewebefilter ausgetragenen Katalysatoranteil beinhaltet (siehe Ausführungen zuvor).

## Vergleich der HHS- und Filterstaubströme ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ1

Rahmenbedingungen:  
 - Wassergehalt HHS ca. 8 bis 9 Ma.-%  
 - stationärer Zustand der Anlage  
 - jeweils 2 h Auswertungsbereich  
 - Messfahrten an einem Tag und mit identischen Anlageneinstellungen  
 - Zugabeintensität Katalysator 2 Ma.-% bezogen auf Brennstoffinput

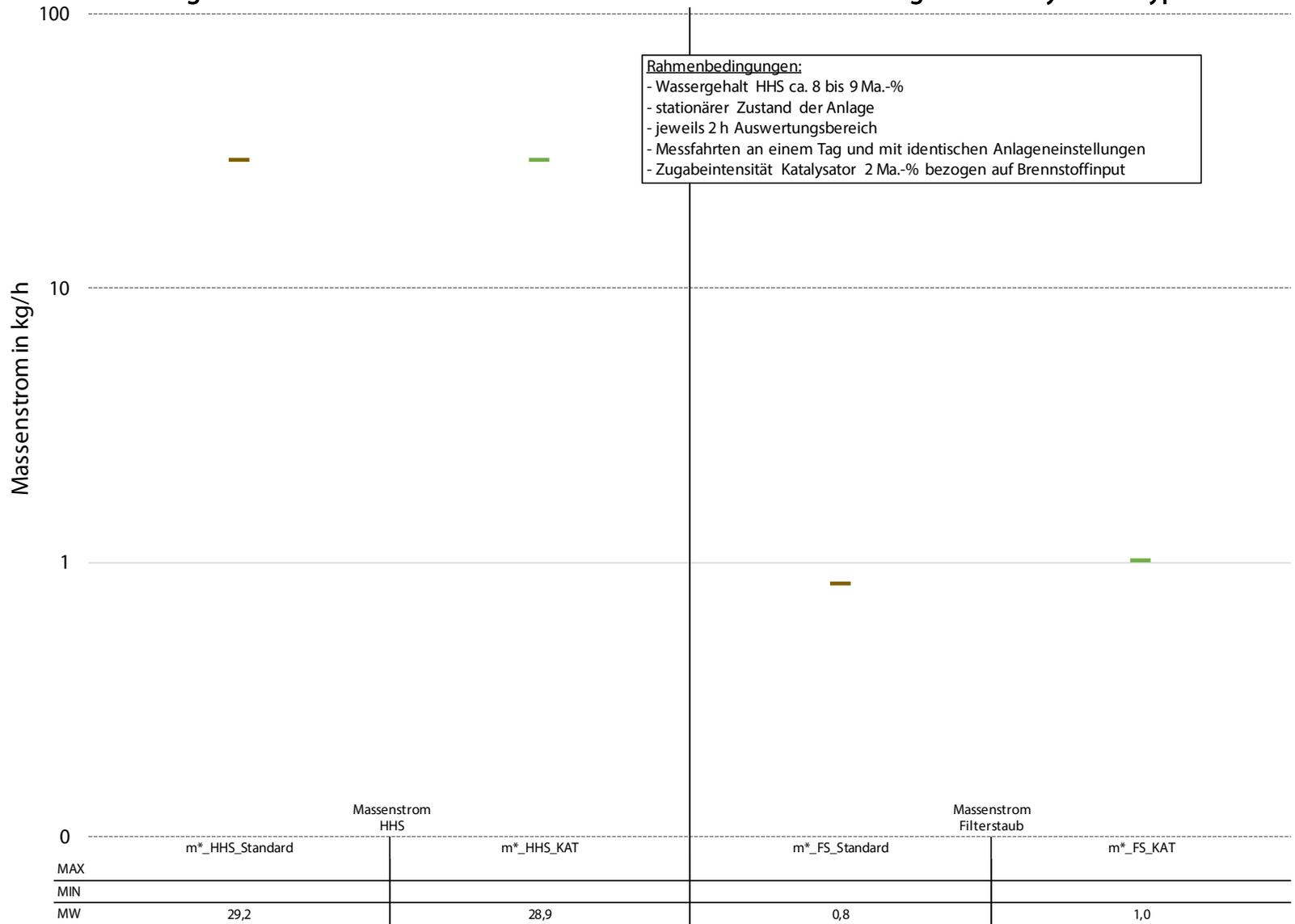


Abbildung 8-25: Massenströme von Brennstoff und Filterstaub, MF 14.4.16

## Vergleich der HHS- und Filterstaubströme ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 2

### Rahmenbedingungen:

- Wassergehalt HHS ca. 9 bis 10 Ma.-%
- stationärer Zustand der Anlage
- jeweils 2 h Auswertungsbereich
- Messfahrten an einem Tag und mit identischen Anlageneinstellungen
- Zugabeintensität Katalysator 2 Ma.-% bezogen auf Brennstoffinput

