

**WÖHLER**

Wöhler Technik GmbH  
Wöhler-Platz 1  
33181 Bad Wünnenberg



**Universität Stuttgart**

Institut für Feuerungs- und  
Kraftwerkstechnik (IFK)  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

# **Entwicklung eines mobilen Online- Staubmessgerätes für den Anwendungsbereich genehmigungsbedürftiger Anlagen**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,  
gefördert unter dem Az: 33041 von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Stephan Ester

Alexander Stizenberg / Carl-Torben Schmidt / Lisa Aerdker

Dr. Michael Struschka

Winfried Juschka

März 2018



# Entwicklung eines mobilen Online- Staubmessgerätes für den Anwendungsbereich genehmigungsbedürftiger Anlagen

Dr. Stephan Ester (Fa. Wöhler)

Alexander Stizenberg / Carl-Torben Schmidt / Lisa Aerdker (Fa. Wöhler)

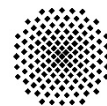
Dr. Michael Struschka (IFK)

Winfried Juschka (ehemals IFK\*)

Wöhler Technik GmbH  
Wöhler-Platz 1  
33181 Bad Wünnenberg  
<https://www.woehler.de/>  
Email: [info@woehler.de](mailto:info@woehler.de)

The logo for Wöhler, featuring the word "WÖHLER" in a bold, blue, sans-serif font with a slight shadow effect.

Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK)  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart  
Tel.: +49 711 685 6 3487  
Fax: +49 711 685 6 3491  
[ifk@ifk.uni-stuttgart.de](mailto:ifk@ifk.uni-stuttgart.de)



**Universität Stuttgart**

The logo for IFK, featuring the lowercase letters "ifk" in a bold, black, sans-serif font. The letter "i" has a small red triangle at its base.

\* wissenschaftlicher Mitarbeiter am IFK bis Ende 2016



**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>33041</b>	Referat	<b>24</b>	Fördersumme	<b>124.484 Euro</b>
----	--------------	---------	-----------	-------------	---------------------

<b>Antragstitel</b>	<b>Entwicklung eines mobilen Online-Staubmessgerätes für den Anwendungsbereich genehmigungsbedürftiger Anlagen</b>
---------------------	--

<b>Stichworte</b>	Software, Standardreferenzmessverfahren, Emissionssimulationsanlage, Messgenauigkeit, isokinetische Probenahme
-------------------	--

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
<b>24 Monate</b>	<b>11.12.2015</b>	<b>31.12.2017</b>	<b>1</b>

Zwischenberichte	2
------------------	---

<b>Bewilligungsempfänger</b>	Wöhler Technik GmbH Wöhler-Platz 1 33181 Bad Wünnenberg	Tel	+49295373252
		Fax	+4929537396100
	info@woehler.de www.woehler.de	Projektleitung Dr. Stephan Ester	
		Bearbeiter Alexander Stizenberg; Carl-Torben Schmidt	

<b>Kooperationspartner</b>	Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik (IFK) Universität Stuttgart Dr. Michael Struschka Pfaffenwaldring 23 70569 Stuttgart  ifk@ifk.uni-stuttgart.de www.ifk.uni-stuttgart.de
----------------------------	--

### **Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Zur nicht kontinuierlichen Überwachung der Staubgrenzwerte im Überwachungsbereich genehmigungsbedürftiger Anlagen (TA Luft, 13. und 17. BImSchV) wird bisher das Standardreferenzverfahren nach VDI 2066 Blatt 1 eingesetzt. Vorteilhaft sind die hohe Messgenauigkeit und ein breites Anwendungsfeld. Nachteilig ist das diskontinuierliche, aufwendige Messverfahren. Entsprechend kann das Messergebnis dem Betreiber der Anlage nur mit großem zeitlichem Verzug bekannt gegeben werden. Die Zielsetzung des Förderprojekts bestehen darin, unabhängig von Änderungen der Partikeleigenschaften, direkt gravimetrische Messwerte während der kontinuierlichen Probenahme über den Betriebszustand der laufenden Anlage in der Qualität des Standardreferenzverfahrens zu erfassen. Dazu soll der Einsatzbereich eines bereits für Überwachungsaufgaben der 1.BImSchV entwickelten direkt-gravimetrisch arbeitenden Staubmassensensors erweitert werden.

### **Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

Die ersten beiden Arbeitspakete beinhalten konstruktive Anpassungen am bestehenden Probenahme- und Sensorsystem, um eine isokinetische Probenahme und minimale Sedimentationsverluste sicherzustellen. In den weiteren Arbeitsschritten werden dann diese Ergebnisse in die Praxis übertragen und sowohl an realen Emissionsquellen erprobt und abschließend, vor allem in Bezug zur Vergleichbarkeit mit Standardreferenzverfahren, bewertet.

### ***Ergebnisse und Diskussion***

In dem Projekt konnten grundlegende Weiterentwicklungen am bestehenden Sensorsystem umgesetzt und erfolgreich getestet werden. Durch diese Weiterentwicklung werden Störeinflüsse auf das Messsignal kontinuierlich erfasst und das Messsignal kann entsprechend korrigiert werden. Anhand von Simulationsrechnungen zur zeitlichen und örtlichen Temperaturverteilung im Sensorgehäuse des Messgerätes konnte die Ursache erhöhter Gerätedriften während der Stabilisierungsphase des Messgerätes oder bei Änderungen der Wärmekapazität vom Probengas aufgezeigt werden. Durch Labor- und Realgasmessungen wurde die Weiterentwicklung der verschiedenen Prototypen unterstützt und die Einsatzfähigkeit und Eignung des neuen Messgerätes demonstriert. Abschließend wurden noch theoretische Betrachtungen und Berechnungen sowie Labor- und Realgasmessungen zur Untersuchung der Partikelabscheidung in der Probenahmeverrichtung insgesamt und deren einzelnen Mechanismen durchgeführt. Hierdurch konnten die Einflüsse der einzelnen Mechanismen und mögliche konstruktive Maßnahmen zur Minderung der Ablagerungen bewertet werden.

### ***Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation***

Vorstellung wesentlicher Projektergebnisse im Rahmen von Fachbeiträgen im „Paderborner Netzwerk für Gas- und Partikelsensorik“. Dabei handelt es sich um eine mindestens einmal jährlich stattfindende Veranstaltung mit Beiträgen zu Forschungsaktivitäten im Bereich der Gas- und Partikelsensorik mit Fachgebieten der Universitäten Stuttgart, Gießen und Paderborn und der Wöhler Technik GmbH.

### ***Fazit***

Das Projekt konnte erfolgreich abgeschlossen werden, das wichtigste Entwicklungsziel (Weiterentwicklungen des Sensorsystems) konnte umgesetzt werden. Zudem eröffnet sich die Möglichkeit den Messbereich hin zu niedrigeren Staubkonzentrationen zu vergrößern.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>Ausgangssituation</b> .....	<b>2</b>
<b>Teil A: Entwicklung des mobilen Online-Staubmessgerätes für den Anwendungsbereich genehmigungsbedürftiger Anlagen</b> .....	<b>5</b>
<b>A1 Arbeitsschritte - AP</b> .....	<b>5</b>
<b>A2 Stand der Technik</b> .....	<b>7</b>
<b>A3 Anforderungen an das Online-Messgerät</b> .....	<b>9</b>
<b>A4 Korrekturverfahren</b> .....	<b>11</b>
<b>A5 Simulationsrechnungen Partikelflugbahn</b> .....	<b>14</b>
A5.1 Zusammenfassung der Transport- und Abscheidemechanismen .....	14
A5.2 Simulationsrechnung mit COMSOL.....	15
<b>Teil B: Simulationsrechnungen sowie Messungen mit dem Prototyp im Labor und an Realgas</b> .....	<b>20</b>
<b>B1 Simulationsrechnungen Sensorgehäuse</b> .....	<b>20</b>
B1.1 Simulationrechnungen ohne Schlauchheizung.....	22
B1.2 Simulationsrechnungen mit Schlauchheizung .....	26
B1.3 Simulationsrechnungen mit anderer Gaszusammensetzung .....	31
B1.4 Untersuchung zur Verkürzung der Stabilisierungszeit.....	39
<b>B2 Messungen mit Entwicklungsvarianten</b> .....	<b>43</b>
B2.1 Messungen im Labor .....	43
B2.1.1 Prototyp SM 700 Nr.3-V1 .....	43
B2.1.2 Prototyp SM 700 Nr.3-V2.....	44
B2.1.3 Prototyp SM 700 Nr.3-V3.....	46
B2.1.4 Prototyp SM 700 Nr.3-V4 .....	48
B2.1.5 Prototyp SM 700 Nr.3-V5.....	49
B2.1.6 Zusammenfassung Labormessungen.....	50
B2.2 Realgasmessungen .....	52
B2.2.1 Messungen am Hackgutkessel .....	52
B2.2.2 Messungen am Kaminofen I .....	55
B2.2.3 Messungen am Kaminofen II .....	58
B2.2.4 Ergebnisse für Kaminöfen im Vergleich.....	60
B2.2.5 Messsignal und Wärmekapazität vom Probegas.....	60

<b>B3 Maßnahmen zur Minimierung der Staubablagerungen .....</b>	<b>63</b>
B3.1 Grundlagen .....	63
B3.1.1 Trägheit.....	63
B3.1.2 Schwerkraft.....	63
B3.1.3 Diffusion .....	64
B3.1.4 Thermophorese.....	65
B3.1.5 Koagulation .....	66
B3.2 Laboruntersuchungen zu Staubablagerungen.....	66
B3.3 Realgasmessungen zu Staubablagerungen.....	67
B3.4 Schlußfolgerungen.....	68
<b>Zusammenfassung und Bewertung des Entwicklungsstandes .....</b>	<b>69</b>
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>70</b>



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Schematische Darstellung des Wöhler SM 500 .....	2
Abbildung A2.1	Schematische Darstellung des Wöhler SM 500 Staubmessgerät Wöhler SM 500 (links), Gas- und Signalskizze (rechts) .....	7
Abbildung A2.2	Querschnitt des Wiegemoduls des Wöhler SM 500 .....	8
Abbildung A4.1	Korrekturmodell .....	11
Abbildung A4.2	Gesamter Aufbau Prototyp .....	12
Abbildung A4.3	Verlauf der geschätzten Partikelmasse und der Temperaturen $T_G$ und $T_S$ nach der Optimierung [7] .....	12
Abbildung A4.4	Verläufe der geschätzten Partikelmasse $mP$ und der Schlauchtemperatur $T_S$ bei einer Leermessung [7] .....	13
Abbildung A4.5	Verläufe der geschätzten Partikelmasse und der Schlauchtemperatur mit neuen Parametern [7] .....	13
Abbildung A5.1	Vernetztes Modell der Entnahmesonde und Abgaskanal .....	16
Abbildung A5.2	Ergebnis Strömungssimulation des Modells .....	16
Abbildung A5.3	Ergebnis Partikeltrajektorien des Modells zum Zeitpunkt $t=0,25s$ .....	17
Abbildung A5.4	Zuordnung der Position an Entnahmesonde .....	18
Abbildung A5.5	Partikelgrößenverteilung am Eingang Trichter der Entnahmesonde .....	19
Abbildung A5.6	Partikelgrößenverteilung am Ausgang der Entnahmesonde .....	19
Abbildung B1.1	Grundsätzlicher Aufbau des CFD-Modells für den Staubmassensensor des Wöhler SM 500 .....	20
Abbildung B1.2	Simulationsergebnis der Temperaturverteilung im Staubmassensensor des Wöhler SM 500 zum Zeitpunkt $t = 50 \text{ sec}$ .....	21
Abbildung B1.3	Gemessener und simulierter Temperaturverlauf für die Messstelle Resonanzrohr $T_f$ ohne Schlauchheizung .....	22
Abbildung B1.4	Gemessener und simulierter Temperaturverlauf an der Messstelle Resonanzrohr $T_f$ ohne Schlauchheizung im Bereich maximaler Temperatur (Wendepunkt im Temperaturverlauf) .....	23
Abbildung B1.5	Differenz zwischen gemessener (sm500_ $T_f$ ) und simulierter (simu_ $T_f$ - Heizung ab 70. s aus) Temperatur für die Messstelle Resonanzrohr beim Betrieb ohne Schlauchheizung .....	24
Abbildung B1.6	Verlauf der Wandtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (ohne Schlauchheizung) im Betrachtungszeitraum von 900 s .....	25
Abbildung B1.7	Verlauf der Fluidtemperatur in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (ohne Schlauchheizung) im Betrachtungszeitraum von 900 s .....	26
Abbildung B1.8	Gemessener und gemittelter Gastemperaturverlauf am Eingang von Segment 0 für den Start der Schlauchheizung bis zum Erreichen der Sollwerttemperatur .....	27
Abbildung B1.9	Gemessener und simulierter Temperaturverlauf für die Messstelle Resonanzrohr $T_f$ mit Schlauchheizung .....	28
Abbildung B1.10	Gemessener und simulierter Temperaturverlauf an der Messstelle Resonanzrohr $T_f$ mit Schlauchheizung im Bereich maximaler Temperatur (Wendepunkt im Temperaturverlauf) .....	29

Abbildung B1.11	Verlauf der Wandtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (mit Schlauchheizung) im Betrachtungszeitraum von 900 s .....	30
Abbildung B1.12	Verlauf der Fluidtemperatur in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (mit Schlauchheizung) im Betrachtungszeitraum von 900 s....	30
Abbildung B1.13	Schema der Wärmebilanz für die Grundplatte (Segment 0) im Sensormodul Wöhler SM 500 .....	31
Abbildung B1.14	Verlauf der Fluidtemperatur in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (mit Schlauchheizung) für Luft und Abgas im Zeitintervall Sekunde 300 bis 360 .....	34
Abbildung B1.15	Verlauf der Wandtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (mit Schlauchheizung) für die Medien Luft und Abgas im Zeitintervall Sekunde 300 bis 360 .....	35
Abbildung B1.16	Simulierter Temperaturverlauf der Wandtemperatur bei Änderung der Gaszusammensetzung in dem Zeitintervall Sekunde 900 bis 960 .....	36
Abbildung B1.17	Differenz der Wandtemperatur vom Resonanzröhrchen bei Änderung der Gaszusammensetzung im Zeitintervall Sekunde 300 bis 360 und 900 bis 960 .....	36
Abbildung B1.18	Zeitliche Änderung der Wandtemperatur bei Änderung der Gaszusammensetzung im Zeitintervall Sekunde 900 bis 960.....	37
Abbildung B1.19	Segment des Resonanzröhrchens mit der größten zeitliche Änderung der Wandtemperatur bei Änderung der Gaszusammensetzung in den Zeitintervallen Sekunde 360 - 900 und 900 - 960 .....	38
Abbildung B1.20	Aufbau des CFD-Modells für den Staubmassensensor des Wöhler SM 500 mit Ringheizung zur Verkürzung der Stabilisierungszeit.....	39
Abbildung B1.21	Gemessener und simulierter Temperaturverlauf mit Ringheizung für die Messstelle Resonanzrohr $T_r$ mit Schlauchheizung.....	40
Abbildung B1.22	Verlauf der Wandtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres mit Ringheizung im Betrachtungszeitraum von 1.860 s.....	41
Abbildung B1.23	Verlauf der Fluidtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres mit Ringheizung im Betrachtungszeitraum von 1.860 s.....	42
Abbildung B2.1	Prototyp SM 700 Nr.3-V1: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmeverluststrom: 2,5 bis 7,0 NI/min) .....	44
Abbildung B2.2	Prototyp SM 700 Nr.3-V2: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmeverluststrom: 3,0 bis 7,0 NI/min) .....	45
Abbildung B2.3	Prototyp SM 700 Nr.3-V3: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmeverluststrom: 4,5 NI/min).....	46
Abbildung B2.4	Prototyp SM 700 Nr.3-V3: Staubmassenverlauf mit Raumluft bei unterschiedlichen Probenahmeverlustströmen (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C) .....	47
Abbildung B2.5	Prototyp SM 700 Nr.3-V3: Staubmassenverlauf mit Raumluft bei unterschiedlichen Schlauchtemperaturen (Messdauer 15 Minuten, Sollwert Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmeverluststrom: 4,5 NI/min).....	48

Abbildung B2.6	Prototyp SM 700 Nr.3-V4: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmeverluststrom: 4,5 NI/min).....	49
Abbildung B2.7	Prototyp SM 700 Nr.3-V5: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmeverluststrom: 4,5 NI/min).....	50
Abbildung B2.8	Mittelwerte der mit Raumluft gemessenen Staubmassenverläufe für Prototypen SM 700 Nr.3-V1 bis V5 (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmeverluststrom: 4,5 NI/min) .....	51
Abbildung B2.9	Realgasmessungen am Hackgutkessel: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V3 bei unterschiedlichen Probenahmeverlustströmen im Vergleich zum SM 500 Nr. 1018 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Holzpellets mit geringem Anteil an Strohpellets).....	53
Abbildung B2.10	Realgasmessungen am Hackgutkessel: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V3 bei unterschiedlichen Brennstoffen im Vergleich zum SM 500 Nr. 1018 (15-Minuten-Mittelwerte, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmeverluststrom: 4,5 NI/min).....	54
Abbildung B2.11	Realgasmessungen am Hackgutkessel: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V5, SM 500 Nr. 1018 und Nr. 839 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Hackschnitzel aus Nadelholz und Rinde) .....	54
Abbildung B2.12	Versuchsstand schematisch mit Höhenangaben für die Messungen an Kaminöfen mit Elektrofilter.....	55
Abbildung B2.13	Realgasmessungen am Kaminofen I - Rohgas: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V5 und SM 500 Nr. 839 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Buchenholzscheite).....	56
Abbildung B2.14	Realgasmessungen am Kaminofen I - Reingas: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 1-V5 und SM 500 Nr. 1018 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Buchenholzscheite).....	57
Abbildung B2.15	Realgasmessungen am Kaminofen I - Reingas-Messstelle.....	58
Abbildung B2.16	Realgasmessungen am Kaminofen II - Rohgas: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V5 und SM 500 Nr. 839 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Buchenholzscheite).....	59
Abbildung B2.17	Realgasmessungen am Kaminofen II - Reingas: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 1-V5 und SM 500 Nr. 1018 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Buchenholzscheite).....	59
Abbildung B2.18	Verläufe der Staubmassen beim SM 500 in Abhängigkeit der O <sub>2</sub> -Konzentration im Abgas (Rostfeuerung mit Elektrofilter, Brennstoff: Hackschnitzel).....	61
Abbildung B2.19	Verlauf der Staubmassen beim SM 500 und SM 700 in Abhängigkeit der O <sub>2</sub> -Konzentration im Abgas bei Realgasmessungen am Hackgutkessel (Brennstoff: Holzpellets mit geringen Anteilen von Strohpellets).....	62
Abbildung B3.1	Staubablagerungen bei unterschiedlichen Sondenformen bei Beaufschlagung größerem Teststaub (links: Sonde mit Einlaufbogen, rechts: Sonde mit geradem Sondenrohr).....	67

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Bekanntgabe Messgerät Wöhler SM 500 - erweiterte Messunsicherheiten in Abhängigkeit des Grenzwertes [4].....	3
Tabelle A1.1	Zeitplan über Arbeitsschritte .....	5
Tabelle A5.1	Übersicht über Transport- und Abscheidemechanismen und ihre Einflussgrößen, unterteilt in konstruktiv beeinflussbare und nicht beeinflussbare Faktoren [10], [11], [12], [13], [14] .....	14
Tabelle B1.1	Simulationsrechnungen mit typischer Abgaszusammensetzung für Biomassekessel.....	33
Tabelle B1.2	Berechnete Zeitintervalle, Zeitschritte und Gastemperatur $T_s$ (Eingang Segment 0) mit spezifischer Wärmekapazität von Luft $c_{p,L}$ und Abgas $c_{p,Abg}$ (Zusammensetzung siehe Tabelle B1.1).....	33
Tabelle B1.3	Übersicht der Änderungen in der Simulation zur Verkürzung der Stabilisierungszeit.....	40
Tabelle B2.1	Mittel-, Maximal- und Minimalwerte sowie Bandbreiten für die durchgeführten Versuche mit den Geräteversionen V1 bis V5 des Wöhler SM 700 (Nr. 3) und des SM 500 (Nr. 1018) (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmestrom: 4,5 NI/min) .....	52
Tabelle B2.2	Mittelwerte der Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas bei den Kaminofen-Messungen sowie mittlere Messwertabweichungen (Messdauer 15 Minuten, Brennstoff: Buchenholzscheite).....	60

## Kurzfassung

Im Rahmen abgeschlossener DBU-Projekte wurde ein neuartiges Online-Messverfahren für die Überwachung der Emissionsanforderungen für Staub und CO von nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV entwickelt. Mit dem marktfähigen Messgerät Wöhler SM 500 können seither alle im Rahmen der 1. BImSchV vorgesehenen Überwachungsmessungen durchgeführt werden.