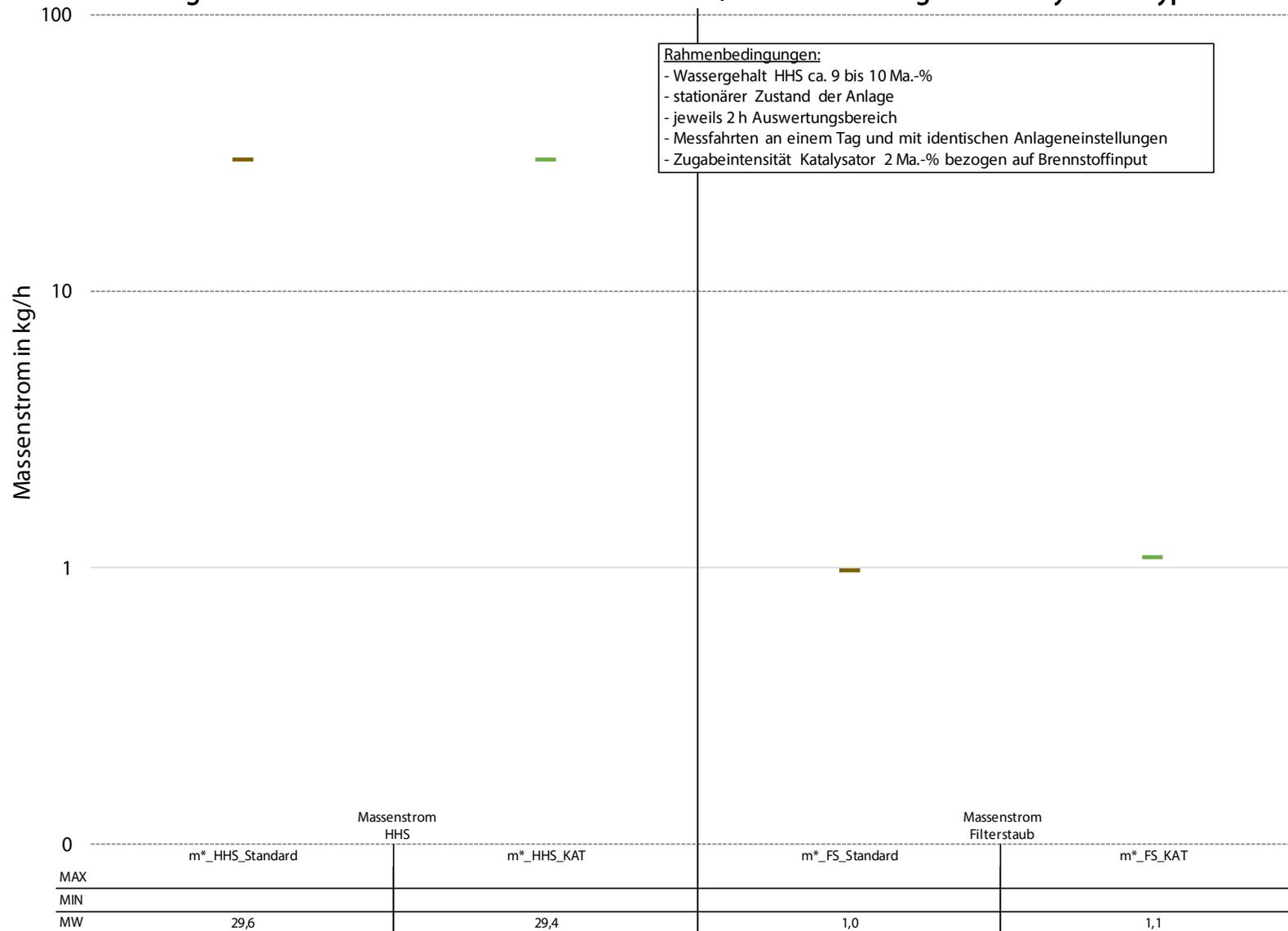


Abbildung 8-26: Massenströme von Brennstoff und Filterstaub, MF 2.5.16

### Vergleich der HHS- und Filterstaubströme ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 3

**Rahmenbedingungen:**  
 - Wassergehalt HHS ca. 6 Ma.-%  
 - stationärer Zustand der Anlage  
 - jeweils 3 h Auswertungsbereich  
 - Messfahrten an einem Tag und mit identischen Anlageneinstellungen  
 - Zugabeintensität Katalysator 2 Ma.-% bezogen auf Brennstoffinput