In diesem neuen Vorhaben soll der Einsatzbereich des Messgerätes über die Überwachungsmessungen der 1. BImSchV hinaus erweitert und ein neues Online-Messgerät entwickelt werden. Hierdurch ergeben sich höhere Anforderungen an das Messgerät, die sowohl die Bandbreite des möglichen Einsatzes, der Einsatzbedingungen und der Messgenauigkeit betreffen. Grundvoraussetzung um dies zu erreichen ist die Entwicklung eines neuen Korrekturmodells zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls des Resonanzsystems.

In aufwendiger Grundlagen- und Detailarbeit wurde ein neues Korrekturmodell entwickelt und so weit verbessert, dass mit dem aktuellen Prototyp des Online-Messgerätes ein im Labor und an Realgasen einsatzfähiges Messgerät zur Verfügung steht, welches die Anforderungen an die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit für Überwachungsmessungen nach 1. BImSchV erfüllt. Durch weitere Änderungen (z.B. Einsatz einer stärkeren Pumpe) kann der Einsatzbereich dieses neuen Messgerätes auch erweitert werden, da eine zuverlässige Erfassung von Staubkonzentrationen von unter  $10 \text{ mg/m}^3$  möglich wird.

Zur Unterstützung der Entwicklungsarbeiten am Korrekturmodell wurden auch detaillierte Simulationsrechnungen zur zeitlichen Temperaturverteilung im Sensorgehäuse durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Rechnungen bestätigten die Vermutung, dass Änderungen im Temperaturverlauf des Resonanzröhrchens, z.B. während der Stabilisierungsphase des Messgerätes oder bei Änderungen der Wärmekapazität vom Probengas, zu verstärkten Gerätedriften aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls des Resonanzsystems führen.

Durch umfangreiche Labor- und Realgasmessungen an verschiedenen Feuerungsanlagen, die mit unterschiedlichen Brennstoffen betrieben wurden, konnte die Weiterentwicklung der verschiedenen Prototypen unterstützt und die Einsatzfähigkeit und Eignung des neuen Messgerätes aufgezeigt werden.

Anhand theoretischer Betrachtungen und Berechnungen sowie mittels Labor- und Realgasmessungen wurde die Partikelabscheidung in der Probenahmeverrichtung insgesamt und deren einzelnen Mechanismen untersucht und bewertet. Hierbei zeigte sich, dass bei hohen Anforderungen an die Messgenauigkeit und an die Reproduzierbarkeit des Messverfahrens, bei gleichzeitig niedrigen Staubkonzentrationen und einer großen Bandbreite an Staubeigenschaften, auf die Erfassung der in der Probenahmeverrichtung abgelagerten Stäube nicht verzichtet werden kann. Allein durch konstruktive Maßnahmen lassen sich die Staubablagerungen nicht im notwendigen Umfang reduzieren.



## Einleitung

Im Rahmen abgeschlossener DBU-Projekte („Entwicklung eines Feinstaubmessgerätes für Überwachungsmessungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV (Az 27741)“ und „Weiterentwicklung des Online-Staubmessgerätes SM 500 für Langzeitmessungen und zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung (Az 30739)“) wurde ein neuartiges Online-Messverfahren für die Überwachung der Emissionsanforderungen für Staub und CO von nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV entwickelt. Mit dem entwickelten Messgerät Wöhler SM 500 konnte die Eignungsprüfung nach VDI 4206 Blatt 2, als Voraussetzung für den Einsatz als Überwachungsmessgerät, erfolgreich absolviert werden. Die letzte Bekanntgabe des Messgerätes im Bundesanzeiger erfolgte im Jahr 2015. Mit dem Wöhler SM 500 dürfen seither alle im Rahmen der 1. BImSchV vorgesehenen Überwachungsmessungen durchgeführt werden.

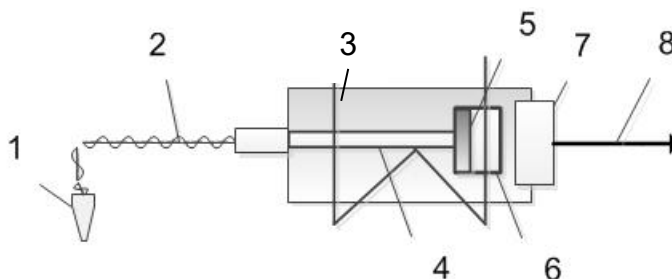
Im Rahmen des neuen Vorhabens soll der Einsatzbereich des Messgerätes über die Überwachungsmessungen der 1. BImSchV hinaus erweitert werden. Hierzu soll ein neues Online-Messgerät entwickelt werden, das auch für Messaufgaben im Geltungsbereich der TA-Luft, der 13. und der 17. BImSchV eingesetzt werden kann. Hierdurch ergeben sich höhere Anforderungen an das neue Messgerät, die sowohl die Bandbreite des möglichen Einsatzes (unterschiedlichste Anlagen mit breiter Variabilität der Staubeigenschaften sowie Strömungsgeschwindigkeiten und Temperaturen des Abgases), der Einsatzbedingungen (breites Spektrum an Umgebungsbedingungen der Probenahmestelle, wie z.B. erhöhte Temperaturen, Messstelle liegt im Freien, Schwingungen und Erschütterungen) und der Messgenauigkeit (oft geringere Staubkonzentrationen im Abgas durch Einsatz von Staubabscheidern) betreffen. Letztlich handelt es sich um einen anspruchsvolleren Einsatzbereich für das neue Staubmessgerät, dessen Eignung hierfür auch im Vergleich zum Standardreferenzmessverfahren nach VDI 2066 Blatt 1 nachzuweisen ist. Durch den Nachweis der Gleichwertigkeit des neuen Staubmessgerätes mit dem Standardreferenzmessverfahren könnten sich durch das Online-Messprinzip völlig neue Einsatzbereiche ergeben.

Um die Gleichwertigkeit mit dem Standardreferenzverfahren für möglichst viele Messaufgaben zu erreichen, muss mit dem neuen Messgerät eine isokinetische Probenahme möglich sein und eine hohe Messgenauigkeit erreicht werden. Grundvoraussetzung hierzu ist die Entwicklung eines neuen Korrekturmodells zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls des Resonanzsystems. Zur Reduzierung der Messunsicherheit sind außerdem Maßnahmen zur Minimierung der Staubablagerungen in der Probenahmeverrichtung und ggf. die Entwicklung eines praktikablen Spülverfahrens zur Erfassung der abgelagerten Partikel notwendig. Darüber hinaus sind weitere Anpassungen zur Umsetzung der isokinetischen Probenahme und zur Erweiterung des Einsatzbereiches an den unterschiedlichsten Anlagen, wie z.B. eine stärkere Probenahmepumpe und unterschiedliche Düsendurchmesser und Sondenlängen, notwendig.

## Ausgangssituation

Im Rahmen der abgeschlossenen DBU-Projekte „Entwicklung eines Feinstaubmessgerätes für Überwachungsmessungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV (Az. 27741)“ [1] und „Weiterentwicklung des Online-Staubmessgerätes SM 500 für Langzeitmessungen und zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung (Az. 30739)“ [2] wurde das Messgerät Wöhler SM 500 für die Überwachung der Emissionsanforderungen (Staub und CO) für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV [3] entwickelt. Mit diesem Messgerät konnte die Eignungsprüfung nach VDI 4206 Blatt 2 [4] als Voraussetzung für den Einsatz als Überwachungsmessgerät, erfolgreich absolviert werden. Entsprechende Bekanntgaben erfolgten im Bundesanzeiger in den Jahren 2012 und 2015.

Die Staubmassenbestimmung mit dem Wöhler SM 500 erfolgt anhand einer Frequenzmessung. Hierzu wird ein Schwingröhrchen, auf dem sich eine mit Filtermaterial bestückte Filterpatrone befindet, elektromechanisch angeregt. In Abhängigkeit des zu überwachenden Grenzwertes (0,02 oder > 0,06 g/m<sup>3</sup> bei 13 Vol% O<sub>2</sub>) strömt ein Abgasvolumenstrom von 3 l/min i.N. oder 4,5 l/min i.N. durch das Filtermaterial. Durch die Ablagerung der Staubmasse im Filtermaterial verstimmt sich das elektromagnetische Schwingssystem, die Frequenz des Schwingröhrchens verringert sich. Aus der sich ergebenden Frequenzänderung lässt sich die Staubmasse des sich im Filtermaterial ablagernden Staubes berechnen. Das abgesaugte Abgasvolumen wird gemessen und ist somit bekannt, die Staubkonzentration in g/m<sup>3</sup> i.N. kann ermittelt werden. Bei diesem Verfahren handelt es sich um ein direktes, kontinuierliches Messverfahren. In Abbildung 1 ist das Wöhler SM 500 schematisch dargestellt [1] [2].



- |                              |                                    |
|------------------------------|------------------------------------|
| 1 Entnahmesonde              | 5 Filterhalter                     |
| 2 beheizte Probenahmeleitung | 6 Filterpatrone                    |
| 3 beheiztes Gehäuse          | 7 Verschlussdeckel                 |
| 4 Schwingröhrchen            | 8 Verbindung zur Absaugvorrichtung |

**Abbildung 1** Schematische Darstellung des Wöhler SM 500

Über die Entnahmesonde (1) und die beheizte Probenahmeleitung (2) wird das Abgas dem Schwingssystem zugeführt. Der Düsendurchmesser der Entnahmesonde beträgt standardmäßig 10 mm. Das Schwingssystem ist in einem beheizten Gehäuse (3) untergebracht und besteht aus dem Schwingröhrchen (4), dem Filterhalter (5) und einer mit Filtermaterial bestückten Filterpatrone (6). Das Schwingröhrchen dient gleichzeitig zur Abgaszuführung. Um die Bildung



von Kondensat in der Probenahmeleitung und im Schwingsystem zu vermeiden, werden sowohl die Probenahmeleitung (2) als auch das Gehäuse beheizt. Die Probenahmeleitung wird kontinuierlich auf eine konstante Temperatur von 75°C eingeregelt. Das Gehäuse wird vor Messbeginn durch einen Heizimpuls aufgeheizt. Während der Messung wird kein weiterer Heizimpuls mehr zugeführt. Die Gehäusetemperatur, und damit auch die Materialtemperatur des Schwingröhrchens, nehmen während der Messung ab [1] [2].

Die aktuellste Bekanntmachung des Umweltbundesamtes für das Messgerät erfolgte im Bundesanzeiger am 26.8.2015 [5] mit den in Tabelle 1 aufgeführten erweiterten Messunsicherheiten in Abhängigkeit der zu überwachenden Grenzwerten. Die Messunsicherheiten wurden im Rahmen der Eignungsprüfung nach VDI 4206 Blatt 2 [3] ermittelt, wobei hier eine Mindestanforderung von 40 % festgelegt ist. Das Messgerät Wöhler SM 500 ist für alle Überwachungsmessungen (CO und Staub) im Rahmen der 1. BImSchV [5] geeignet und kann somit uneingeschränkt zur Grenzwertüberwachung eingesetzt werden.

**Tabelle 1**      **Bekanntgabe Messgerät Wöhler SM 500 - erweiterte Messunsicherheiten in Abhängigkeit des Grenzwertes [4]**

Grenzwert in g/m <sup>3</sup> *	erweiterte Messunsicherheit in %
0,02	32
0,06	34
0,09	33
0,10	30
0,15	25

\* bezogen auf bei 13 Vol% O<sub>2</sub>

Ziel des Projektes war, auf Basis des Wöhler SM 500 ein neues mobiles Online-Staubmessgerät zu entwickeln, welches für einen bestimmten Anwendungsbereich als gleichwertig mit dem Standardreferenzmessverfahren für Staub nach VDI 2066 Blatt 1 [6] angesehen werden kann, um künftig u.a. für Überwachungsaufgaben im Bereich genehmigungspflichtiger Anlagen eingesetzt werden zu können. Hierzu müssen verfahrenstechnische Optimierungsmaßnahmen durchgeführt und das vorhandene Staubmessgerät in wesentlichen Punkten, wie z.B. Implementierung einer isokinetischen Probenahme, Minimierung von Ablagerungen in der Probenahmeverrichtung und Verringerung der Messunsicherheit, weiterentwickelt werden.

Nach derzeitigem Stand der Technik existiert kein kostengünstiges, mobiles mit dem Standardreferenzverfahren gleichwertiges Verfahren, mit welchem auch ein zeitlicher Verlauf der Staubmassenkonzentration dargestellt werden kann. Neben der Gesamtstaubkonzentration als Endergebnis kann der zeitliche Verlauf der Staubkonzentration bei Entwicklungs-, Optimierungs-, Wartungs- und Einstellarbeiten an Feuerungs- und Produktionsanlagen und an Staubabscheidern wichtige Informationen für den emissionsarmen Betrieb der Anlagen liefern. Ist ein kostengünstiges, leicht handhabbares und Online-Messverfahren verfügbar, erschließen sich auch neue Anwendungen im Bereich der gewerblichen und industriellen Anlagen.

Die Projektbearbeitung wurde in die Arbeitspakete Implementierung der isokinetischen Probenahme (AP 1), Minimierung der Staubablagerungen (AP 2), Anpassungen zur Umsetzung der isokinetischen Probenahme (AP 3) und Bewertung des Entwicklungsstandes (AP 4) untergliedert.

Der wesentliche Entwicklungsschritt und die Grundvoraussetzung für das neue Online-Messverfahren ist in der Entwicklung eines neuen Korrekturmodells zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des E-Moduls des Resonanzsystems im AP 1 zu sehen. Einerseits wird hierdurch die isokinetische Probenahme durch variable Probevolumenströme überhaupt erst ermöglicht und andererseits wird eine wichtige Voraussetzung geschaffen, damit die Messgenauigkeit im Bereich geringerer Staubkonzentrationen merklich erhöht werden kann.

Zum besseren Verständnis der thermischen Zustände im Sensorgehäuse und als Basis für konstruktive Änderungen sollten im AP 1 außerdem Berechnungen zur Simulation der zeitlichen Temperaturverteilung während eines Betriebszyklus des Messgerätes durchgeführt werden. Betrachtet werden sollte hier vor allem die Temperaturverteilung im Sensorgehäuse während der Aufheizphase, bei den quasistationären Bedingungen der Messphase und bei Änderungen der Probengaszusammensetzung.

Um in AP 2 zu untersuchen, durch welche Maßnahmen eine Minimierung der Staubablagerungen in der Probenahmeverrichtung erreicht werden könnte, wurden sowohl die Strömungsverhältnisse und die Partikelflugbahnen in bestimmten Bereichen der Probenahmeverrichtung berechnet als auch Auswertungen bisheriger Arbeiten auf diesem Gebiet und eigenen Berechnungen zur Simulation des Sedimentationsverhaltens vorgenommen.

Die Arbeitspakete mit den Unterpunkten wurden von beiden Projektpartnern entsprechend dem Arbeitsfortschritt mehr oder weniger parallel bearbeitet. Die Entwicklung des Korrekturmodells wurde in mehreren Entwicklungsschleifen vorgenommen. Nachdem eine erste voll funktionsfähige Geräteversion vorlag, wurden Labor- und Realgasmessungen durchgeführt und auf Basis der Versuchsergebnisse weitere Verbesserungen vorgenommen. Trotz der inhaltlichen Verzahnung werden im Folgenden die von beiden Projektpartnern durchgeführten Arbeiten getrennt mit Querverweisen beschrieben.

Aufgrund der Komplexität und der erforderlichen Tiefe der Arbeiten zur Entwicklung der Driftkorrektur und der dadurch notwendigen Entwicklungsschleifen wurde für diesen wesentlichen Entwicklungsschritt ein Großteil der personellen Kapazitäten im Projekt benötigt, weshalb nicht alle geplanten Arbeitspunkte im vorgesehenen Umfang bearbeitet werden konnten. Dies betrifft vor allem die Umsetzung der Maßnahmen zur Minimierung der Staubablagerungen und weitere Anpassungen beim Messsystem um eine isokinetische Probenahme vollumfänglich umzusetzen. Beim derzeitigen Entwicklungsstand des mobilen Online-Messgerätes konnte deshalb auch die Gleichwertigkeit der Neuentwicklung mit dem Standardreferenzmessverfahren für Staub noch nicht erbracht werden. Allerdings konnten wesentliche Verbesserungen gegenüber der Ausgangsversion vom Staubmessgerät Wöhler SM 500 erreicht werden.

## Teil A: Entwicklung des mobilen Online-Staubmessgerätes für den Anwendungsbereich genehmigungsbedürftiger Anlagen

### A1 Arbeitsschritte - AP

Um das Projektziel zu erreichen, sind fünf Arbeitspakete inklusive des Endberichts definiert worden. Tabelle A1.1 zeigt die Übersicht der einzelnen Arbeitspakete sowie den Zeitplan zur Erreichung dieser.

**Tabelle A1.1 Zeitplan über Arbeitsschritte**

Arbeitspakete	1. Jahr												2. Jahr											
AP 1 - Implementierung isokinetische Probenahme	█												█											
AP 2 - Minimierung der Staubablagerungen	█												█											
AP 3 - weitere Anpassung am neuen Staubmessgerät	█												█											
AP 4 - Zusammenfassende Bewertung der Neuentwicklung	█												█											
AP 5 - Endbericht	█												█											

Das Arbeitspaket AP 1, Implementierung der isokinetischen Probenahme, stellt den zentralen Arbeitsschritt der Projektbearbeitung dar. Der enorme Umfang sowie das komplett neue Korrekturmodell stellen den Schwerpunkt dar. Die weiteren Arbeitspakete Minimierung der Staubablagerungen (AP 2) und Anpassungen zur Umsetzung der isokinetischen Probenahme (AP 3) wurden in geringeren Umfang im Rahmen des Projekts bearbeitet. Daher konnten auch die geplanten Messungen an der Emissionssimulationsanlage nicht durchgeführt werden.

#### AP 1 Implementierung der isokinetischen Probenahme

Mit der Implementierung der isokinetischen Probenahme soll eine repräsentative, dem Standardreferenzverfahren entsprechende Probenahme, der im Abgas vorliegenden Partikel gewährleistet werden. Grundvoraussetzung hierzu ist die Entwicklung eines neuen Korrekturmodells zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des E-Moduls des Resonanzsystems, um variable Probevolumenströme und damit eine isokinetische Probenahme für die erweiterten Anwendungen zu ermöglichen. Die Messgenauigkeit im Bereich geringerer Staubkonzentrationen nach VDI-Richtlinie 2066 muss erhöht werden, um eine Vergleichbarkeit mit dem Standardreferenzverfahren im gesamten relevanten Konzentrationsbereich zu erreichen.

Um das neue Korrekturmodell zu entwickeln, sind einerseits weitere Berechnungen der zeitlichen Temperaturverteilung im Sensorgehäuse notwendig, um ggf. durch konstruktive Änderungen (Materialwahl, Beschichtungen von Bauteilen zur erhöhten Wärmeaufnahme, Änderungen der Geometrie) stabilere Verhältnisse im Sensorgehäuse / am Wiegemodul zu erreichen. Durch Messungen im Labor (Driftmessungen), an Feuerungsanlagen und ggf. an der Emissionssimulationsanlage ist der Nachweis zu erbringen, dass die Messgenauigkeit des Systems soweit erhöht wurde, dass eine Vergleichbarkeit mit dem Standardreferenzverfahren vorliegt.

## **AP 2 Minimierung der Staubablagerungen**

Umsetzung von Maßnahmen zur Minimierung der Staubablagerungen in der Probenahmeverrichtung, unabhängig von den im Abgas auftretenden Partikelgrößen und Eigenschaften, oder ggf. Entwicklung eines praktikablen Spülverfahrens zur Erfassung der abgelagerten Partikel. Zur Entwicklung von Lösungsansätzen sollen zum einen die Ablagerungsmechanismen untersucht (Auswertung bisheriger Arbeiten auf diesem Gebiet, eigene Laboruntersuchungen) und die Strömungsverhältnisse und Partikelflugbahnen in bestimmten Bereichen der Probenahmeverrichtung (z.B. Übergang Trichtereingang auf Sondenrohr) berechnet werden. Des Weiteren sind Untersuchungen an Feuerungsanlagen und ggf. an der Emissionssimulationsanlage notwendig, um die theoretischen Erkenntnisse bzw. die Simulationsergebnisse zu verifizieren. Sollte ein konstruktiver Lösungsansatz (z.B. geänderte Geometrie im Düsenbereich) nicht ausreichen, um die Vergleichbarkeit mit dem Standardreferenzverfahren zu erreichen, soll eine Art Spülverfahren entwickelt werden, um die Staubmassenverluste durch Sedimentation und Anlagerungen in der Probenahmeverrichtung zu erfassen. Das Spülverfahren muss in der Praxis leicht anwendbar, praktikabel und im Endergebnis sofort verfügbar sein, damit die Vorteile des gesamten Messverfahrens (kostengünstig, einfache Anwendung, Ergebnisse liegen sofort vor) erhalten bleiben.