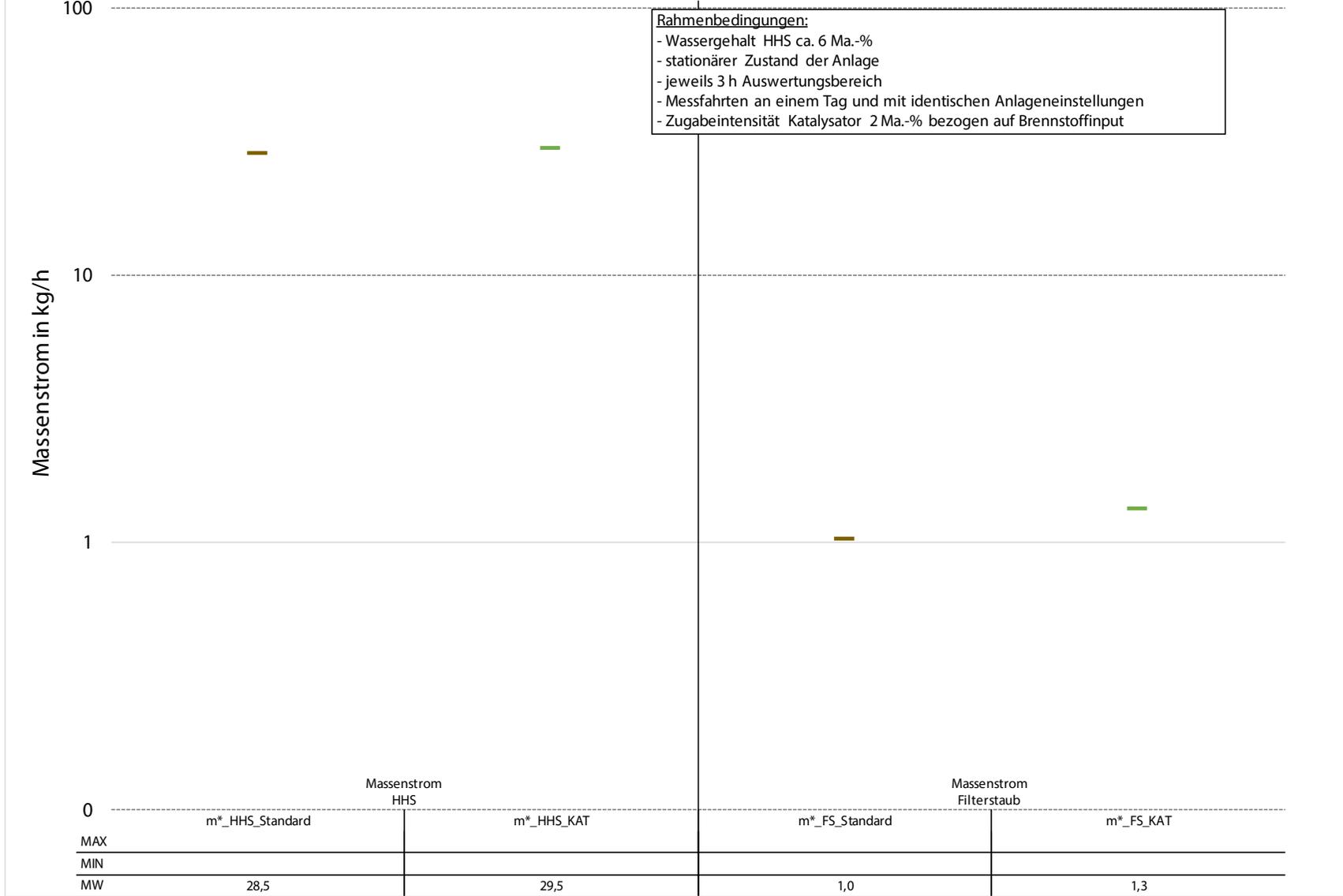


Abbildung 8-27: Massenströme von Brennstoff und Filterstaub, MF 28.9.16

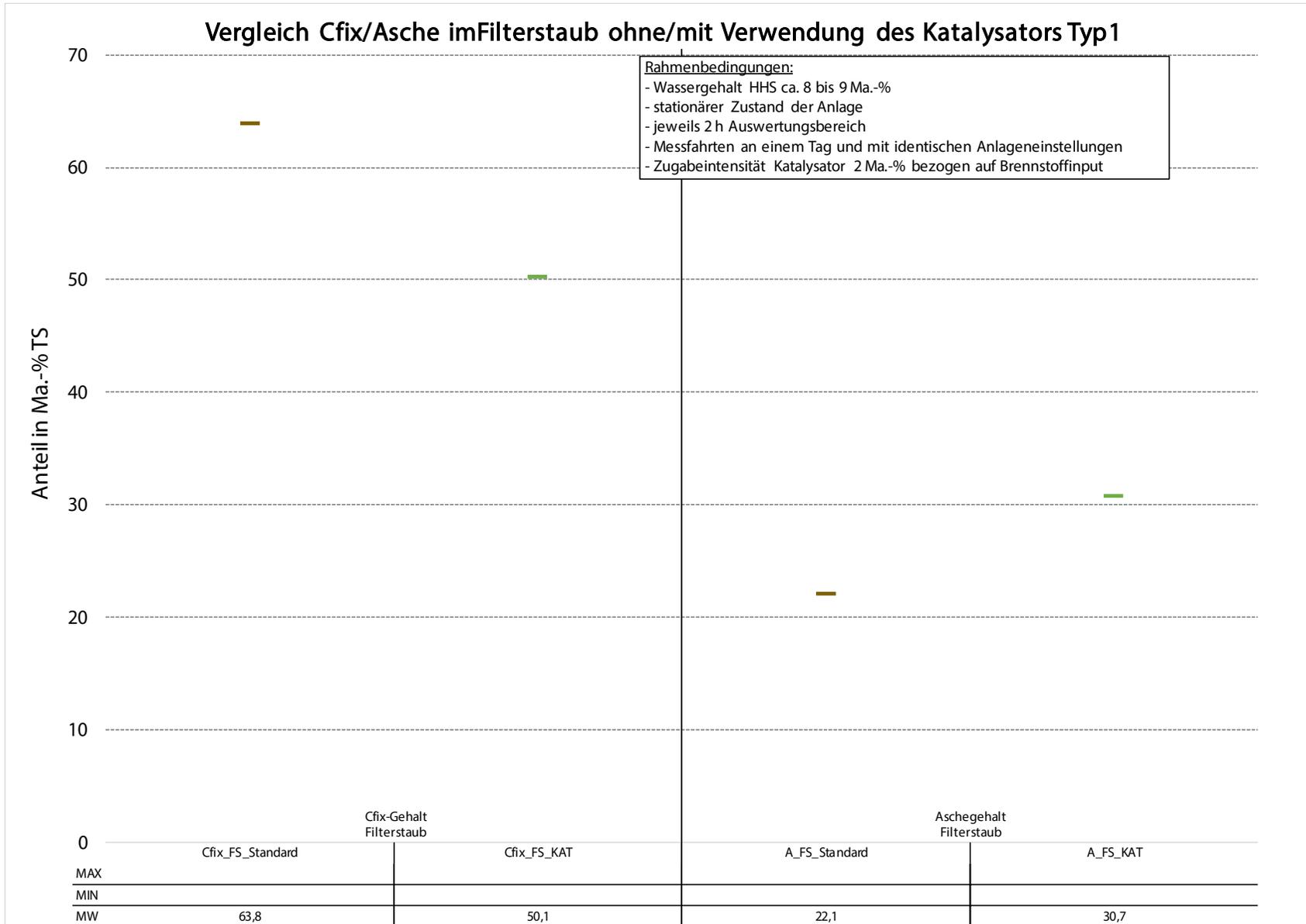


Abbildung 8-28: Asche- und C<sub>fix</sub>-Anteile des Filterstaubes, MF 14.4.16

### Vergleich Cfix/Asche im Filterstaub ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 2

**Rahmenbedingungen:**  
 - Wassergehalt HHS ca. 9 bis 10 Ma.-%  
 - stationärer Zustand der Anlage  
 - jeweils 2 h Auswertungsbereich  
 - Messfahrten an einem Tag und mit identischen Anlageneinstellungen  
 - Zugabeintensität Katalysator 2 Ma.-% bezogen auf Brennstoffinput