## **AP 3 Anpassungen zur Umsetzung der isokinetischen Probenahme**

Neben den bereits beschriebenen Arbeiten sind weitere Anpassungen zur Umsetzung der isokinetischen Probenahme am neuen Online-Staubmessgerät notwendig. So ist z.B. das Messgerät mit einem Regelalgorithmus für die Messgaspumpe, ggf. einer stärkeren Pumpe und einer erweiterten bzw. neuen Entnahmesonde auszurüsten, mit welcher die Abgastemperatur, die Abgasfeuchte, der Druck im Abgas sowie die Abgasgeschwindigkeit kontinuierlich erfasst werden kann. Neben der Entnahmesonde sind dann entsprechende Sensoren zur Messung der neuen Messgrößen im System zu realisieren. Die Eignung dieses Probenahmesystems muss dann durch Messungen nachgewiesen werden. Bestandteil des neuen isokinetischen Probenahmesystems sind außerdem wechselbare Düsenvorsätze für die Staubenentnahmesonde und Sonden unterschiedlicher Länge, damit diese an die größere Bandbreite der Abgasleitungen und Abgaskanäle angepasste werden kann und damit auch Netzmessungen durchgeführt werden können.

## **AP 4 Zusammenfassende Bewertung der Neuentwicklung**

Zusammenfassende Bewertung des Entwicklungsstandes des neuen Online-Staubmessgerätes am Projektende, vor allem in Bezug zur Vergleichbarkeit mit Standardreferenzverfahren.

## A2 Stand der Technik

In den letzten Jahren wurden erhebliche Fortschritte in der Partikelmessstechnik gemacht. Dies betrifft vor allem die Umsetzung von Forschungsergebnissen in praktikable Messgeräte. So werden derzeit für Überwachungsaufgaben im Emissions- bzw. Immissionsbereich Messverfahren nach dem gravimetrischen, optischen, radiometrischen Prinzip und auf Basis des Schwingquarzes eingesetzt. Darüber hinaus gibt es weitere Partikelmessverfahren, die vor allem im Bereich von Forschung und Entwicklung eingesetzt werden. Hierzu gehören gravimetrische (Kaskadenimpaktoren), aerodynamische (Relaxationszeitspektrometer), optische (optischer Partikelzähler, Drei-Wellenlängen-Extinktionsmessung), elektrische (Scanning oder Differential Mobility Particle Sizer) sowie kombinierte Verfahren (z.B. Electrical Low Pressure Impactor, Condensation Particle Counter).

Sowohl emissions- als auch immissionsseitig werden gravimetrische Messverfahren als Standardmethoden zur Bestimmung der Partikelkonzentrationen und zur Kalibrierung nicht-gravimetrischer Messverfahren verwendet. Bei gravimetrischen Partikelmessverfahren wird eine über die Probenahmedauer ermittelte mittlere Partikelmassenkonzentration berechnet, wobei ggf. aufwändige Netzmessungen notwendig sind. Nach derzeitigem Stand der Technik liegen jedoch im Überwachungsbereich genehmigungspflichtiger Anlagen bisher keinerlei Informationen über den zeitlichen Verlauf vor. Bei dem neuen Messgerät würde es sich um ein direkt-gravimetrisches Messverfahren handeln, wobei auch Informationen über den zeitlichen Verlauf vorliegen würden.

Das Wöhler SM 500 ist ein direktgravimetrisches und quasikontinuierliches Staubmessgerät, welches zur Überwachung von Feinstaub- und Kohlenstoffmonoxidemissionen von Kleinfeuerungsanlagen nach der 1. BImSchV entwickelt wurde. In Abbildung A2.1 ist der Aufbau des Wöhler SM 500 zu sehen.

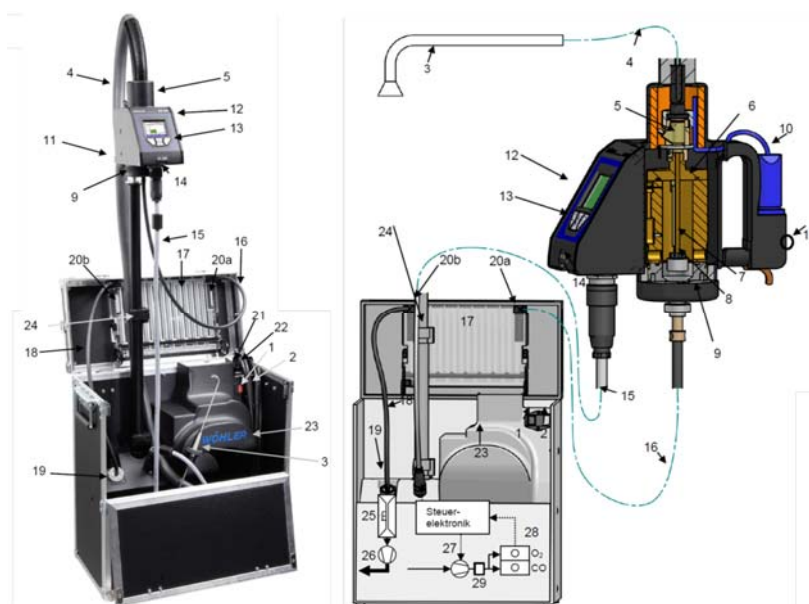
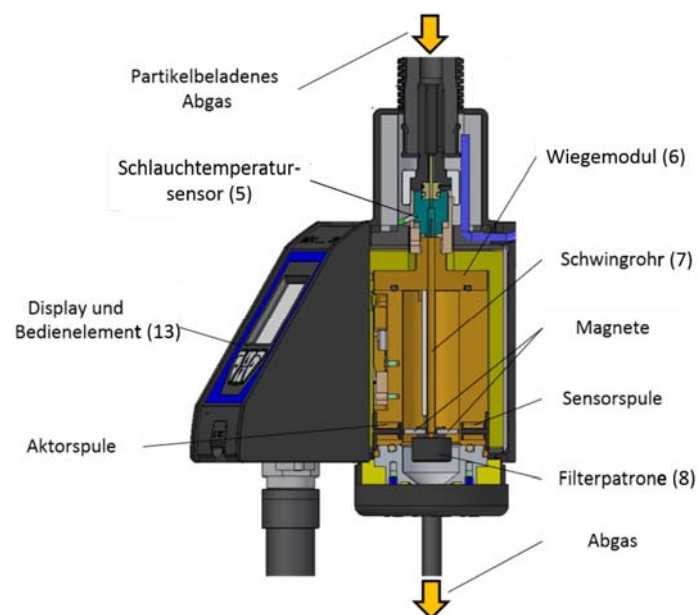


Abbildung A2.1 Schematische Darstellung des Wöhler SM 500 Staubmessgerät  
 Wöhler SM 500 (links), Gas- und Signalskizze (rechts)

Über die Staubentnahmesonde (3) und einen beheizten Schlauch (4) wird das Abgas in das Wiegemodul (6) geleitet. Ein Schlauchtemperatursensor (5) für die Regelung der Schlauchtemperatur befindet sich am Eingang zum Wiegemodul.

Der detaillierte Aufbau des Wiegemoduls ist in Abbildung A2.2 zu sehen. Das Abgas durchströmt ein dünnwandiges Schwingrohr (7), an dessen Ende sich die Filterpatrone (8) befindet. In dem Filter scheiden sich die Partikel ab. Oberhalb der Filterpatrone sind am Schwingrohr Permanentmagnete befestigt. Gegenüber der Magnete befinden sich Spulen im Gehäuse. Mit der Aktorspule und dem Magneten wird das Pendel in Schwingung versetzt. Auf der Gegenseite befindet sich die Sensorspule, über die die Bewegung des Pendels und die Schwingfrequenz aufgenommen werden. Über die Frequenzänderung dieses Federpendels kann die Partikelmasse gemessen werden. Nach dem Passieren des Wiegemoduls wird das Abgas durch einen Abgaskondensator (17) geleitet. Er dient zum Ausscheiden der Kondensattröpfchen durch Taupunktunterschreitung. Über die Absaugeinheit (25, 26) im Koffer wird ein konstanter Volumenstrom eingestellt. Durch die Messung und Aufintegration des Gasvolumenstroms und die Bestimmung der Partikelmasse kann die Partikelmassenkonzentration ermittelt werden. Ein Teil des Abgases wird über eine Membranpumpe (27) der Gasanalyse mit den Gassensoren (28) zugeführt.



**Abbildung A2.2 Querschnitt des Wiegemoduls des Wöhler SM 500**

Das Ziel des Projektes war, auf Basis des Wöhler SM 500 ein neues mobiles Online-Staubmessgerät zu entwickeln, welches als gleichwertig mit dem Standardreferenzmessverfahren für Staub nach VDI 2066 Blatt 1 [6] angesehen werden kann, um künftig u.a. für Überwachungsaufgaben im Bereich genehmigungspflichtiger Anlagen eingesetzt werden zu können. Hierzu müssen verfahrenstechnische Optimierungsmaßnahmen durchgeführt und das vorhandene Staubmessgerät in wesentlichen Punkten, wie z.B. Implementierung einer isokinetischen Probenahme, Minimierung von Ablagerungen in der Probenahmevorrichtung und Verringerung der Messunsicherheit, weiterentwickelt werden.

### A3 Anforderungen an das Online-Messgerät

Bei den Feuerungsanlagen für Biomasse und für andere feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV weist der wesentliche Partikelanteil einen Größenbereich  $< 1 \mu\text{m}$  auf. Für Partikel dieser Größe ist keine isokinetische Probenahme erforderlich, da diese kleinen Partikel der Gasströmung gut folgen können. Eine isokinetische Probenahme ist bei den Überwachungsmessungen nach 1. BImSchV daher nicht vorgeschrieben. Bei Staubmessungen nach der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 [6] müssen auch sehr viel größere Partikel korrekt erfasst werden, die kein gasförmiges Strömungsverhalten besitzen. Hier erfolgt die Probenahme daher stets isokinetisch, d.h. die Partikelgeschwindigkeit im Abgas entspricht auch der Geschwindigkeit am Eingang der Staubmesssonde. Durch die isokinetische Probenahme wird eine Fraktionierung der Partikel bereits bei der Probenahme verhindert. Um die Vergleichbarkeit mit dem Standardreferenzverfahren zu gewährleisten, muss daher mit dem neuen Online-Messgerät eine isokinetische Probenahme durchgeführt werden. Hierzu ist der abzusaugende Volumenstrom kontinuierlich auf die Bedingungen direkt an der Entnahmesonde im Abgas einzuregulieren.

Grundvoraussetzung um dies zu erreichen, ist die Entwicklung eines neuen Korrekturverfahrens zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des E-Modul des Schwingensystems, um den Einfluss der Änderung des Elastizitätsmoduls auf die gemessene Frequenz zu minimieren. Das bisherige thermische Korrekturmodell setzt einen während der Messung konstanten Gasvolumenstrom und damit auch stationäre Wärmeströme im Sensorgehäuse bzw. im Schwingröhrchen voraus. Diese kontinuierliche Änderung der Stoffwärmeübertragung während der Probenahme, z.B. durch Variation der Absauggeschwindigkeit, können vom Temperaturmodell des am Markt verfügbaren Wöhler SM 500 nicht korrekt berücksichtigt werden.

Da im neuen Staubmessgerät die Probenahme stets isokinetisch erfolgen soll, ist daher eine Anpassung des bisherigen Temperaturmodells unbedingt notwendig. Diese Maßnahme ist auch deshalb durchzuführen, da generell die Messgenauigkeit des neuen Staubmessgerätes, vor allem bei Staubkonzentrationen  $< 10 \text{ mg/m}^3$ , gegenüber dem Wöhler SM 500 erhöht werden muss, um eine Gleichwertigkeit mit dem Standardreferenzverfahren zu erreichen. Ein nun nicht mehr vernachlässigbarer Anteil an den bisherigen Messwertabweichungen zwischen dem Wöhler SM 500 und dem Standardreferenzverfahren wird durch eine nicht vollständige Kompensation des Temperatureinflusses auf den E-Modul des Schwingensystems verursacht.

Beim Standardreferenzverfahren wird eine Spülung der Probenahmeverrichtung mit Aceton und destilliertem Wasser vorgeschrieben, um Ablagerungen quantifizieren zu können. Um die Gleichwertigkeit des neuen Staubmessgerätes mit dem Standardreferenzmessverfahren nachweisen zu können und um in einem späteren Schritt die Partikelgrößenverteilung des Staubes sinnvoll messen zu können, müssen Ablagerungen in der Probenahmeleitung bei dieser Aufgabenstellung vermieden werden oder ggf. ein praktikables Spülverfahren in das Online-Messgerät integriert werden. Ein wichtiger Bestandteil des neuen Vorhabens ist es deshalb zu untersuchen, unter welchen Voraussetzungen mit erhöhten Staubablagerungen in der Probenahmeleitung zu rechnen ist und mit welchen konstruktiven Maßnahmen diese minimiert werden können. Hierzu sind sowohl Untersuchungen im Labor, an Feuerungsanlagen

als auch theoretische Betrachtungen (Klärung der Ablagerungsmechanismen, Berechnung der Strömungsverhältnisse in Teilen der Probenahmeverrichtung) notwendig.

Zur Umsetzung einer isokinetischen Probenahme im neuen Online-Staubmessgerät sind, neben der bereits beschriebenen Entwicklung eines neuen Korrekturverfahrens zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des E-Moduls, weitere Anpassungen notwendig. So sind z.B. die Abgasbedingungen kontinuierlich zu erfassen und die Pumpenleistung ist entsprechend den aktuellen Abgasbedingungen und der Filterbeladung zu regeln, um die isokinetischen Bedingungen zu jedem Zeitpunkt der Probenahme einzuhalten. Hierzu muss eine neue oder eine zusätzliche Entnahmesonde entwickelt werden, mit welcher die Abgastemperatur und der Druck im Abgas sowie die Abgasgeschwindigkeit kontinuierlich erfasst werden. Außerdem ist für das Staubmessgerät ein Regelalgorithmus für die Messgaspumpe zu entwickeln und muss ggf. mit einer stärkeren Pumpe versehen werden, wodurch weitere konstruktive Änderungen notwendig werden (z.B. Platzbedarf, Maßnahmen zur Pumpenkühlung, Dämpfung von Erschütterungen).

Aufgrund der Komplexität und des hohen Umfangs zur Entwicklung des Korrekturmodells konnten nicht alle geplanten Arbeitspunkte im vorgesehenen Umfang bearbeitet werden. Insbesondere die Umsetzung der Maßnahmen zur Minimierung der Staubablagerungen und weitere Anpassungen beim Messsystem um eine isokinetische Probenahme zu realisieren. Beim derzeitigen Entwicklungsstand des mobilen Online-Messgerätes konnte deshalb auch die Gleichwertigkeit der Neuentwicklung mit dem Standardreferenzmessverfahren für Staub noch nicht vollständig erbracht werden. Allerdings konnten wesentliche Verbesserungen gegenüber der Ausgangsversion vom Staubmessgerät Wöhler SM 500 erreicht werden.



### A4 Korrekturverfahren

Das neue Korrekturmodell wird zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Schwingensystems benötigt. Dabei soll der Einfluss der Änderung des Elastizitätsmoduls auf die detektierte Frequenz verringert werden. Weiterhin soll eine isokinetische Probenahme ermöglicht werden, um sich ändernde Strömungsgeschwindigkeiten und Wärmeströme im Korrekturmodell abzubilden. Das neue Korrekturmodell liefert ebenfalls eine Erhöhung der Messgenauigkeit, um Messungen nach VDI 2066 Blatt 1 [6] zu ermöglichen. Das neue Korrekturmodell soll weitestgehend unabhängig von Volumenstrom und thermischen Eigenschaften des Abgases sein.

Abbildung A4.1 zeigt das neue Korrekturmodell. Dabei wird die gemessene Staubmasse  $m_P$  mit der Korrektur soweit korrigiert, bis die Fehlersumme minimal wird. Die Korrekturparameter sind die gemessene Resonanzfrequenz  $f_m$ , der Volumenstrom  $\dot{V}$ , die Gehäusetemperatur  $T_G$  und die Heizschlauchttemperatur  $T_S$ . [7].

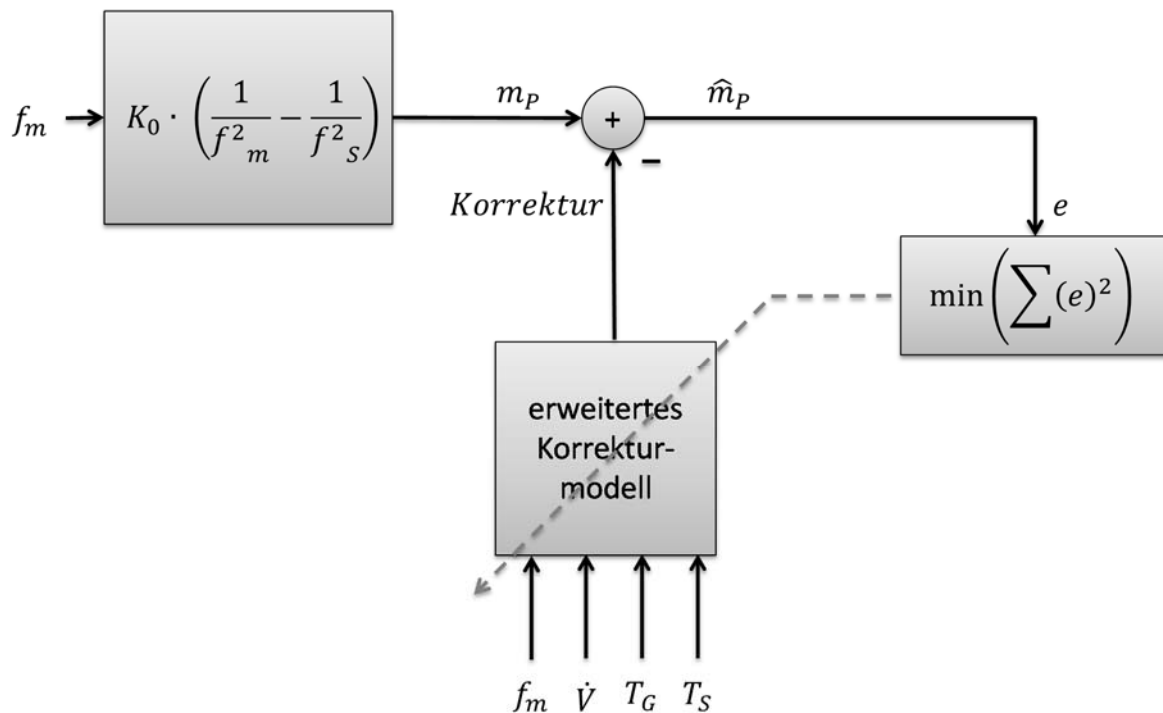


Abbildung A4.1 Korrekturmodell

Die Staubmasse berechnet sich mit einer Systemkonstanten  $K_0$ , der gemessenen Resonanzfrequenz  $f_m$  und der Frequenz zu Beginn der Messung  $f_s$  zu:

$$m_P = K_0 \cdot \left( \frac{1}{f_m^2} - \frac{1}{f_s^2} \right) \tag{Gl. A1}$$

Für weitere Untersuchungen im Labor und bei Realgasmessungen wurden die einzelnen Komponenten als auch der Regelalgorithmus in einen Prototyp implementiert. Abbildung A4.2 zeigt den ersten Prototyp mit Bedienpanel.



Abbildung A4.2 Gesamter Aufbau Prototyp

Mit dem neuen Prototyp wurden erste Labormessungen mit staubfreier Raumluft durchgeführt. Der Verlauf der geschätzten Partikelmasse  $\hat{m}_p$  ist in Abbildung A4.3 dargestellt und sollte möglichst Null sein, da es sich um eine Leermessung handelt. Die geschätzte Partikelmasse bleibt gerade innerhalb des geforderten Bereiches von  $\pm 0,2$  mg (schwarz gestrichelte Linien).

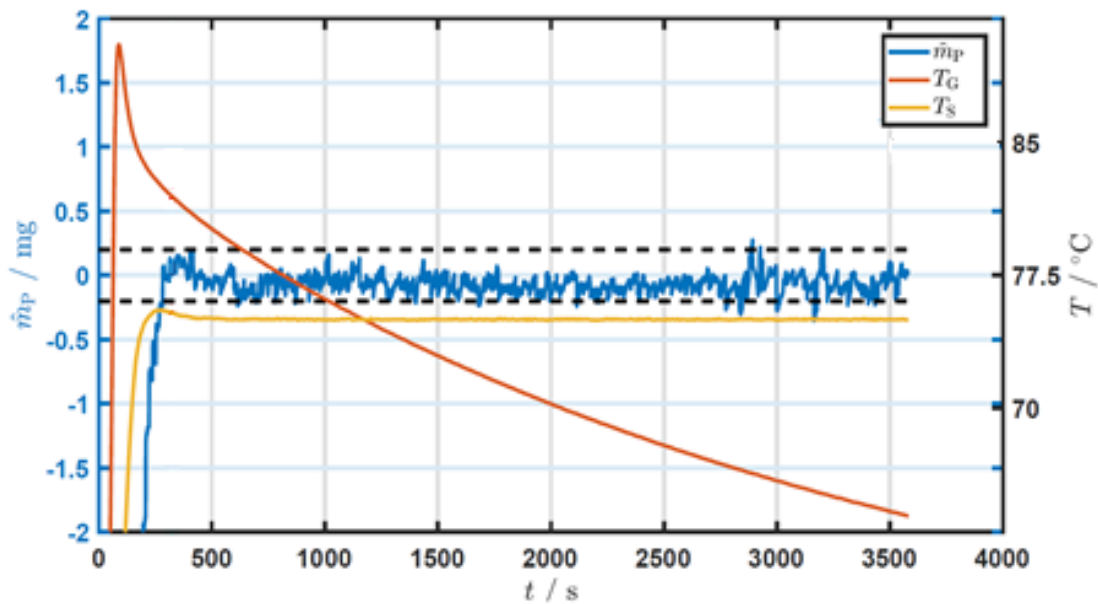
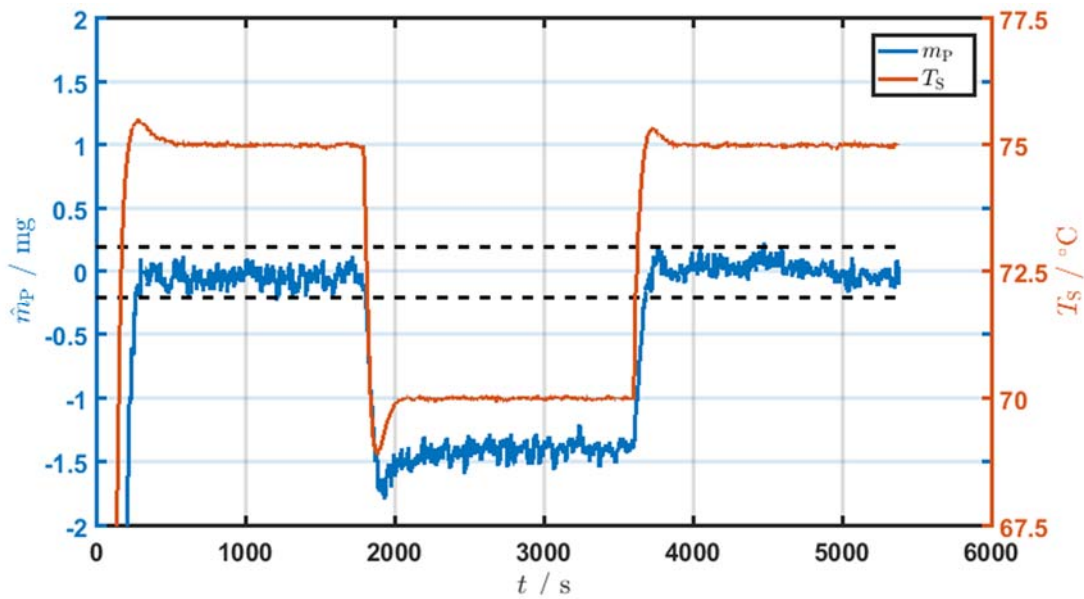


Abbildung A4.3 Verlauf der geschätzten Partikelmasse und der Temperaturen  $T_G$  und  $T_S$  nach der Optimierung [7]

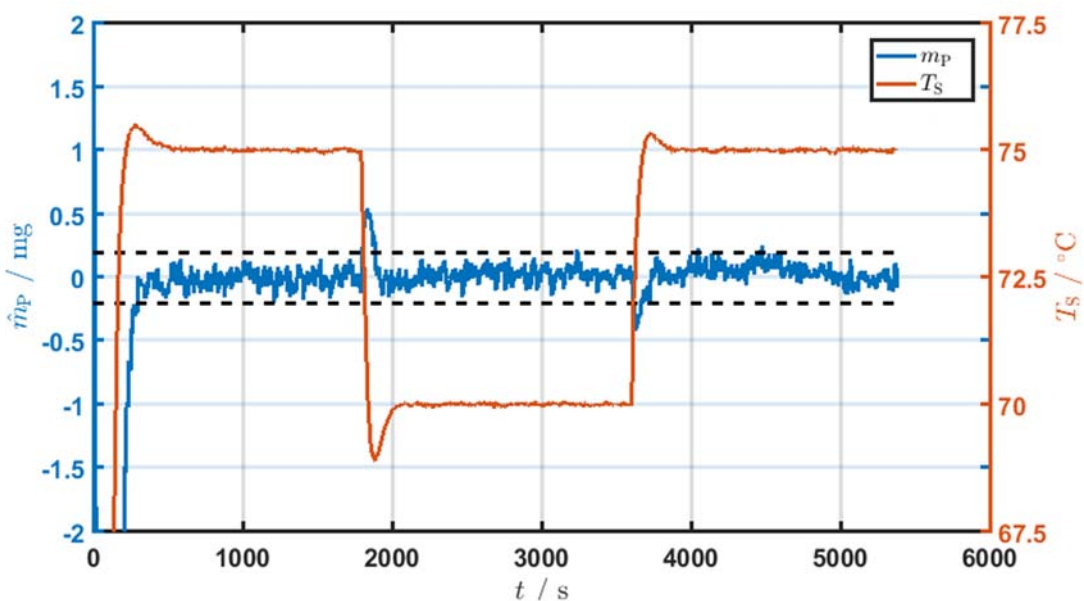
Mit dem Prototyp sind verschiedene Messungen durchgeführt worden. Unter anderem wurde eine Änderung der Heizschlauchtemperatur  $T_S$  untersucht. Bei Variation der Heizschlauchtemperatur  $T_S$  ändert sich auch der Wärmeeintrag in das Wiegemodul. Um den Einfluss auf das entwickelte Korrekturmodell zu testen, wird eine 90-minütige Leermessung durchgeführt. Dabei wird die Schlauchtemperatur  $T_S$  im Verlauf der Messung um 5 K verringert und anschließend wieder erhöht. Abbildung A4.4 zeigt die Schlauchtemperatur  $T_S$  sowie die geschätzte Partikelmasse  $\hat{m}_p$  einer Leermessung.



**Abbildung A4.4** Verläufe der geschätzten Partikelmasse  $\hat{m}_p$  und der Schlauchtemperatur  $T_s$  bei einer Leermessung [7]

Es ist noch ein deutlicher Einfluss auf die Partikelmasse erkennbar. Dabei entspricht die Temperaturänderung der Schlauchheizung  $T_s$  einer scheinbaren Massenänderung von ca.  $0,3 \text{ mg}/^\circ\text{C}$ .

Durch weitere Optimierung der Parameter und somit einer Reduzierung der Fehlersumme wurde die Messung mit der Variation der Heizschlauchtemperatur wiederholt. Abbildung A4.5 zeigt den Verlauf der Partikelmasse über die Änderung der Schlauchtemperatur  $T_s$ . Die Masse bleibt trotz der Temperaturänderung des Heizschlauches für die gesamte Messung innerhalb des Toleranzbandes. Lediglich beim Umstellen der Schlauchtemperatur sind kurze Spitzen im Signal sichtbar.



**Abbildung A4.5** Verläufe der geschätzten Partikelmasse und der Schlauchtemperatur mit neuen Parametern [7]

## A5 Simulationsrechnungen Partikelflugbahn

Im Folgenden wird zunächst das Ergebnis der Literaturrecherche zu den Transport und Abscheidemechanismen luftgetragener Partikel dargestellt. Zusätzlich ist im Rahmen des Projektes mit der Simulationssoftware COMSOL die Partikelabscheidung durch die Trägheit in der Entnahmesonde betrachtet worden.

### A5.1 Zusammenfassung der Transport- und Abscheidemechanismen

In Tabelle A5.1 sind die Einflussgrößen zur Berechnung der Depositionsraten durch Trägheit in Rohrbögen, Schwerkraft, Diffusion und Thermophorese zusammengefasst dargestellt. Die Einflussgrößen sind unterteilt in beeinflussbare und nicht beeinflussbare Faktoren durch Konstruktion der Probenahmeverrichtung des Online-Messgerätes. Zusätzlich ist eine Partikelgröße angegeben, ab der der Abscheidemechanismus theoretisch berücksichtigt werden soll.

**Tabelle A5.1 Übersicht über Transport- und Abscheidemechanismen und ihre Einflussgrößen, unterteilt in konstruktiv beeinflussbare und nicht beeinflussbare Faktoren [10], [11], [12], [13], [14]**

Transport- und Abscheidemechanismus	Einflussgrößen		Berechnung der Depositionsratenach	Berücksichtbare Partikelgröße
	beeinflussbar	nicht beeinflussbar		
Trägheitsabscheidung im Rohrbogen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strömungsgeschwindigkeit</li> <li>• Rohrradius</li> <li>• Überstrichener Winkel des Rohrbogens</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partikeldichte</li> <li>• Partikeldurchmesser</li> <li>• Dyn. Viskosität des Trägerfluids</li> </ul>	Crane & Evans (1977)	> 0,5 µm
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strömungsgeschwindigkeit</li> <li>• Rohrradius</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partikeldichte</li> <li>• Partikeldurchmesser</li> <li>• Dyn. Viskosität des Trägerfluids</li> </ul>	Pui et al. (1987)	
Schwerkraft	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rohrlänge</li> <li>• Rohrradius</li> <li>• Strömungsgeschwindigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partikeldichte</li> <li>• Partikeldurchmesser</li> <li>• Dyn. Viskosität des Trägerfluids</li> </ul>	Pich (1972)	> 1-2 µm
Diffusion	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rohrlänge</li> <li>• Volumenstrom</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Partikeldurchmesser</li> <li>• Dyn. Viskosität des Trägerfluids</li> <li>• Temperatur des Trägergases</li> </ul>	Thomas (1967)	< 0,01 µm
Thermophorese	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperaturgradient (Eintritt-Wand)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dyn. Viskosität des Trägerfluids</li> <li>• Wärmeleitfähigkeit Trägerfluid</li> <li>• Wärmeleitfähigkeit Partikel</li> <li>• Partikeldurchmesser</li> </ul>	Stratmann et al. (1994)	< 0,1 µm

Typische Staubemissionen liegen im Partikelgrößenbereich zwischen 0,007 und 10 µm [15]. Somit müssen die beschriebenen Transport- und Abscheidemechanismen bei der Untersuchung von Partikelverlusten in der Probenahmeverrichtung eines Staubmessgerätes für genehmigungspflichtige Anlagen nach TA Luft berücksichtigt werden.

Das Ergebnis der Literaturrecherche stellt heraus, dass bei der Probenahme an Kleinfeuerungsanlagen im Geltungsbereich der 1. BImSchV (Partikelgröße < 1µm) vor allem die Diffusion und die Thermophorese einen Effekt darstellen können. Mit zunehmender Partikelgröße stellen die beiden Abscheidemechanismen Trägheit und Schwerkraft einen wesentlichen Be-

standteil der Partikelabscheidung dar. Daher sind diese beiden Abscheidemechanismen besonders bei höheren Partikelgrößen, wie sie bei genehmigungspflichtigen Anlagen vorliegen können, zu berücksichtigen.

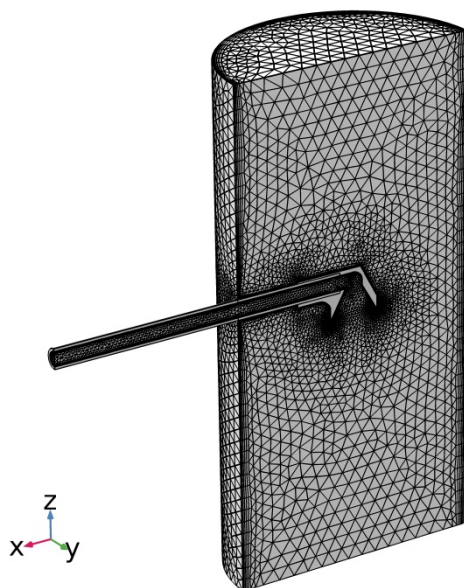
## A5.2 Simulationsrechnung mit COMSOL

Im Rahmen des Projekt wurde die Simulationssoftware COMSOL Multiphysics angeschafft. COMSOL Multiphysics ist ein kommerzielles Finite-Elemente Simulationsprogramm zur Lösung partieller Differenzialgleichungen, mit dem vielfältige Bereiche der Physik abgedeckt werden. Hier wird das CFD (Computational Fluid Dynamics) Module und das Particle Tracing Module für Strömungen und Partikelbahnen in dem Medium Luft verwendet. Das CFD Modul berechnet zum Modellieren von Strömungen in allen Geschwindigkeitssystemen mehrere Varianten der Navier-Stokes-Gleichungen. Turbulente Strömungen werden mit RANS-Gleichungen (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) modelliert. Zur Verfügung stehen unterschiedliche Turbulenzmodelle. Das Particle Tracing Module erweitert die Funktionalität der COMSOL-Umgebung um die Berechnung von Partikeltrajektorien, unter anderem in einem Fluid. Berücksichtigt werden auch die Partikel-Partikel-, Partikel-Fluid und Partikel-Feld-Wechselwirkungen. Die Bewegung wird anhand der Formulierungen von Newton, Lagrange oder Hamilton aus der klassischen Mechanik beschrieben. An den Wänden der Geometrie können Partikel mit Randbedingungen wie "Einfrieren", "Anhaften", "Rückprall", "Verschwinden" oder "Diffuse Streuung" versehen werden [16].

Bei der Simulation ist eine aktuelle Konstruktion der Entnahmesonde verwendet worden, siehe auch Abbildung A5.4. Hierzu ist die Entnahmesonde exemplarisch in einem Zylinder, der den Abgaskanal darstellt, positioniert. Im ersten Schritt ist ein CFD gerechtes Modell erstellt worden, als ein 1/2 Ausschnitt des Abgaskanals inklusive der Entnahmesonde. Für die Aussagekraft eines Simulationsmodells ist die Netzqualität von großer Bedeutung. Daher ist das Netz entsprechend der Simulation für Fluidströmung und Partikel optimiert und verfeinert worden. Das Netz besteht insgesamt aus 208.301 Volumenelementen, 16.567 Oberflächenelementen und 874 Linienelementen. Abbildung A5.1 stellt das vernetzte Modell dar.

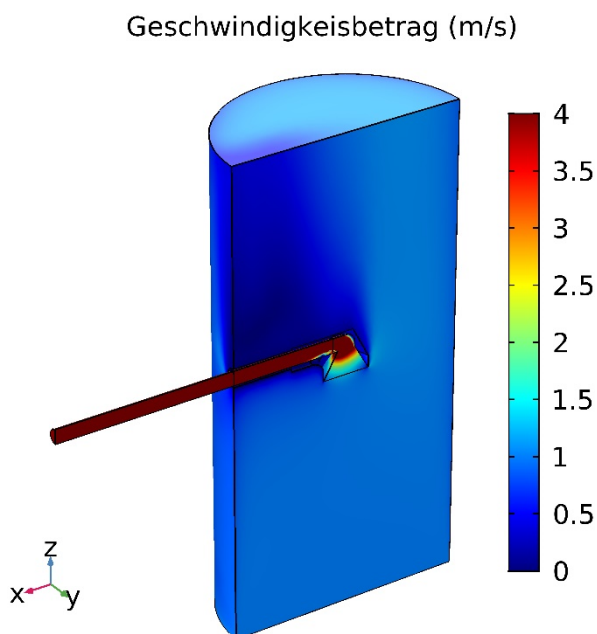
Im nächsten Schritt sind die Strömungsverhältnisse mit dem Simulationsprogramm COMSOL simuliert worden. Es wurde der Turbulenztyp RANS mit dem Turbulenzmodell  $k-\epsilon$  gewählt. Dabei wird die turbulente Strömung als zeitlicher Mittelwert der Geschwindigkeit und des Drucks modelliert.

Als Medium wurde Luft gewählt und mit einer konstanten Temperatur von  $100^{\circ}\text{C}$  vorgegeben. Im unteren Teil des Zylinders beträgt im Eintritt die Abgasgeschwindigkeit  $1\text{ m/s}$ . Diese beiden Annahmen entsprechen den Erfahrungen aus der Praxis. Am Ausgang der Entnahmesonde (Innendurchmesser  $3\text{ mm}$ ) ist ein Absaugvolumenstrom von  $4,5\text{ l/min i. N.}$  vorgegeben. Dieser Volumenstrom entspricht einer Geschwindigkeit am Ausgang der Entnahmesonde von  $14,68\text{ m/s}$  bei  $100^{\circ}\text{C}$  und  $1.000\text{ hPa}$ . Die Absauggeschwindigkeit an der Entnahmesonde am Trichtereingang liegt bei  $1,37\text{ m/s}$  unter den angegebenen Bedingungen. Bei der Berechnung wurde ein sog. „stationärer Löser“ gewählt um die Strömungsverhältnisse darzustellen.



**Abbildung A5.1 Vernetztes Modell der Entnahmesonde und Abgaskanal**

Abbildung A5.2 zeigt die Verteilung der Strömungsverhältnisse in dem Modell. Man erkennt die Beschleunigungsphase im Bereich des Sondentrichters.



**Abbildung A5.2 Ergebnis Strömungssimulation des Modells**

Auf Basis der simulierten Strömungsgeschwindigkeit sind am Eintritt der Abgasgeschwindigkeit, am unteren Ende des Zylinders, Partikel aufgebracht worden, die das Strömungsfeld nutzen. Insgesamt sind 3.000 Partikel mit einer homogenen zufälligen Verteilung von  $0,1 \mu\text{m}$  bis  $9 \mu\text{m}$  vorgegeben worden. Die Partikeldichte beträgt  $1.570 \text{ kg/m}^3$ . Bei der Simulation der Partikelflugbahnen ist die Widerstandskraft als physikalische Basis angenommen worden. Die Wi-

derstandkraft beinhaltet auch die Cunningham-Millikan-Davis Korrektur für Partikeldurchmesser kleiner als 1  $\mu\text{m}$ . Die Widerstandskraft  $F$  berechnet sich mit der Partikelmasse  $m_p$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $u$  sowie der Partikelgeschwindigkeit  $v$  zu:

$$F = \frac{1}{\tau_p \cdot Cu} \cdot m_p \cdot (u - v) \tag{GI. A2}$$

Die Partikelreaktionszeit  $\tau_p$  und der Cunningham-Faktor  $Cu$  werden nach den folgenden Gleichungen gelöst:

$$\tau_p = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu} \tag{GI. A3}$$

$$Cu = 1 + Kn \cdot \left( C_1 + C_2 \cdot e^{-\frac{C_3}{Kn}} \right) \tag{GI. A4}$$

Die Knudsen Zahl  $Kn$  ergibt sich mit der freien mittleren Wellenlänge  $\lambda$  zu:

$$Kn = \frac{\lambda}{d_p} \tag{GI. A5}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot p \cdot \rho} \cdot \mu} \tag{GI. A6}$$

Um den zeitlichen Verlauf der Partikeltrajektorien darzustellen, ist bei der Berechnung ein zeitabhängiger Löser gewählt worden, mit einer Schrittweite von 0,001 s und einem Endwert von 0,25 s. Die Zeitdauer von 0,25 s ist bewusst gewählt, da zu diesem Zeitpunkt alle aufgebrachten Partikel die Entnahmesonde passiert haben und den Ausgang des Abgaskanals erreichen. Als Haftbedingung an den Wänden für die Partikel ist das "Anhaften" gewählt worden. Abbildung A5.3 zeigt das Modell mit der Position der Partikel zum Zeitpunkt  $t=0,25$  s.