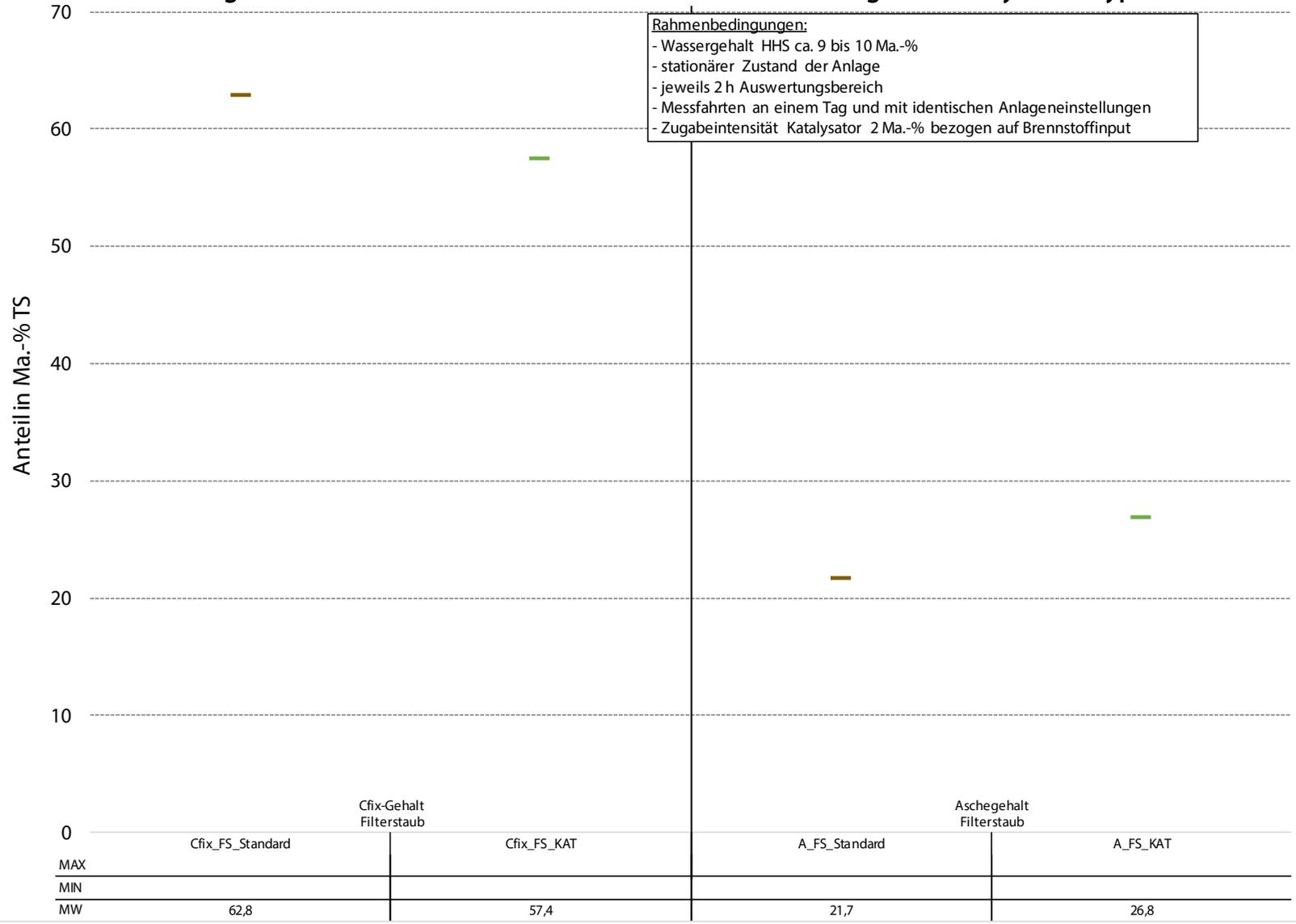


Abbildung 8-29: Asche- und C<sub>fix</sub>-Anteile des Filterstaubes, MF 2.5.16

### Vergleich C<sub>fix</sub>/Asche im Filterstaub ohne/mit Verwendung des Katalysators Typ 3

Rahmenbedingungen:  
 - Wassergehalt HHS ca. 6 Ma.-%  
 - stationärer Zustand der Anlage  
 - jeweils 3 h Auswertungsbereich  
 - Messfahrten an einem Tag und mit identischen Anlageneinstellungen  
 - Zugabeintensität Katalysator 2 Ma.-% bezogen auf Brennstoffinput