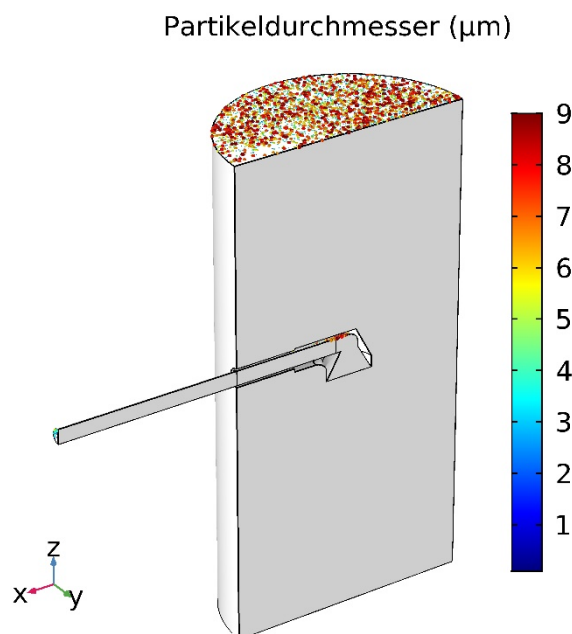
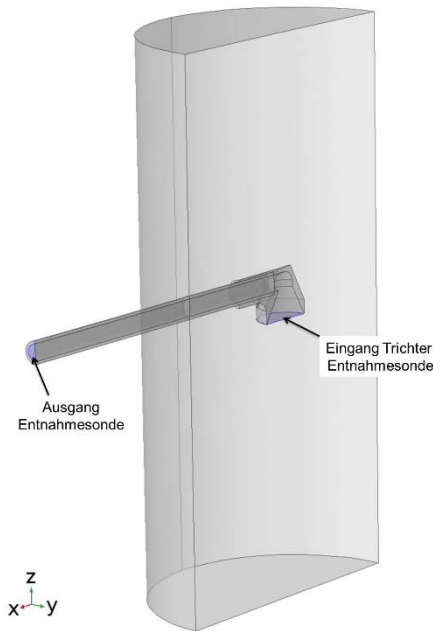


Abbildung A5.3 Ergebnis Partikeltrajektorien des Modells zum Zeitpunkt  $t=0,25\text{s}$

Zur Betrachtung der Partikelabscheidung infolge der Widerstandskraft wird eine Bilanz zwischen dem Eingang der Entnahmesonde am Trichter und dem Ausgang der Entnahmesonde aufgestellt. Der Innendurchmesser am Eingang Trichter der Entnahmesonde beträgt 10 mm. Der Innendurchmesser am Ausgang der Entnahmesonde ist 3 mm. Abbildung A5.4 zeigt die eindeutige Zuordnung der beiden Flächen, die zur Bilanz herangezogen werden.



**Abbildung A5.4 Zuordnung der Position an Entnahmesonde**

Anhand der beschriebenen Randbedingungen der Simulation befinden sich 103 Partikel an dem Eingang der Entnahmesonde. Die Partikelgrößenverteilung entspricht der Vorgabe und liegt im Bereich zwischen  $0,1 \mu\text{m}$  und  $9 \mu\text{m}$ , Abbildung A5.5.

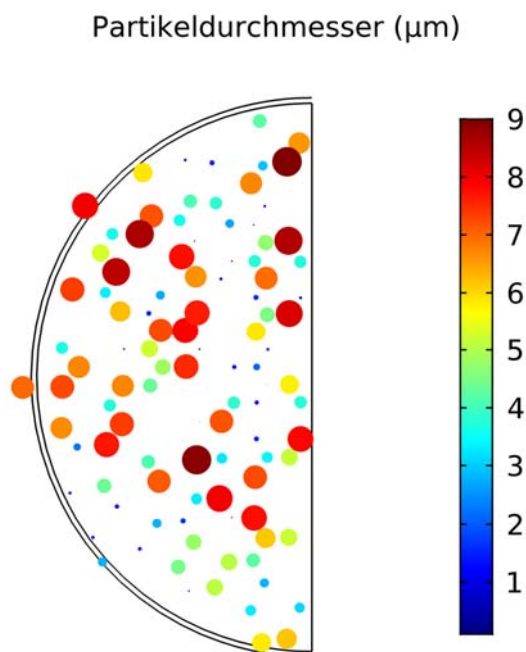
Die Partikelanzahl am Ausgang der Entnahmesonde beträgt 51 Partikel. Der maximale Partikeldurchmesser beträgt  $5,3 \mu\text{m}$ . Abbildung A5.6 zeigt die Partikelgrößenverteilung am Ausgang der Entnahmesonde.

Die Ergebnisse der Simulation zeigen auf, dass die aktuelle Konstruktion mit den getroffenen Annahmen Partikel mit einem höherem Partikeldurchmesser als  $5,3 \mu\text{m}$  nicht mehr am Ausgang der Entnahmesonde zu finden sind. Somit fehlen diese Partikel bei der Bestimmung der Staubkonzentration.

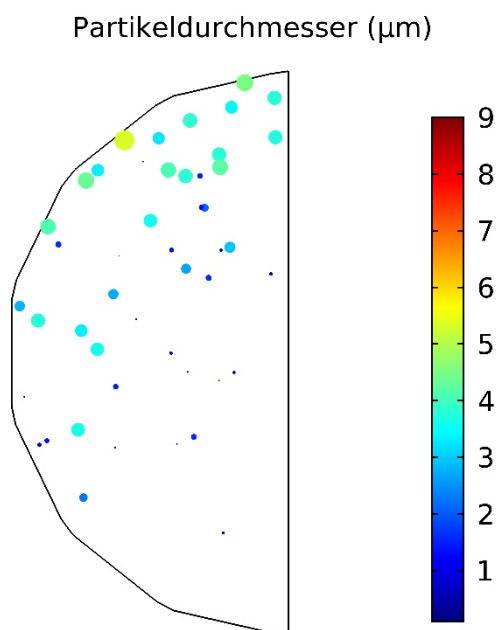
Bei den Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV liegt meist ein Großteil der Partikel im Bereich  $< 1 \mu\text{m}$  vor. Somit zeigt die Simulation deutlich auf, dass mit der aktuellen Konstruktion für diesen Anwendungsfall ausgelegt ist.

Weitere Effekte bei den Partikelabscheidemechanismen, die bei der Probenahme beteiligt sind, konnten bei der Simulation im Rahmen des Projekt nicht abschließend untersucht werden. Jedoch zeigt die Simulation, dass es vor allem bei Anlagen mit größeren Partikeldurchmessern noch Optimierungsbedarf bei der Auslegung der Entnahmesonde gibt.





**Abbildung A5.5** Partikelgrößenverteilung am Eingang Trichter der Entnahmesonde



**Abbildung A5.6** Partikelgrößenverteilung am Ausgang der Entnahmesonde

Bei Staubmessungen nach der VDI-Richtlinie 2066 Blatt 1 müssen auch sehr viel größere Partikel korrekt erfasst werden. Staubemissionen bei Holzfeuerungen liegen im Partikelgrößenbereich zwischen  $0,007$  und  $10 \mu\text{m}$  [15]. In diesem Geltungsbereich bekommt die Isokinetik einen hohen Stellenwert. Weiterhin sollten die Strömungsverhältnisse am Eingang Entnahmesonde untersucht werden um die beschriebenen Abscheidemechanismen zu minimieren.

## Teil B: Simulationsrechnungen sowie Messungen mit dem Prototyp im Labor und an Realgas

### B1 Simulationsrechnungen Sensorgehäuse

Voraussetzung zur Implementierung der isokinetischen Probenahme ist die Entwicklung eines neuen Korrekturmodells zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls des Resonanzsystems. Um das neue Korrekturmodell zu entwickeln, sind u.a. Berechnungen der zeitlichen Temperaturverteilung im Sensorgehäuse notwendig. Dies soll durch eine zeitabhängige CFD Simulationsrechnung erfolgen (CDF: computational fluid dynamics).

Beim Start des Messgerätes Wöhler SM 500 erfolgt zuerst die Aufheizung des Sensors über Heizpatronen, die entsprechend der Starttemperatur des Sensorgehäuses und der gewünschten Solltemperatur (70 °C) für eine definierte Zeit in Betrieb sind. Die anschließende Stabilisierungsphase dauert in der Regel zwischen 8 bis 12 Minuten, danach kann die Staubsonde in das Abgasrohr eingebaut werden. Nach einer weiteren kurzen Wartezeit (Nullungsphase) von einer Minute startet die eigentliche Staubmessung. Für die Temperatursimulation besonders interessant sind hierbei die ersten 900 Sekunden nach dem Start des Messgerätes, in der zuerst die Aufheizung des Sensors über eine gewisse Zeit erfolgt und sich dann die Stabilisierungsphase anschließt.

Der Aufbau des Modells basiert auf aktuellen Konstruktionszeichnungen für den Staubmassensensor des Wöhler SM 500. Um die Anzahl der Netzelemente gering zu halten, wurde ein CFD konformes Modell erstellt. Dieses umfasst einen in Details vereinfachten 1/4 Ausschnitt des Sensorgehäuses, welches in Abbildung B1.1 dargestellt ist.

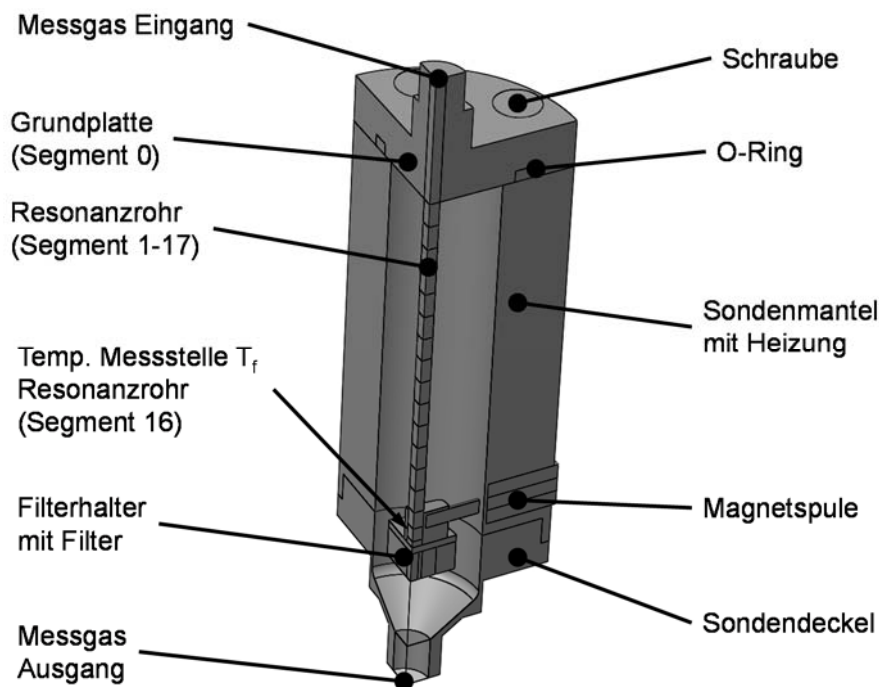
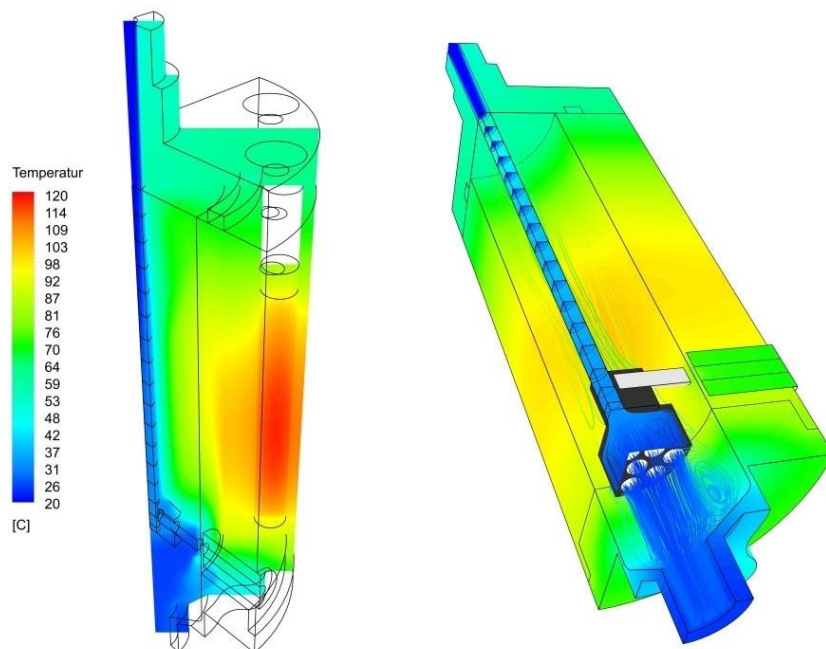


Abbildung B1.1 Grundsätzlicher Aufbau des CFD-Modells für den Staubmassensensor des Wöhler SM 500

Für die Stabilität und die Aussagekraft der Simulation ist die Netzqualität von großer Bedeutung. Daher musste iterativ die Modellfeinheit optimiert werden, um bei einer möglichst geringen Anzahl an Zellen alle simulationsrelevanten Details abzubilden. Das finale Netz besteht aus insgesamt 1,82 Mio. Netzelementen. Das Resonanzröhrchen wird in die Segmente 0 bis 17 eingeteilt.

Um die Wärmeleitung richtig abbilden zu können, wurden die physikalischen Stoffdaten, wie Wärmeleitfähigkeit oder Wärmekapazität der einzelnen verbauten Materialien zusammengetragen und entsprechend als Randbedingung in das Modell integriert. Die Heizleistung einer Heizpatrone wird als ideale Wärmequelle mit einer Leistung von 250 W angenommen. Um die Stabilität und Plausibilität des Modells zu prüfen, wurden in einem ersten Schritt stationäre Simulationsrechnungen zu den Strömungsverhältnissen im Sensorgehäuse durchgeführt, hierbei wurde die Temperaturverteilung im Sensorgehäuse nicht betrachtet.

In einem weiteren Schritt wurde der simulierte zeitliche Verlauf der Temperatur an der Messstelle des Resonanzröhrchens ( $T_f$ ) anhand einer Driftmessung ohne Schlauchheizung validiert. Simuliert wurde über die Dauer von 900 sec, mit unterschiedlicher zeitlicher Auflösung (Zeitintervalle oder Zeitschritte). Die Aufheizung des Wöhler SM 500 erfolgt mit Hilfe von Heizpatronen, welche üblicherweise für ca. 50 sec eingeschaltet werden. Um diesen Zeitabschnitt in der Simulation detailliert abzubilden, wurde für die Sekunde 1 bis 50 der Aufheizung ein Zeitintervall von 1 Sekunde gewählt, siehe auch Abbildung B1.2. Ab der 50. Sekunde wurde mit einem Zeitintervall von 10 sec und ab der 240. bis zur 900. Sekunde mit einem Zeitintervall von 60 sec gerechnet.



Zeit: 050 sek

Abbildung B1.2 Simulationsergebnis der Temperaturverteilung im Staubmassesensor des Wöhler SM 500 zum Zeitpunkt  $t = 50$  sec

Für jeden Zeitschritt sind 1.500 Iterationsschritte nötig, um keine bzw. sehr geringe Änderungen der Temperaturen von Iterationsschritt zu Iterationsschritt zu erreichen. Die Simulation wurde mit ANSYS Fluent® auf einem 4 Kernprozessor mit 16 Gigabyte Arbeitsspeicher durchgeführt. Dadurch ergaben sich pro Zeitschritt ca. 21 Rechenstunden.

### B1.1 Simulationrechnungen ohne Schlauchheizung

Im Segment 16 des Resonanzröhrchens befindet sich die Temperaturmessstelle  $T_f$  (siehe Abbildung B1.1). Die tatsächlich gemessenen Temperaturen in diesem Segment wurden mit simulierten Temperaturen, berechnet als Mittelwerte über die Segmentfläche, verglichen.

Abbildung B1.3 zeigt in Rot (sm500\_Tf) den gemessenen Temperaturverlauf der Messstelle Resonanzrohr ( $T_f$ ) ohne Schlauchheizung für die Dauer von 900 Sekunden, bei einer Heizdauer von 55 Sekunden. Deshalb wurde in einer ersten Simulationsrechnung die Gehäusebeheizung nach 50 s abgeschaltet. Der berechnete Temperaturverlauf ist in Schwarz (simu\_Tf - Heizung ab 50. s aus) dargestellt. Die berechneten und gemessenen Temperaturverläufe stimmen nur in den ersten ca. 60 Sekunden überein. Durch Wärmeverluste und den Temperaturausgleich weist dann die simulierte Temperatur an der Messstelle Resonanzrohr eine geringere Steigung auf und nähert sich einem Maximum von ca. 47 °C in der 150. Sekunde. Gegenüber der gemessenen Temperatur  $T_f$  in der 150. Sekunde weist das Modell eine Differenz von ca. 12 °C auf.

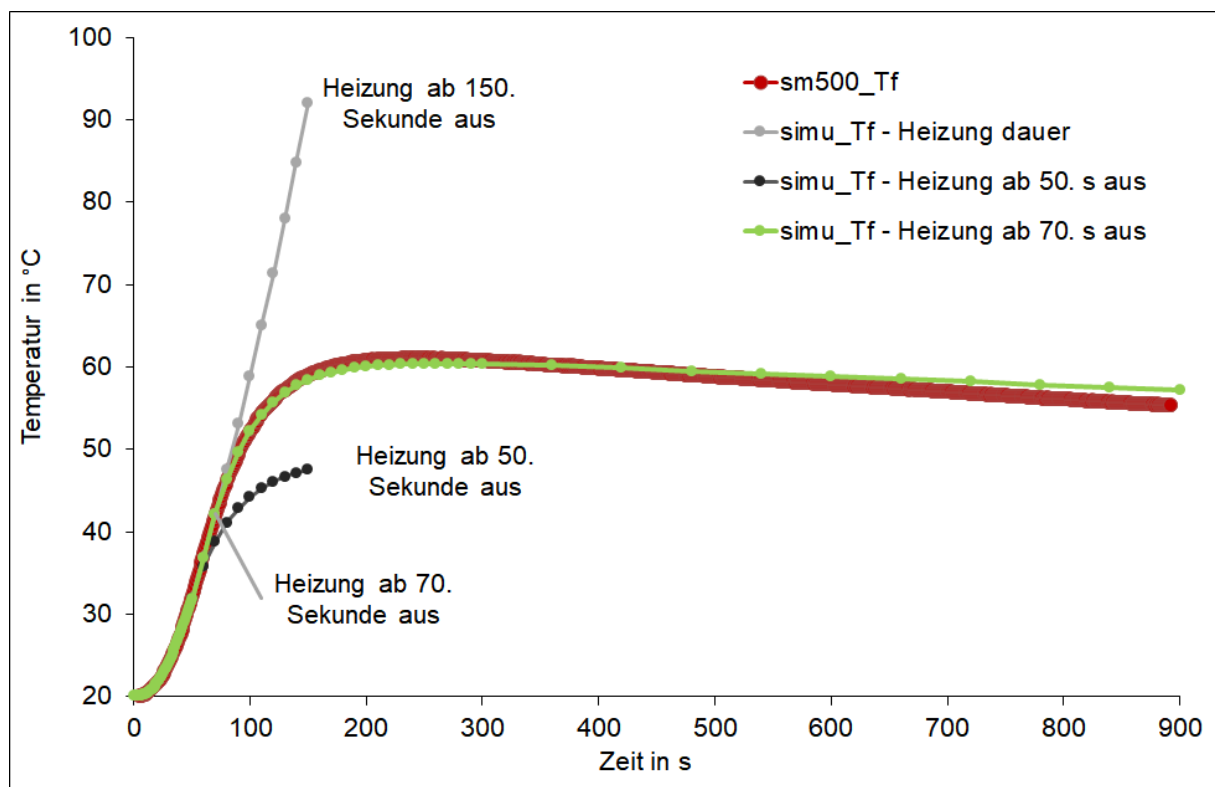


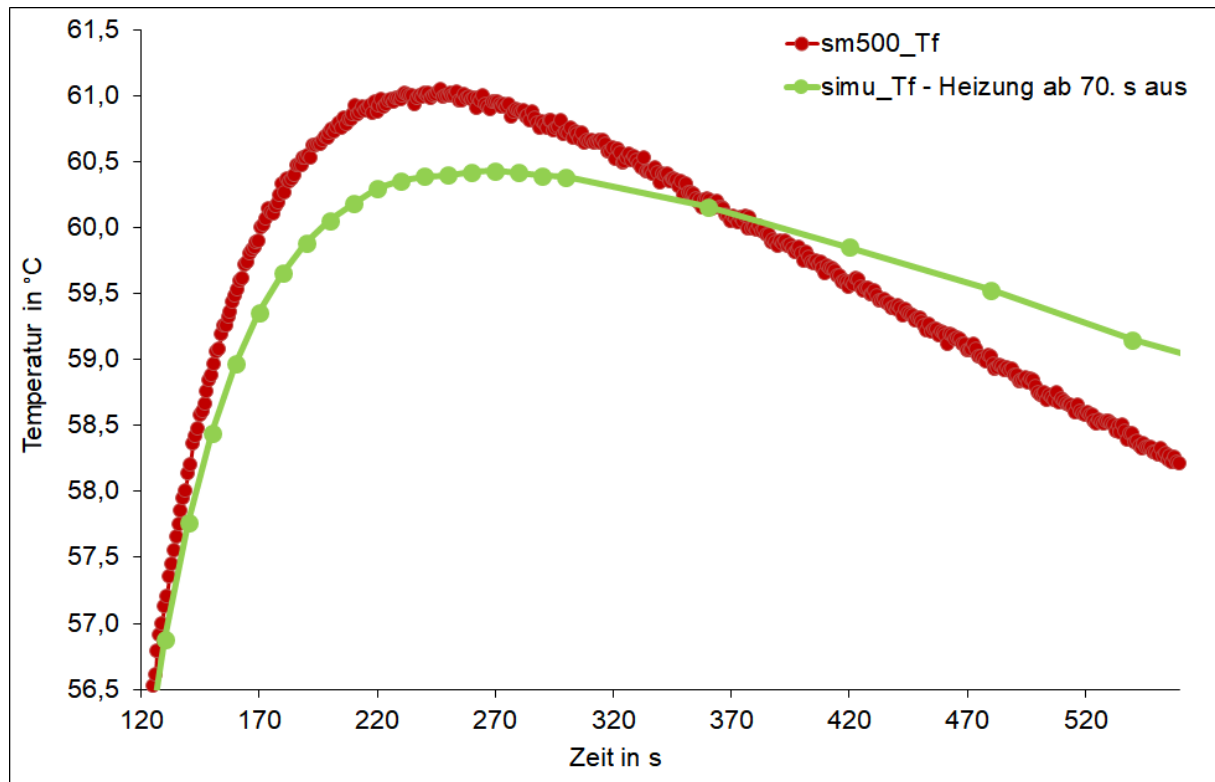
Abbildung B1.3 Gemessener und simulierter Temperaturverlauf für die Messstelle Resonanzrohr  $T_f$  ohne Schlauchheizung

Da der gemessene und simulierte Temperaturverlauf von Sekunde 1-50 mit einer Abweichung von unter 1,5 % bzw. kleiner als 0,5 °C sehr gut übereinstimmt, ist davon auszugehen, dass die Abweichung ab der 50. Sekunde nicht vom Simulationsmodell verursacht wird.