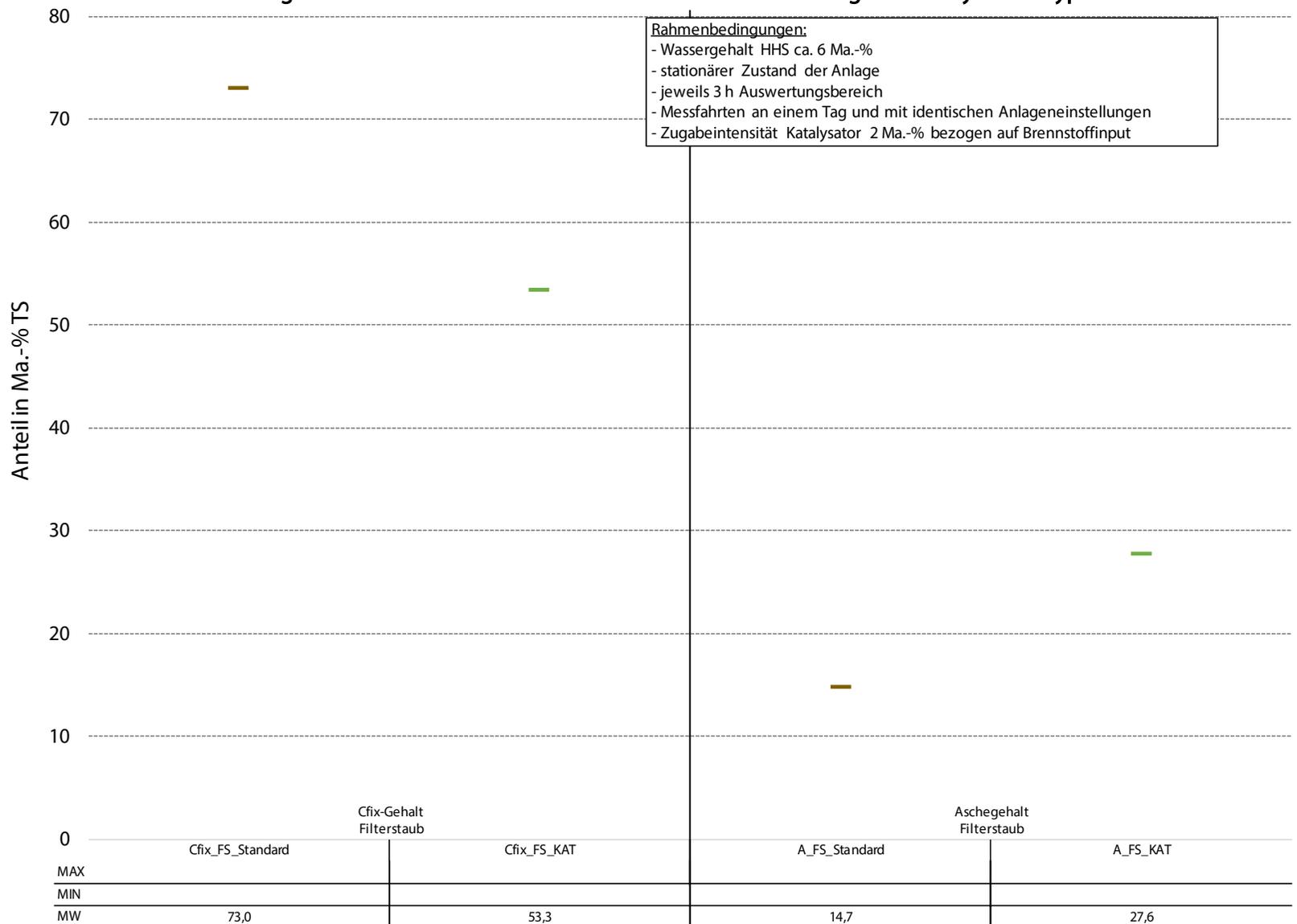


Abbildung 8-30: Asche- und C<sub>fix</sub>-Anteile des Filterstaubes, MF 28.9.16

## 8.2 Störungen

Während der Messfahrten traten keine Störungen auf, die eine Datenauswertung im stationären Zustand der jeweiligen Versuchsphase beeinträchtigten. Auch während des Anlagenbetriebes ohne Datenauswertung (Anfahrbetrieb und Betrieb direkt nach Umstellung auf KAT-HHS) waren keine Störungen zu verzeichnen.

## 8.3 *Betreiberaufwand hinsichtlich Mischung HHS und Katalysator*

Laut Sicherheitsdatenblatt der Katalysatoren ist dies kein gefährliches Produkt im Sinne der Richtlinie 1999/45/EC. Jedoch sollte beim Umgang mit dem Katalysator Schutzbrille, allg. Arbeitsschutzkleidung, Atemschutz und Schutzhandschuhe getragen werden. Die Zugabe der Katalysatoren erfolgte im Rahmen der hier beschriebenen MF manuell. Wie die Zugabe des Katalysatormaterials zu den HHS unter der Maßgabe einer möglichst homogenen Mischung vorgenommen wurde, ist in Kapitel 3 beschrieben. Inwieweit es technisch machbar ist, das Katalysatormaterial automatisch dem diskontinuierlichen Brennstoffstrom zuzugeben und dabei die vorgegebene Dosierung und eine hinreichend gute Durchmischung einzuhalten ist schwer abschätzbar. Der Aufwand für ein solches Verfahren ist jedoch als sehr hoch einzuschätzen, da die Dosierung nur bei aktiver Brennstoffzuführung erfolgen darf und gleichzeitig die Durchmischung gewährleistet werden muss.

## 8.4 *Anlagenfahrweise*

Das Holzvergaser-BHKW wurde während der gesamten Versuche mit identischen Anlageneinstellungen betrieben, um die Vergleichbarkeit der Messdaten zu gewährleisten. Hinsichtlich der Konditionierung der HHS wurden diese in der Trocknungsanlage bis auf einen Wassergehalt von ca. 6 bis 10 Ma.-% getrocknet (annähernd vergleichbar für alle Messfahrten) und außerdem die Feinanteilabtrennung nach dem Tagesbehälter blockiert, sodass alle HHS (Standard-HHS, KAT-HHS) ungesiebt dem Vergasungsprozess zugeführt wurden. Grobanteile wurden nicht entfernt. Die Trocknung der HHS auf einen exakt definierten Wassergehalt ist durch die Vielzahl der Rahmenbedingungen (z.B. variierender Wassergehalt der zu trocknenden HHS) nicht möglich. Die Einstellung des mechanischen Füllstandsgebers wurde für alle MF auf Betrieb mit „feinem“ Hackgut (7 cm) justiert. Die Leistung des Seitenkanalverdichters für die Ansaugung des Vergasungsmittels Luft betrug konstant 55 %. Die Luftzahl als dimensionslose Kennzahl zur Beschreibung des Massenverhältnisses des zugeführten Vergasungsmittels Luft zum umgesetzten Brennstoff war bei allen Messfahrten und Fahrweisen vergleichbar.

In der folgenden Abbildung 8-31 wird deutlich erkennbar, dass mit Einsatz des KAT die Druckdifferenz über den Gewebefilter sprunghaft anstieg und dementsprechend das Reinigungsintervall des Gewebefilters deutlich sank. Inwieweit diesbezüglich ein steter Einsatz des KAT ohne Beeinträchtigung der dauerhaften Gewebefilterwirkung überhaupt möglich ist, müsste in Dauereinsätzen überprüft werden. Durch die mechanische Gewebefilterabreinigung entstehen Druckstöße in der nachfolgenden Produktgasleitung, die somit auch Rückwirkungen auf die BHKW-Leistung haben.

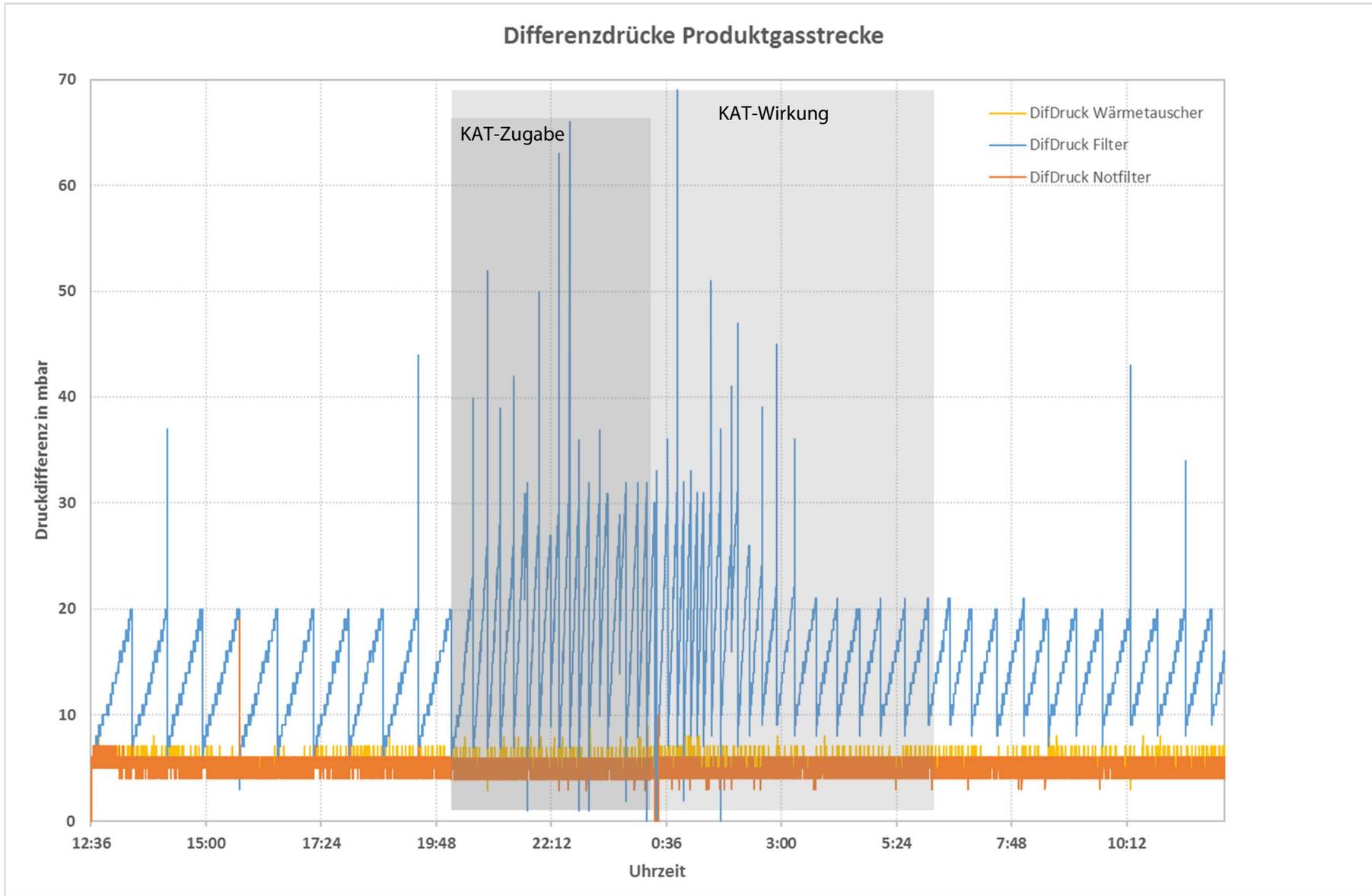


Abbildung 8-31: Verlauf der Druckverhältnisse in der Produktgasstrecke während der MF 28.9.16

## 9 Bewertung der Katalysatorwirkung beim Einsatz in einem kleintechnischen Holzvergaser

Nach dem Einsatz der verschiedenen Katalysatoren (KAT1...KAT3) der Fa. GNS als Zumischung zu den Standard-HHS und dem Vergleich der Mess- und Analysedaten konnte eine signifikante Veränderung des Vergasungsverhaltens festgestellt werden. Diese Aussage bezieht sich zum einen darauf, dass bei identischen Anlageneinstellungen der chemische Produktgasenergiestrom aufgrund des gestiegenen Heizwertes des Produktgases bei Einsatz der KAT-HHS im Vergleich zu den Standard-HHS deutlich gestiegen ist. Somit konnte über die thermochemische Vergasung der KAT-HHS mehr chemisch gebundene Brennstoffenergie in das Produktgas überführt werden. Eine Tendenz hinsichtlich steigendem oder sinkendem Brennstoffumsatz konnte im Rahmen der MF nicht festgestellt werden. Der höhere Ascheanteil im Filterstaub könnte durch den zusätzlich zugeführten Ascheanteil der Katalysatoren hervorgerufen werden und kann somit nicht als Hinweis für einen ggf. gestiegenen Kaltgaswirkungsgrad dienen. Als Ergebnis der Analysen hinsichtlich der PAK-Beladung im Filterstaub wurde ein Anstieg der PAK-Konzentration bei Einsatz der KAT-HHS aufgezeigt.

Die Gastemperatur am Austritt des Reformers als Hinweis für die Reaktionstemperaturen sank bei Einsatz der Katalysatoren. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass der KAT die endothermen Reaktionen verstärkt. Dabei ist zu beachten, dass die Prozesstemperatur nicht zu weit absinkt, da ansonsten die Gefahr einer erhöhten Teerbildung bestehen würde.