Deshalb wurden weitere Rechnungen durchgeführt, bei der die Gehäusebeheizung erst in der 150. Sekunde abgeschaltet wurde. Der berechnete Temperaturverlauf ist in Grau (simu\_Tf - Heizung dauer an) dargestellt, wobei sich an der Messstelle Resonanzrohr eine maximale Temperatur von 92 °C einstellt. Etwa ab der 70. Sekunde ist ein auseinanderdriften der gemessenen und der simulierten Temperatur erkennbar. Deshalb wurde für eine weitere Simulation eine Beheizungsdauer von 70 Sekunden gewählt. In Grün (simu\_Tf - Heizung ab 70. s aus) ist der Verlauf der simulierten Temperatur des Resonanzrohres für diese Aufheizdauer dargestellt. Der berechnete Temperaturverlauf gibt den gemessenen Temperaturverlauf nun sehr gut wieder.

Weshalb in der Simulation eine Beheizungsdauer von 70 Sekunden, gegenüber 55 Sekunden bei der Realmessung, gewählt werden musste, um einen nahezu identischen Temperaturverlauf im Segment 16 zu erhalten, konnte bisher noch nicht vollständig ermittelt werden.

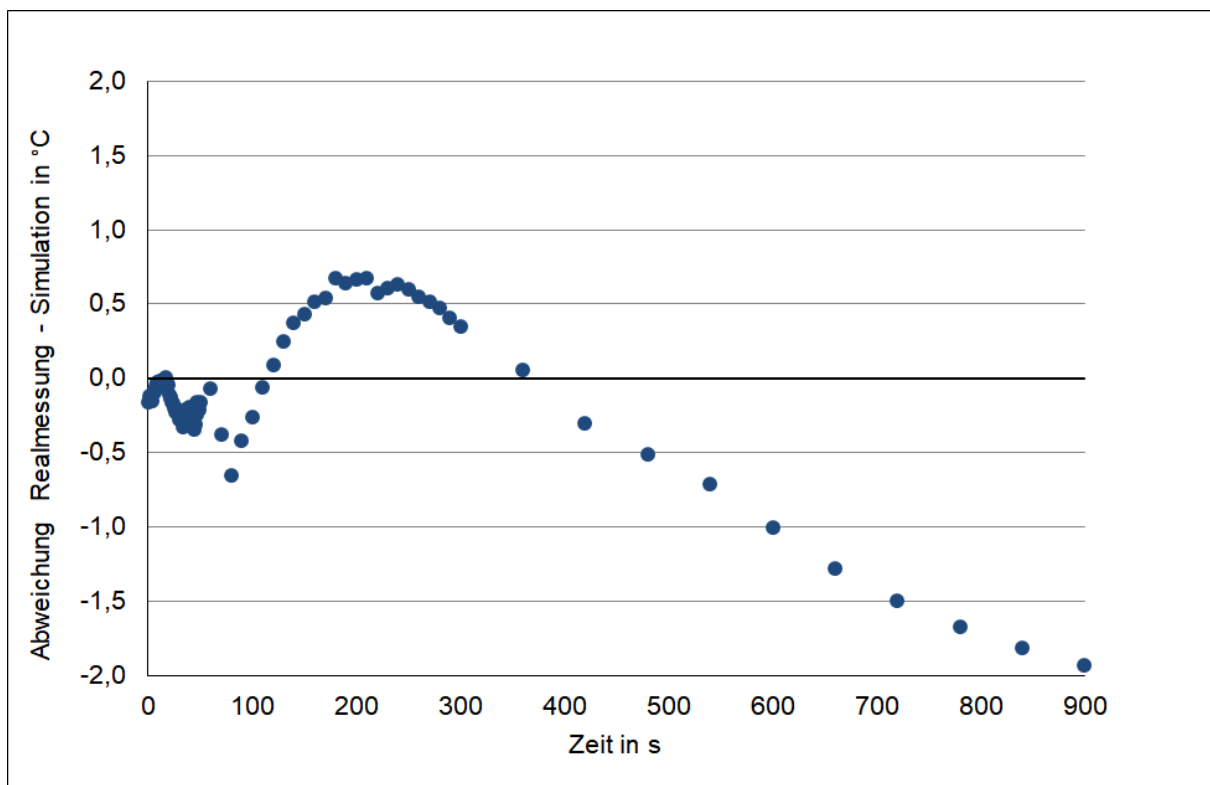
In Abbildung B1.4 ist der gemessene und simulierte Temperaturverlauf an der Messstelle Resonanzrohr  $T_f$  ohne Schlauchheizung im Bereich der maximalen Temperatur (Wendepunkt im Temperaturverlauf) während der Stabilisierungsphase des Messgerätes von der Sekunde 120 bis 550 dargestellt.



**Abbildung B1.4** Gemessener und simulierter Temperaturverlauf an der Messstelle Resonanzrohr  $T_f$  ohne Schlauchheizung im Bereich maximaler Temperatur (Wendepunkt im Temperaturverlauf)

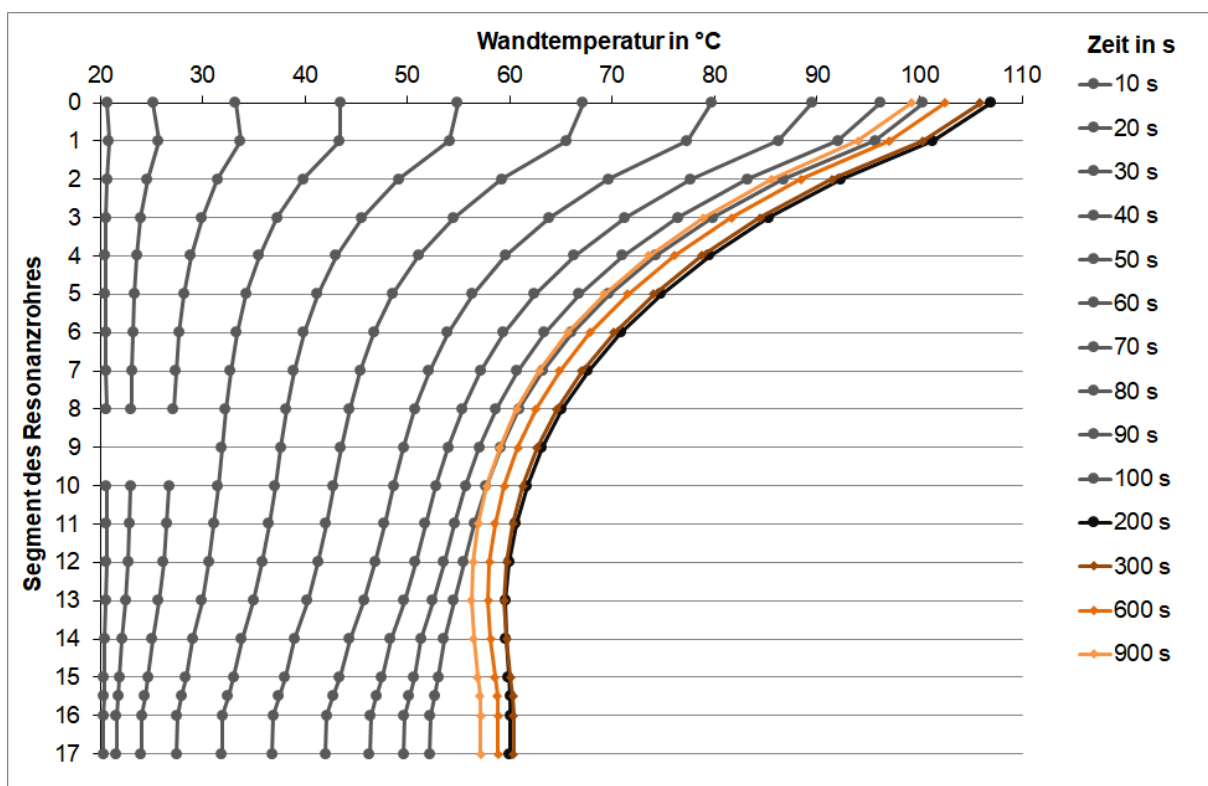
Auch hier zeigt sich die sehr gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen Filtertemperatur „sm500\_Tf“ (rot) und der simulierten Filtertemperatur „simu\_Tf - Heizung ab 70. s aus“ (grün). Allerdings ist ab Sekunde 120 eine leichte Differenz der Temperaturen erkennbar, die in der Sekunde 250 ca. 0,6 °C beträgt. Dies könnte darauf hin deuten, dass der Abschaltzeitpunkt der Heizpatronen nicht bei Sekunde 70 hätte erfolgen müssen, sondern etwas später, z.B. bei Sekunde 71 oder 72. Ursache hierfür könnte in einer geringen vom Sollwert (250 W) abweichenden tatsächlichen Heizleistung der Heizpatronen liegen. Die in der Simulation etwas zu niedrig angesetzten Wärmeverluste des Sensorsegments führen nach dem Wendepunkte im Temperaturverlauf zu einer etwas zu flachen Abkühlkurve.

Da allerdings die Abweichungen zwischen Messung und Simulation in einem vertretbaren Bereich liegen, wurden keine Anpassungen des Abschaltzeitpunktes für die Beheizung oder die Wärmeverluste in der Simulation vorgenommen. Dies verdeutlicht Abbildung B1.5, welche die Differenz zwischen der gemessenen Temperatur (sm500\_Tf) und der simulierten Temperatur (simu\_Tf - Heizung ab 70. s aus) für die Messstelle Resonanzrohr im Segment 16 beim Betrieb des Messgerätes ohne Schlauchheizung für den Betrachtungszeitraum von 900 Sekunden zeigt. Im Zeitraum von der 1. bis zur 500. Sekunde tritt eine Abweichung von  $\pm$  ca. 0,6 °C bzw. etwa  $\pm$  1,5 % auf. Bis zur 900. Sekunde vergrößert sich dann die Temperaturabweichung auf 2°C, was an gewissen Vereinfachungen bei der Abbildung des Sensorgehäuses im Simulationsmodell liegt, welche den Wärmeverlust über die Gehäuseoberfläche beschreiben.



**Abbildung B1.5** Differenz zwischen gemessener (sm500\_Tf) und simulierter (simu\_Tf - Heizung ab 70. s aus) Temperatur für die Messstelle Resonanzrohr beim Betrieb ohne Schlauchheizung

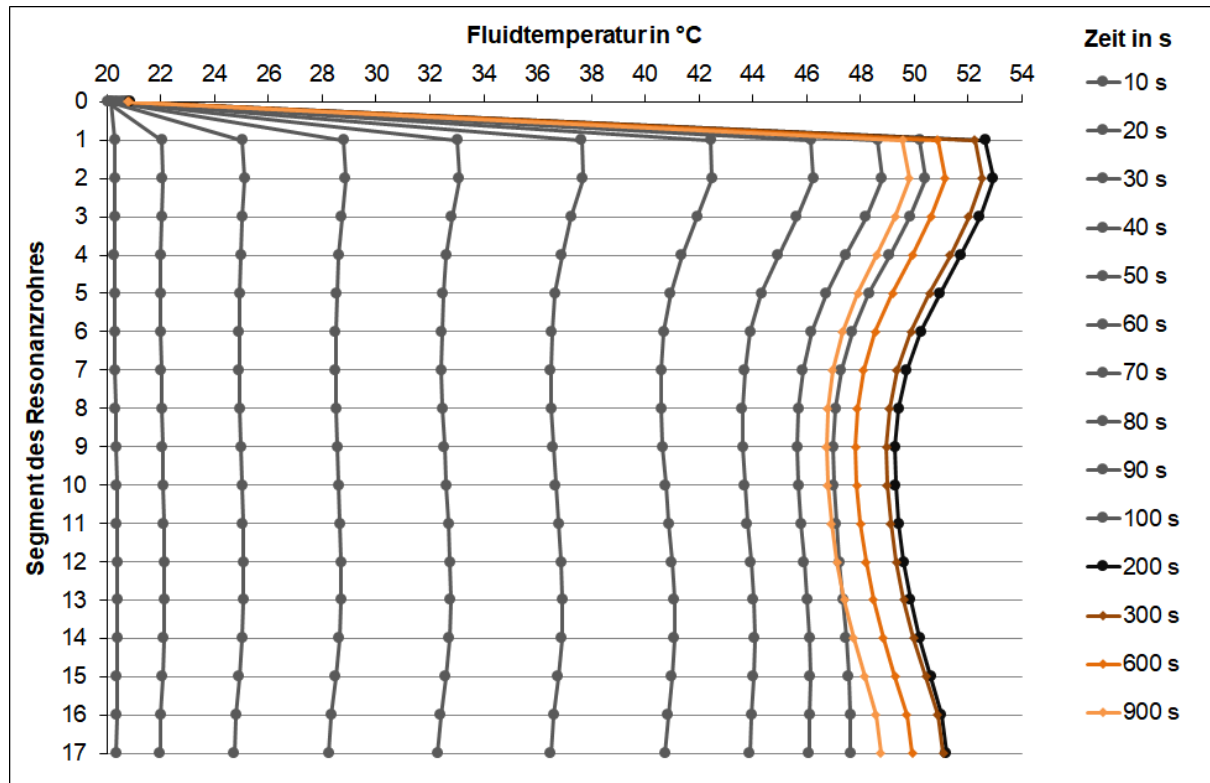
Anhand der Simulationsergebnisse kann der Temperaturverlauf der Wand des Resonanzröhrchens für alle berechneten 18 Segmente (Grundplatte sowie 17 Rohrsegmente) dargestellt werden (siehe auch Abbildung B1.1). In Abbildung B1.6 sind die Verläufe der Wandtemperaturen, als Mittelwert der Oberflächentemperatur der einzelnen Segmente 1 bis 17, dargestellt. Segment 0 repräsentiert die Temperatur der Grundplatte und Segment 16 die Temperatur der Temperaturmessstelle im Resonanzrohr. Wird das Wöhler SM 500 ohne Schlauchheizung aufgeheizt, stellt sich im Zeitverlauf ein großer Temperaturgradient über die Höhe des Resonanzröhrchens ein. Ab der Sekunde 200 nimmt die Temperatur in der Grundplatte (Segment 0) ab und es findet ein gewisser Temperaturengleich im Massesensor statt, allerdings ist nach 900 Sekunden noch ein Temperaturunterschied von ca. 42 °C über der Höhe des Resonanzröhrchens vorhanden.



**Abbildung B1.6 Verlauf der Wandtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (ohne Schlauchheizung) im Betrachtungszeitraum von 900 s**

Abbildung B1.7 zeigt den zeitlichen Verlauf der mittleren Fluidtemperatur (Gastemperatur) des Resonanzröhrchens für die berechneten 18 Segmente. Hierbei gibt das Segment 0 die Eintrittstemperatur des Gases in die Grundplatte und die Auswertefläche 1 gibt die Austrittstemperatur von Segment 0 bzw. die Eintrittstemperatur in das Segment 1 wieder. Da die Schlauchheizung deaktiviert war, findet eine Aufheizung des Gases im Segment 0 nur über die Höhe der Grundplatte statt. Die Fluidtemperatur ist bis zur Sekunde 50 über das Resonanzröhrchen nahezu konstant. Ab der Sekunde 50 hat das Sensorgehäuse, der Filterhalter und das das

Röhrchen umgebende Fluid einen immer stärkeren Einfluss auf die Fluidtemperatur im Resonanzröhrchen. Dabei findet eine Abkühlung zwischen Segment 2 und Segment 7 bis 9 statt, mit einer anschließenden Erwärmung zwischen Segment 7 bis 9 und 16 bis 17.



**Abbildung B1.7 Verlauf der Fluidtemperatur in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (ohne Schlauchheizung) im Betrachtungszeitraum von 900 s**

Da der Betrieb des Wöhler SM 500 ohne Schlauchheizung kein realer Betrieb darstellt und die bisher gezeigten Simulationsergebnisse nur der Überprüfung des Simulationsmodells dienen, wurden weitere Berechnungen mit Schlauchheizung durchgeführt. Nach einer Überprüfung und Bewertung der Zeitintervalle wurden in den weiteren Berechnungen im Zeitraum von Sekunde 1 bis 300 mit einem Zeitintervall von 10 s und ab der Sekunde 300 mit einem Zeitintervall von 60 s gerechnet.

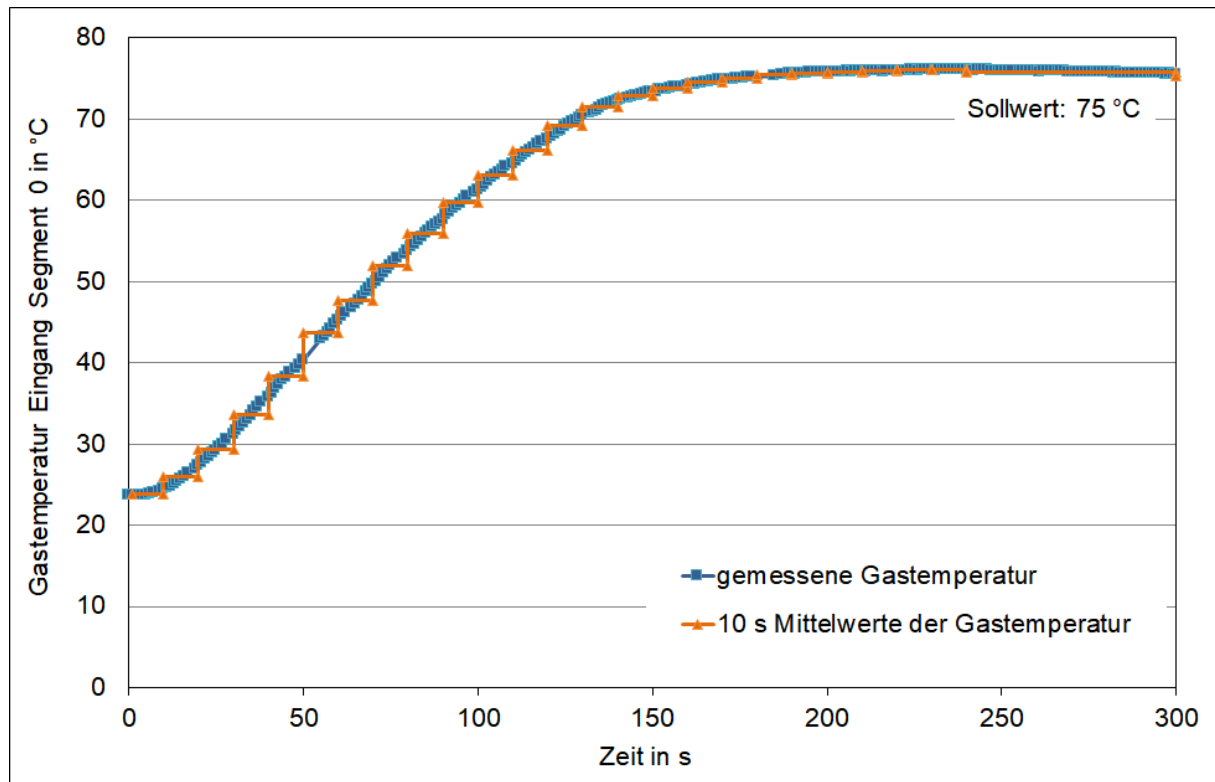
### B1.2 Simulationsrechnungen mit Schlauchheizung

Bei der Simulation des Sensormoduls Wöhler SM 500 mit Schlauchheizung wurde eine detaillierte Abbildung der Verhältnisse im beheizten Probenahmeschlauch auf Grund der hohen Komplexität nicht vorgenommen. Stattdessen wird bei den Berechnungen durch eine Temperaturänderung des Eintrittsgases am Eingang des Sensorgehäuses (Segment 0) das Verhalten der Schlauchheizung abgebildet. Da sich im realen Messgerät die Eingangstemperatur des Gases während der Aufheizung vom Probenahmeschlauch sekundlich ändert, aber in der



Simulation mit einem Zeitintervall von 10 Sekunden gerechnet wird, wird dies mit einer mittleren Eingangstemperatur über 10 Sekunden abgebildet. Ansonsten wurde das Simulationsmodell im Vergleich zu den Rechnungen ohne Schlauchheizung nicht verändert.

Abbildung B1.8 zeigt den gemessenen Gastemperaturverlauf im realen Messgerät ab dem Start der Schlauchheizung bis zum Erreichen der Sollwerttemperatur am Eingang von Segment 0 und dem für die Simulation angesetzten treppenförmigen Verlauf der Eingangstemperatur mit 10 s Mittelwerten.

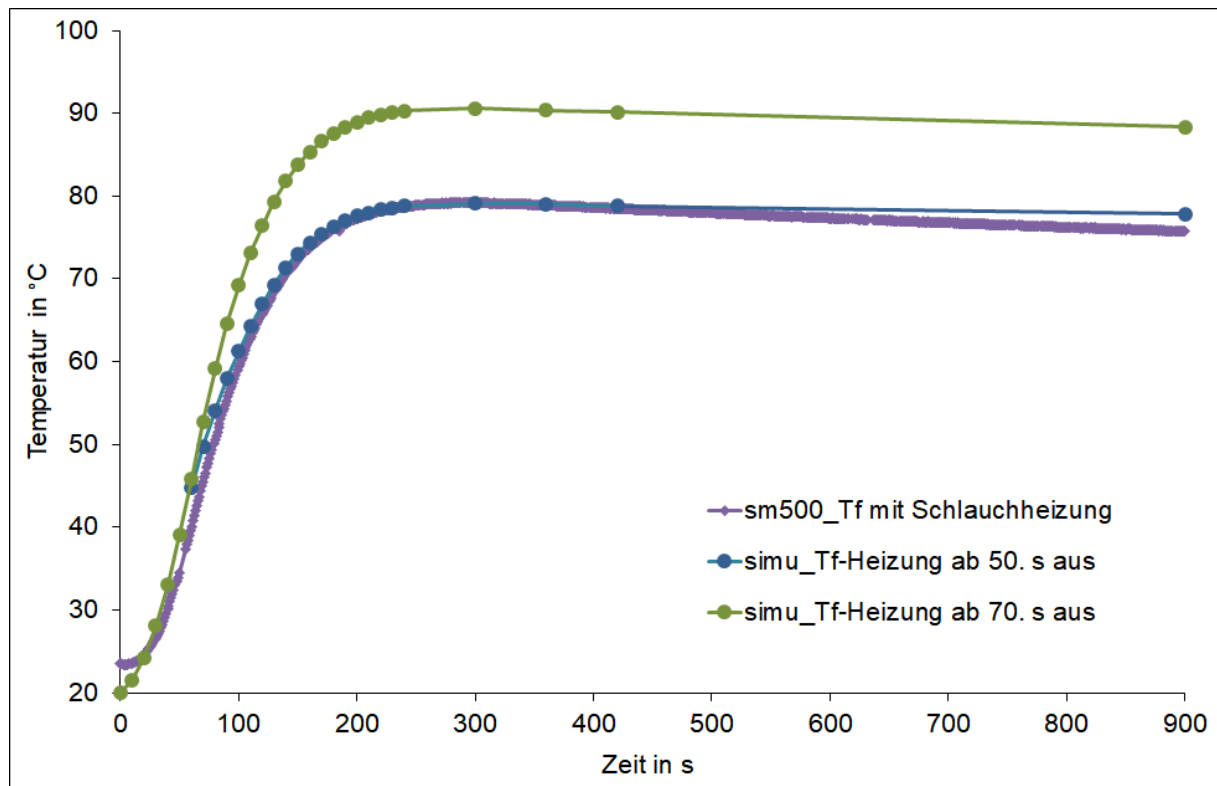


**Abbildung B1.8 Gemessener und gemittelter Gastemperaturverlauf am Eingang von Segment 0 für den Start der Schlauchheizung bis zum Erreichen der Sollwerttemperatur**

Die Aufheizung vom Probenahmeschlauch und vom Sensorgehäuse wurde in der Simulation zeitgleich angesetzt. Die Schlauchheizung ist während des gesamten Betrachtungszeitraumes in Betrieb und hält nach erfolgter Aufheizung die Gastemperatur auf dem Sollwert von 75 °C. Beim Sensorgehäuse werden die Heizpatronen nach einer bestimmten Dauer (50 oder 70. Sekunde) abgeschaltet. Die Heizleistung einer Heizpatrone wird als ideale Wärmequelle mit einer Leistung von 250 W angenommen.

In Abbildung B1.9 sind die simulierten Temperaturverläufe für die Messstelle Resonanzrohr mit einer Einschaltdauer der Heizpatrone von 50 Sekunden in Blau (simu\_Tf - Heizung ab 50. s aus) und von 70 Sekunden in Grün (simu\_Tf - Heizung ab 70. s aus) im Vergleich zum gemessenen Temperaturverlauf in Violett (sm500\_Tf mit Schlauchheizung) dargestellt. Jetzt

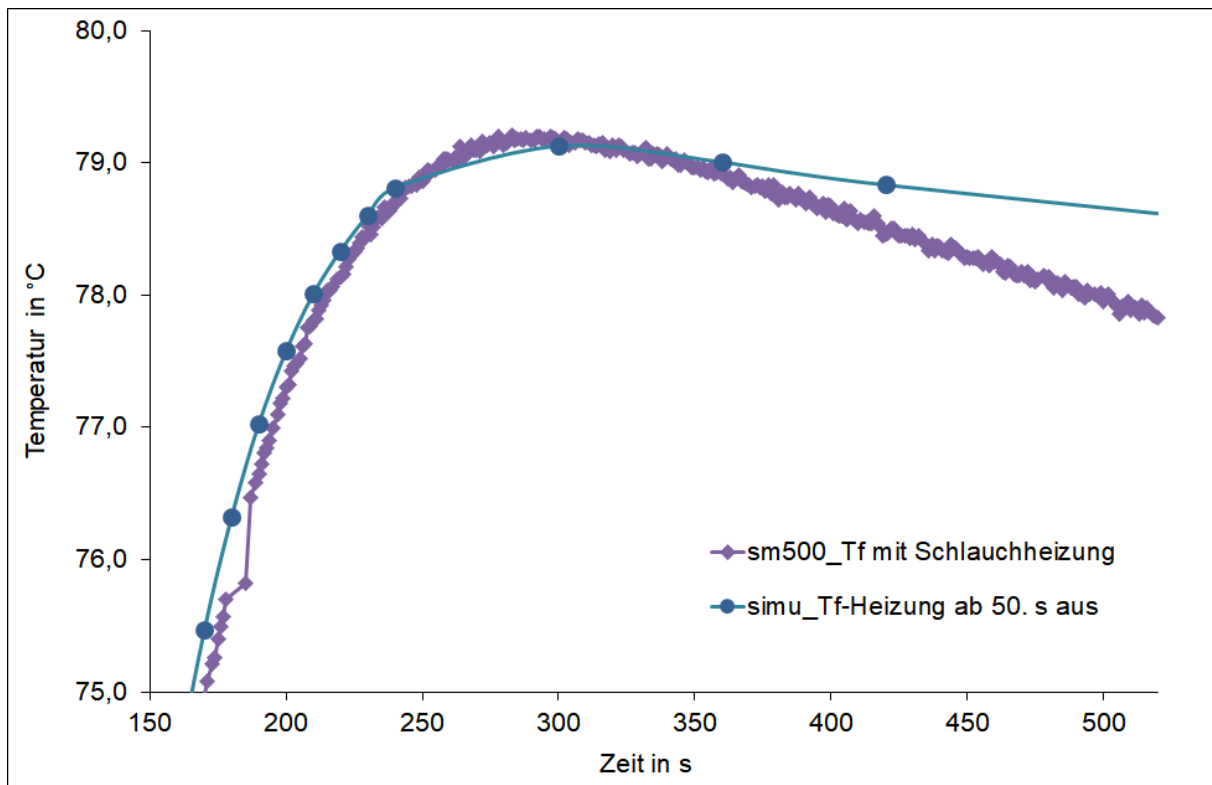
zeigt sich die sehr gute Übereinstimmung der Simulation beim Abschalten der Heizpatrone ab der 50. Sekunde im Vergleich zu den realen Vorgängen im Messgerät Wöhler SM 500.



**Abbildung B1.9 Gemessener und simulierter Temperaturverlauf für die Messstelle Resonanzrohr  $T_f$  mit Schlauchheizung**

Bei der Simulation des Temperaturverlaufs für die Messstelle Resonanzrohr  $T_f$  mit Schlauchheizung wird der Bereich maximaler Temperatur (Wendepunkt im Temperaturverlauf) in der Sekunde 200 bis 400 sehr gut wieder gegeben (siehe Abbildung B1.10). Die Starttemperatur in der Simulation wurde mit 20 °C festgelegt, bei den Messungen am realen Messgerät lag diese bei ca. 23 °C. Trotz einer geringen Differenz der Starttemperaturen von Simulationsrechnung und Messung liegen die Temperaturverläufe im Zeitraum 150 bis 300 Sekunden nahe beieinander. Die geringen Abweichungen der Temperaturverläufe können z.B. von Unterschieden in der Heizleistung der Heizpatrone verursacht werden. Bei der Simulation wurde angenommen, dass diese den Sollwert von 250 W liefert, die tatsächliche Heizleistung kann hiervon etwas abweichen. Außerdem könnte in der Realität der Wärmeübergang von der Heizpatrone zum Gehäuse etwas schlechter sein als in der Simulation angenommen.

Ab der Sekunde 360 drifteten die gemessene und die simulierte Temperatur für die Messstelle Resonanzrohr auseinander, so dass sich in der Sekunde 500 eine Abweichung von ca. 1 °C ergibt. Dies wird, wie bei der Simulation ohne Schlauchheizung, damit begründet, dass die Wärmeverluste über das Gehäuse im Simulationsmodell etwas zu niedrig gewählt wurden. Da diese Abweichungen in einem geringen vertretbaren Bereich liegen, wurden keine weiteren Anpassungen für die Simulationsrechnungen durchgeführt.



**Abbildung B1.10** Gemessener und simulierter Temperaturverlauf an der Messstelle Resonanzrohr  $T_f$  mit Schlauchheizung im Bereich maximaler Temperatur (Wendepunkt im Temperaturverlauf)

Der Verlauf der Wandtemperatur des Resonanzröhrchens in den einzelnen Segmenten für den Betrieb mit Schlauchheizung ist in Abbildung B1.11 dargestellt. Bis zur Sekunde 200 sind hohe Temperaturgradienten über die Höhe des Resonanzröhrchens festzustellen. Ab der 200 Sekunde findet eine deutliche Vergleichmäßigung der Temperaturen statt, die in der Sekunde 900 nahezu vollständig abgeschlossen ist. Ab diesem Zeitpunkt hat sich das Messgerät stabilisiert und ist für die Messung im Abgas bereit.

Abbildung B1.12 zeigt den Verlauf der Fluidtemperatur (Gastemperatur) im Resonanzröhrchen im Betrachtungszeitraum von 900 Sekunden. Im Segment 0, welche die Grundplatte repräsentiert, findet eine Aufheizung des Gases über den gesamten Betrachtungszeitraum statt. Zwischen den Segmenten 1 bis 16 kühlt das Fluid leicht ab und weist ab der Sekunde 200 über die gesamte Höhe des Resonanzrohres eine nahezu gleichmäßige Temperatur auf.

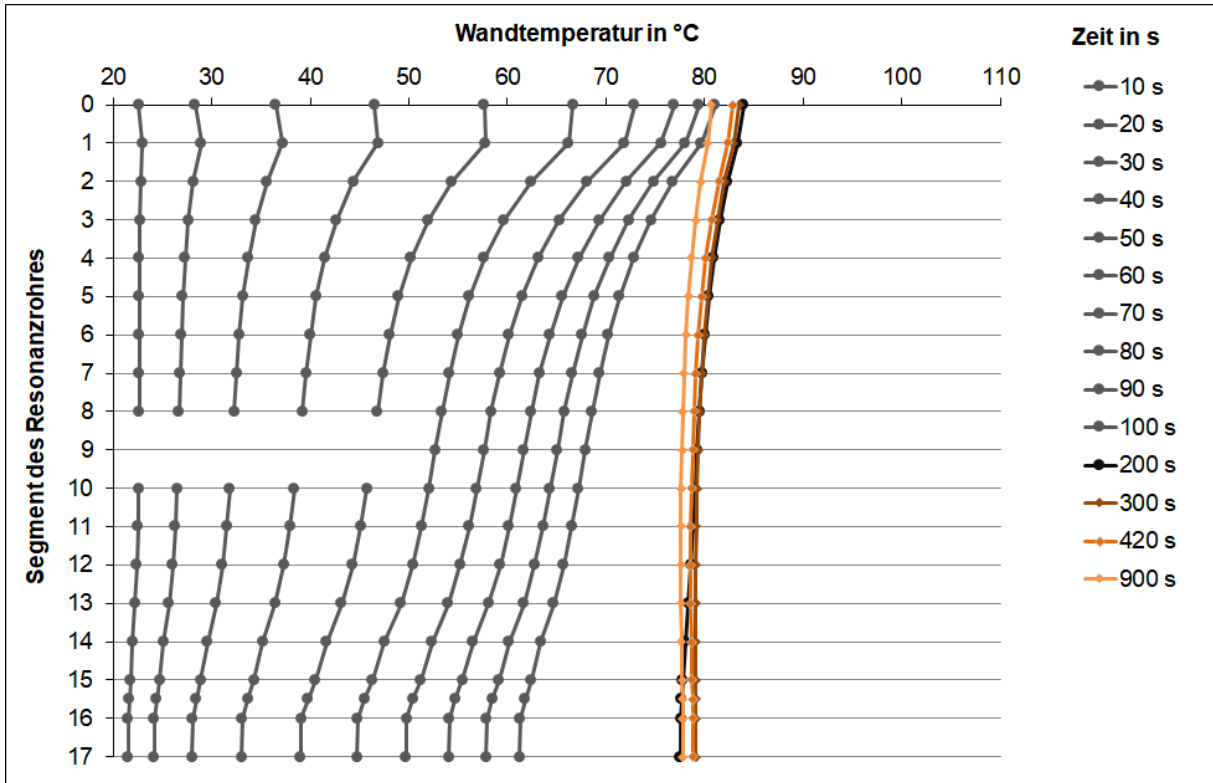


Abbildung B1.11 Verlauf der Wandtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (mit Schlauchheizung) im Betrachtungszeitraum von 900 s

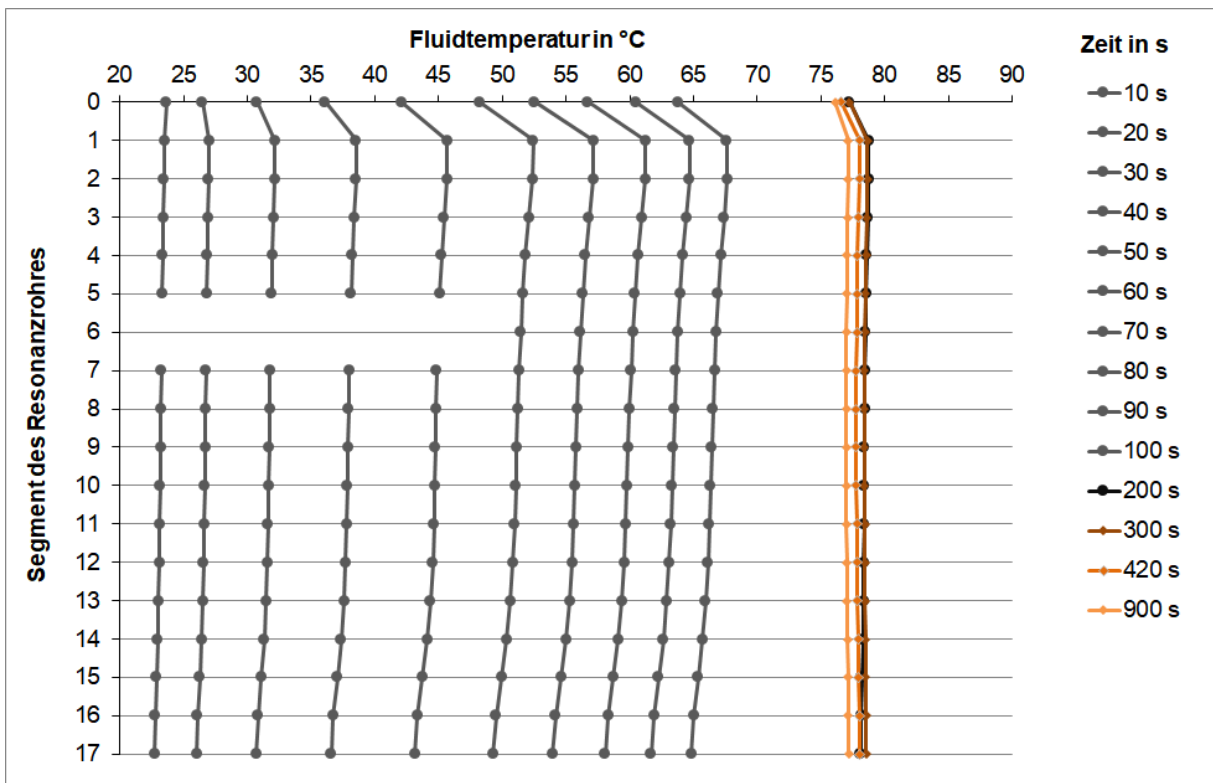
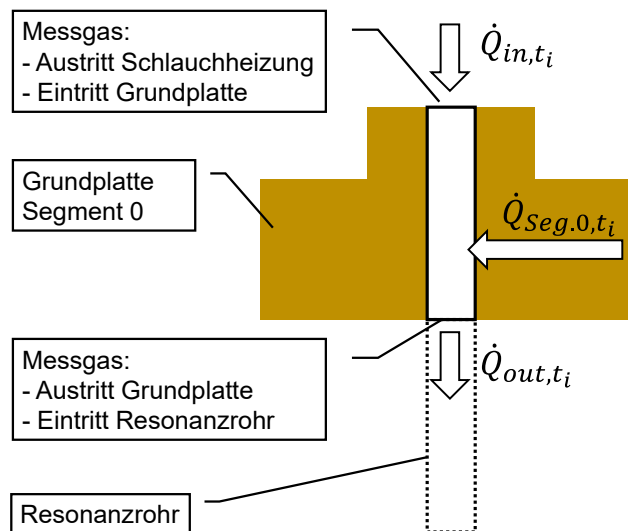


Abbildung B1.12 Verlauf der Fluidtemperatur in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (mit Schlauchheizung) im Betrachtungszeitraum von 900 s

### B1.3 Simulationsrechnungen mit anderer Gaszusammensetzung

Während der Aufheiz- und Stabilisierungsphase wird Umgebungsluft von dem Messgerät abgesaugt. Wird die Absaugsonde des Messgeräts nach der Stabilisierungsphase in das Abgasrohr eingeführt, ändert sich die Zusammensetzung des Messgases, welches durch das Messgerät strömt. Auch während der Abgasmessung kann sich die Gaszusammensetzung ändern, wenn z.B. der Luftüberschuss der Feuerung plötzlich ansteigt.

Bei einer Änderung der Gaszusammensetzung ändert sich auch die spezifische Wärmekapazität des Messgases im Resonanzröhrchen, wodurch sich der Temperaturverlauf im Resonanzrohr und damit der Elastizitätsmodul in bestimmten Segmenten verändern können. Dies kann zu einer verstärkten Gerätedrift führen. Deshalb wurde die Auswirkung einer Änderung der Wärmekapazität auf den Verlauf der Temperatur im Resonanzröhrchen anhand von Simulationsrechnungen untersucht. Abbildung B1.13 zeigt das Wärmebilanzschema der Grundplatte (Segment 0) für das Sensormodul des Wöhler SM 500.