Werden die Wirkungen der verschiedenen Katalysatoren miteinander verglichen, kann dem KAT1 (MF 14.4.16) ggü. KAT2 (MF 2.5.16) und KAT3 (MF 28.9.16) eine stärkere Wirkung bescheinigt werden. Im Vergleich zu den Standard-HHS traten hierbei die Änderungen hinsichtlich Produktgastemperatur und -zusammensetzung deutlicher in Erscheinung.

In Abweichung zur ursprünglich festgelegten Bilanzgrenze wurden zusätzlich die BHKW-Leistungen während der jeweiligen MF erfasst, miteinander verglichen und in Tabelle 9-1 zusammenfassend aufgeführt. Dabei wird ersichtlich, dass das bei KAT-Fahrweise entstehende energetisch höherwertigere Produktgas nicht äquivalent im BHKW in elektrische Energie umgewandelt werden konnte. Somit sank der elektrische BHKW-Wirkungsgrad bei Einsatz der KAT-HHS. Da auch die abgeführte thermische Leistung des BHKW nicht entsprechend anstieg, sank der thermische BHKW-Wirkungsgrad ebenfalls. Schlussfolgernd müssen der Abgasverlust, die Abgastemperaturen und/oder die Wärmeverluste über die Oberfläche des BHKW ansteigen. Ursache hierfür ist möglicherweise, dass die vorhandene Motorsteuerung (z.B. Lambdaregelung) dafür nicht ausgelegt ist.

**Tabelle 9-1: Zusammenfassung der erfassten BHKW-Leistungen und berechneten BHKW-Wirkungsgraden**

	Einheit	Messfahrten					
Datum		14.4.16	14.4.16	2.5.16	2.5.16	28.9.16	28.9.16
Fahrweise		Standard	KAT	Standard	KAT	Standard	KAT
Elektrische BHKW-Leistung	kW	31,1	32,0	31,9	32,3	31,8	31,9
Elektrischer BHKW-WG	%	24,0	21,8	23,8	21,5	25,2	23,0
Thermische BHKW-Leistung	kW	k.A.	k.A.	63,2	64,2	63,4	63,5
Thermischer BHKW-WG	%	k.A.	k.A.	47,2	42,9	50,2	45,7

Der Aufwand, um die möglichst homogene Mischung des Katalysatormaterials mit dem Standardbrennstoff nach vorgegebenen Mischungsverhältnis zu erreichen, war im Rahmen der Versuchsfahrten sehr hoch. Dies müsste bei einem Einsatz unter marktüblichen Bedin-

gungen automatisiert und möglichst direkt vor dem Reformier erfolgen, um der Entmischungsfahrer entgegen zu wirken. Die automatisierte Zugabe bedingt aufgrund der zyklischen Brennstoffzufuhr einer Integration in die Anlagensteuerung. Darüber hinaus sollte die Zugabe z.B. im Bereich der Zuführschnecke erfolgen, um die Durchmischung von HHS und Katalysator zu gewährleisten.

Wie zuvor erwähnt, kann im Rahmen der MF eine Wirkung der verwendeten Katalysatoren als Zuschlag zum Standardbrennstoff für das Holzvergaser-BHKW nachgewiesen werden. Ob die nachgewiesenen Prozessveränderungen zu einer eventuellen Verbesserung der Anlagenwirtschaftlichkeit führen könnten, ist mit den beschriebenen Versuchen nicht nachzuweisen, war aber auch nicht Ziel der Untersuchung. Außerdem muss der zusätzliche Aufwand (Erwerb, Zumischung, Entsorgung) hinsichtlich der Katalysatorzugabe berücksichtigt werden. Sollten in Zukunft weitere KAT-Einsatzversuche erfolgen, sollte eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden, um den finanziellen Aufwand dem ggf. vorhandenen Nutzen gegenüber zu stellen.

In Bezug auf das Vergasungsverhalten konnten sowohl während als auch nach den Versuchsfahrten keine betriebsstörenden Einflüsse (z.B. Verschmutzung und Verschlackung) durch die eingesetzten Katalysatoren festgestellt werden. Dabei gilt zu beachten, dass alle MF immer nur Kurzeinsätze mit den verschiedenen Katalysatormaterialien darstellen. Inwieweit dies auch auf einen dauerhaften Einsatz der Katalysatoren zutrifft, können nur Langzeitmessfahrten belegen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Abschlussbericht „Zittauer Kraftwerkslabor - Thermochemisches Versuchsfeld, 2015; [http://ipm.hszg.de/fileadmin/Redakteure/Institute/IPM/Publikationen/TCV/IPM\\_Abschlussbericht\\_TCV-GESAMT\\_final.pdf](http://ipm.hszg.de/fileadmin/Redakteure/Institute/IPM/Publikationen/TCV/IPM_Abschlussbericht_TCV-GESAMT_final.pdf)
  
- [2] Spindler, H: Chemische Reaktionen bei der katalytischen Vergasung; Mündliche Mitteilungen im persönlichen Gespräch; Gesellschaft für Nachhaltige Stoffnutzung mbH; Zittau; 2016
  
- [3] GNS mbH: Sicherheitsdatenblatt GNS-Catalyst Z16/17; Halle; 02/2016