**Abbildung B1.13** Schema der Wärmebilanz für die Grundplatte (Segment 0) im Sensormodul Wöhler SM 500

Findet eine Aufwärmung des Messgases in der Grundplatte statt, so ist ein Wärmestrom aus der Grundplatte  $\dot{Q}_{Seg.0,t_i}$  in den Messgasstrom gerichtet und die Höhe dieses Wärmestroms ergibt sich entsprechend Gleichung B1 aus der Differenz zwischen dem Eingangswärmestrom  $\dot{Q}_{in,t_i}$  und dem Ausgangswärmestrom  $\dot{Q}_{out,t_i}$  :

$$\dot{Q}_{Seg.0,t_i} = \dot{Q}_{out,t_i} - \dot{Q}_{in,t_i} \tag{Gl. B1}$$

mit

- $\dot{Q}_{Seg.0,t_i}$  Wärmestrom aus der Grundplatte (Segment 0) in J/s zum Zeitpunkt  $t_i$
- $\dot{Q}_{in,t_i}$  Wärmestrom in die Grundplatte in J/s zum Zeitpunkt  $t_i$
- $\dot{Q}_{out,t_i}$  Wärmestrom aus der Grundplatte (Segment 0) in J/s zum Zeitpunkt  $t_i$

Der Wärmestrom aus der Grundplatte ist maßgeblich durch die Temperaturdifferenz zwischen der Bauteiltemperatur der Grundplatte und der Fluidtemperatur bestimmt. Für die folgenden theoretischen Überlegungen soll der Wärmestrom aus der Grundplatte als konstant angenommen werden:

$$\dot{Q}_{Seg,0} = \dot{Q}_{Seg,0,t_i} = \dot{Q}_{Seg,0,t_{i+1}} \quad \text{Gl. B2}$$

Damit ergibt sich, in Verbindung mit Gleichung B1, für die Ein- und Ausgangswärmeströme für die Zeitpunkte  $t_i$  und  $t_{i+1}$ :

$$\dot{Q}_{out,t_{i+1}} - \dot{Q}_{in,t_{i+1}} = \dot{Q}_{out,t_i} - \dot{Q}_{in,t_i} \quad \text{Gl. B3}$$

Die Ein- und Ausgangswärmeströme lassen sich mittels der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  in Abhängigkeit des Gasmassenstroms  $\dot{m}_{Gas}$  und der Temperatur  $\vartheta_{in,out}$  für die Zeitpunkte  $t_i$  und  $t_{i+1}$  berechnen:

$$\dot{m}_{Gas} \cdot c_{p,t_{i+1}} \cdot (\vartheta_{out,t_{i+1}} - \vartheta_{in,t_{i+1}}) = \dot{m}_{Gas} \cdot c_{p,t_i} \cdot (\vartheta_{out,t_i} - \vartheta_{in,t_i}) \quad \text{Gl. B4}$$

mit

$$\dot{m}_{Gas} = konst$$

$c_{p,t_i}$  Wärmekapazität von Gas zum Zeitpunkt  $t_i$  (z.B. Luft)

$c_{p,t_{i+1}}$  Wärmekapazität von Gas zum Zeitpunkt  $t_{i+1}$  (z.B. Abgas)

ergibt sich dann:

$$\Delta\vartheta_{t_{i+1}} = \frac{c_{p,t_i}}{c_{p,t_{i+1}}} \cdot \Delta\vartheta_{t_i} \quad \text{Gl. B5}$$

Die Eingangstemperatur  $\vartheta_{in,t_i}$  wird durch die Schlauchheizung eingeregelt, somit gilt:

$$\vartheta_{in,t_i} = \vartheta_{in,t_{i+1}} = konst. \quad \text{Gl. B6}$$

Je nach Änderung der Wärmekapazität für den Zeitschritt  $t_{i+1}$  im Vergleich zum vorangegangenen Zeitschritt  $t_i$  ergeben sich sowohl für die spezifischen Wärmekapazitäten  $c_{p,t_{i+1}}$  und  $c_{p,t_i}$  als auch für die Temperaturdifferenzen  $\Delta\vartheta_{t_{i+1}}$  und  $\Delta\vartheta_{t_i}$  folgende Zusammenhänge:

Fall	Wärmekapazität		Temperatur
<b>A</b>	$c_{p,t_{i+1}} = c_{p,t_i}$	$c_{p,t_i}/c_{p,t_{i+1}} = 1$	$\Delta\vartheta_{t_{i+1}} = \Delta\vartheta_{t_i}$
<b>B</b>	$c_{p,t_{i+1}} > c_{p,t_i}$	$c_{p,t_i}/c_{p,t_{i+1}} < 1$	$\Delta\vartheta_{t_{i+1}} < \Delta\vartheta_{t_i}$
<b>C</b>	$c_{p,t_{i+1}} < c_{p,t_i}$	$c_{p,t_i}/c_{p,t_{i+1}} > 1$	$\Delta\vartheta_{t_{i+1}} > \Delta\vartheta_{t_i}$

Um den Einfluss einer Änderung der spezifischen Wärmekapazität auf die Wandtemperatur des Resonanzröhrchens zu untersuchen, wurden weitere Simulationsrechnungen durchgeführt. Hierfür wurde das Simulationsmodell und alle Randbedingungen aus den Berechnungen mit Heizschlauch genutzt, wobei als Startpunkte für die weiteren Berechnungen die Ergebnisse ab der Sekunde 300 und ab Sekunde 900 verwendet wurden. Für die hierauf nachfolgenden Zeitschritte wurde die Messgaszusammensetzung geändert. Statt Umgebungsluft wird mit einer typischen Abgaszusammensetzung für eine Biomassefeuerung bei vollständiger Verbrennung gerechnet, siehe Tabelle B1.1.

**Tabelle B1.1 Simulationsrechnungen mit typischer Abgaszusammensetzung für Biomassekessel**

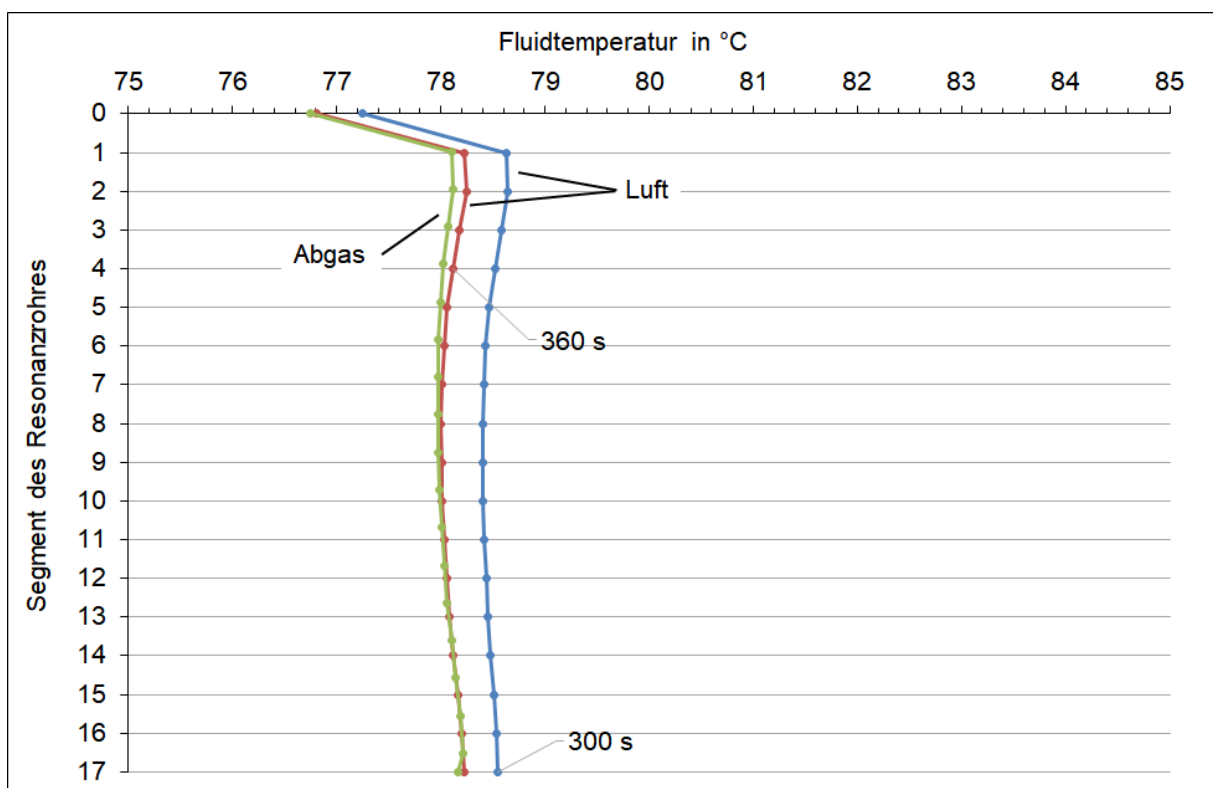
Komponente	Konzentration in Vol.%
Kohlenstoffdioxid CO <sub>2</sub>	9,9
Wasser H <sub>2</sub> O	10,0
Sauerstoff O <sub>2</sub>	9,3
Stickstoff N <sub>2</sub>	70,8

In Tabelle B1.2 sind die Randbedingungen für die berechneten Zeitintervalle ab Sekunde 300 bzw. ab Sekunde 900 und die gewählten Zeitschritte aufgetragen. Für das Zeitintervall Sekunde 300 - 360 ergibt sich eine mittlere Gastemperatur am Ausgang des Heizschlauches (Eingang Segment 0) von 75,78°C. Die für dieses Zeitintervall berechneten spezifischen Wärmekapazitäten für Luft und für die angenommene typische Abgaszusammensetzung bei der entsprechenden mittleren Fluidtemperatur unterscheiden sich um ca. 5 %.

**Tabelle B1.2 Berechnete Zeitintervalle, Zeitschritte und Gastemperatur T<sub>s</sub> (Eingang Segment 0) mit spezifischer Wärmekapazität von Luft c<sub>p,L</sub> und Abgas c<sub>p,Abg</sub> (Zusammensetzung siehe Tabelle B1.1)**

Zeitintervall [s]	Zeitschritt [s]	T <sub>s</sub> [°C]	c <sub>p,L</sub> [J/(kg K)]	c <sub>p,Abg</sub> [J/(kg K)]
300 – 360	60	75,78	1.034,2916	1.088,4698
900 – 908	2	75,03	1.034,1047	1.088,3719
900 – 920	10	75,03	1.034,1047	1.088,3719
900 – 930	30	75,03	1.034,1047	1.088,3719
900 – 960	60	75,03	1.034,1047	1.088,3719

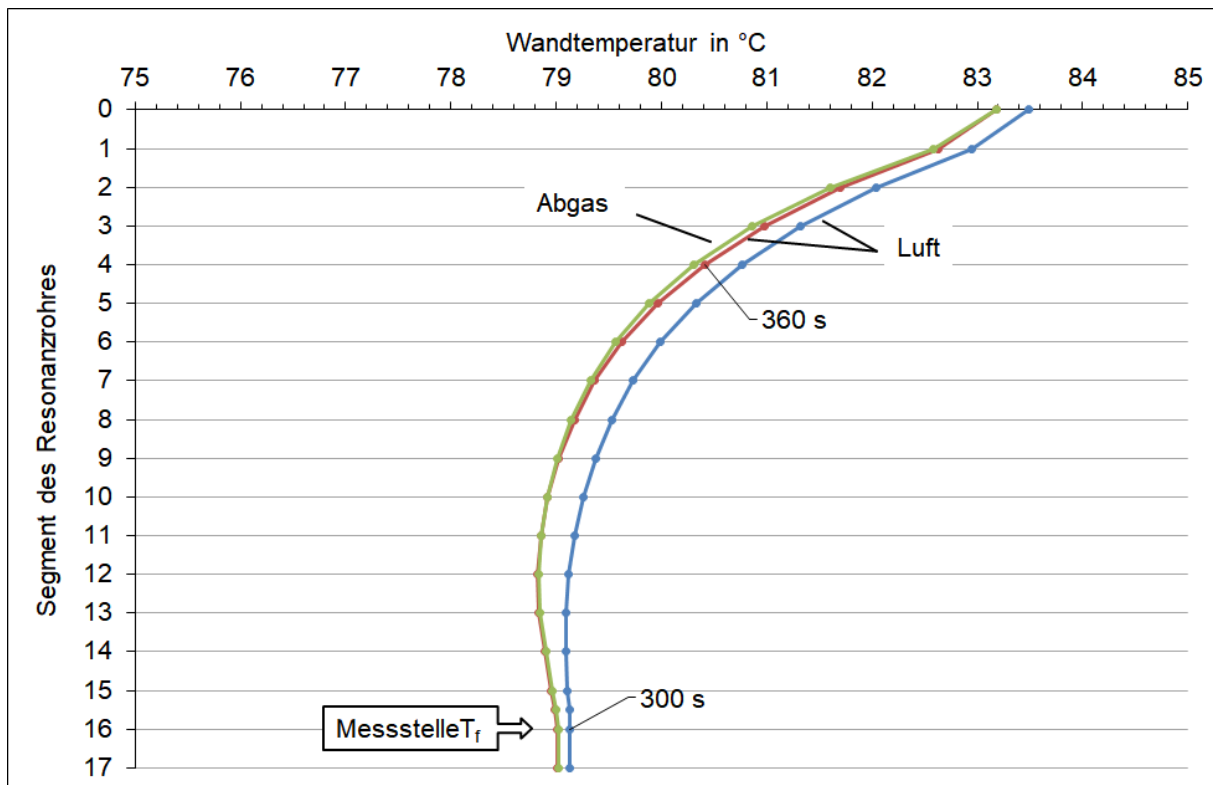
Abbildung B1.14 zeigt beispielhaft den Verlauf der Fluidtemperatur (Gastemperatur) für die einzelnen Segmente des Resonanzröhrchens für die Sekunde 300 und die Sekunde 360. Die Temperaturverläufe für Gas mit der Zusammensetzung von Luft werden für die 300. Sekunde durch die blaue Kurve und für die 360. Sekunde durch die rote Kurve wiedergegeben. Ändert sich allerdings nach der 300. Sekunde die Gaszusammensetzung (Abgaszusammensetzung nach Tabelle B1.1 statt Luft) stellt sich auch ein etwas anderer Verlauf der Fluidtemperatur ein (grüne Kurve). So ist zwischen den Segmenten 0 bis Segment 8 ist eine Abweichung der Fluidtemperatur für Luft und Abgas festzustellen. Durch die höhere spezifische Wärmekapazität des Abgases wird dieses in Segment 0, welches die Grundplatte repräsentiert, nicht so stark aufgewärmt. Somit hat das Abgas eine geringere Temperatur in Sekunde 360 als Luft. Ab Segment 9 ist die Temperatur der beiden Gase wieder identisch.



**Abbildung B1.14 Verlauf der Fluidtemperatur in den einzelnen Segmenten des Resonanzröhrchens im Wöhler SM 500 (mit Schlauchheizung) für Luft und Abgas im Zeitintervall Sekunde 300 bis 360**

Für Luft ist der Verlauf der Wandtemperatur in den einzelnen Segmenten des Resonanzröhrchens als blaue Kurve für die Sekunde 300 und als rote Kurve für die Sekunde 360 in Abbildung B1.15 dargestellt. Ändert sich nach der Sekunde 300 die Gaszusammensetzung von Luft in Abgas ergibt sich der grün dargestellte Kurvenverlauf. Zwischen den Segmenten 0 bis Segment 8 ergibt sich eine geringe Abweichung der Wandtemperatur, wenn sich die Fluidzusammensetzung von Luft auf Abgas ändert. Ab dem Segment 9 sind beide Wandtemperaturen wieder identisch.





**Abbildung B1.15 Verlauf der Wandtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres im Wöhler SM 500 (mit Schlauchheizung) für die Medien Luft und Abgas im Zeitintervall Sekunde 300 bis 360**

Abbildung B1.16 zeigt die berechneten Wandtemperaturen ausgewählter Segmente für das Zeitintervall Sekunde 900 bis 960, d.h. nach der Stabilisierungsphase von 900 Sekunden. Die Wandtemperatur des jeweiligen Segments des Resonanzröhrchens für den berechneten Zeitschritt Sekunde 900 bis 960 ist für das Fluid Luft als rote Linie und für das Fluid Abgas in Grautönen dargestellt. Bei einer Änderung der Gaszusammensetzung stellt sich die Wandtemperatur auf ein niedrigeres Temperaturniveau ein. Dabei sind die Segmente 2 bis 6 am stärksten betroffen. Die Wandtemperatur von Segment 0, welches die Grundplatte und Segment 16, welches die Temperatur  $T_f$  repräsentiert, bleiben nahezu unverändert.

Abbildung B1.17 zeigt die Differenz der Wandtemperatur über der Höhe des Resonanzröhrchens für das Zeitintervall Sekunde 300 bis 360 und Sekunde 900 bis 960. Es ist ersichtlich, dass im Zeitintervall Sekunde 300 bis 360, eine Änderung der Gaszusammensetzung den größten Einfluss auf die Wandtemperatur im Segment 3 in Höhe von  $-0,117\text{ °C}$  hat. Im Zeitintervall Sekunde 900 bis 960 ist eine Änderung der Wandtemperatur im Segment 3 in Höhe von  $-0,084\text{ °C}$  festzustellen. Dies bedeutet, wenn ab der Sekunde 900 Abgas durch das Resonanzröhrchen strömt, ist im Segment 3 die Wandtemperatur zur Sekunde 960 um  $-0,084\text{ °C}$  geringer, als wenn über die gesamte Zeit Luft durch das Resonanzröhrchen strömt. An der Messstelle  $T_f$  im Segment 16 ist eine Abweichung von  $0,012\text{ °C}$  im Zeitintervall 300 bis 360 und eine Abweichung von  $-0,017\text{ °C}$  im Zeitintervall 900 bis 960 festzustellen.

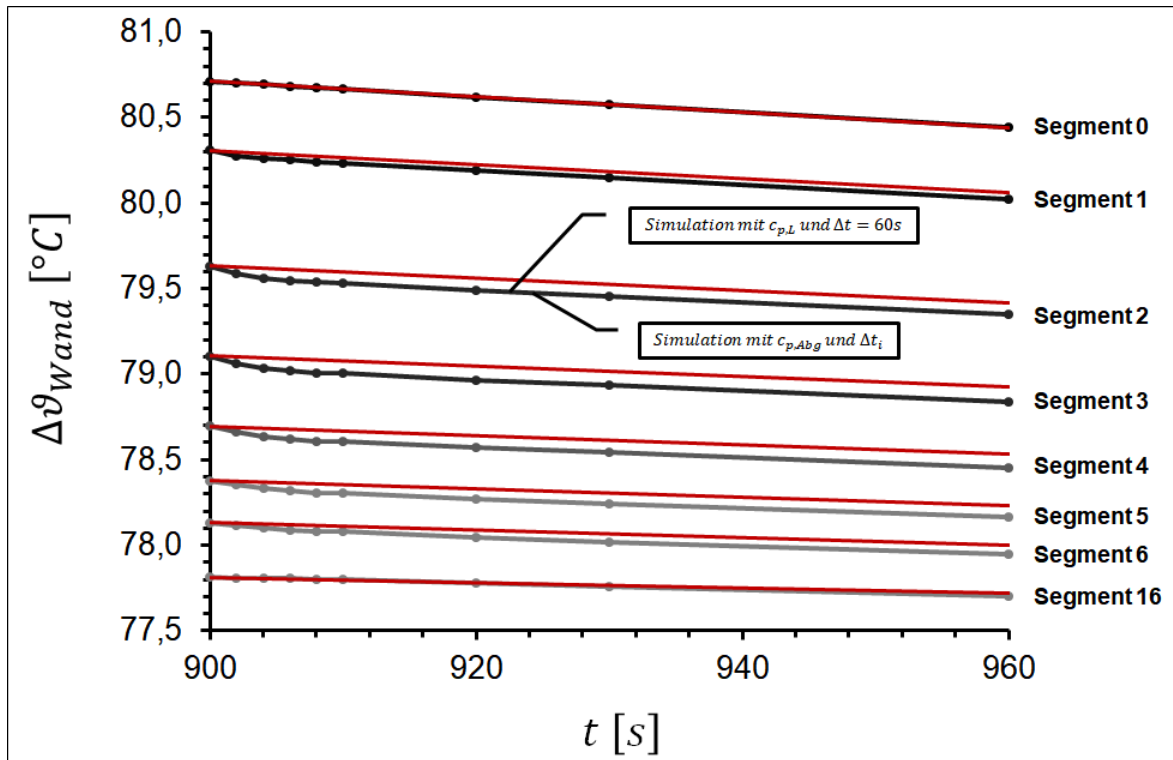


Abbildung B1.16 Simulierter Temperaturverlauf der Wandtemperatur bei Änderung der Gaszusammensetzung in dem Zeitintervall Sekunde 900 bis 960

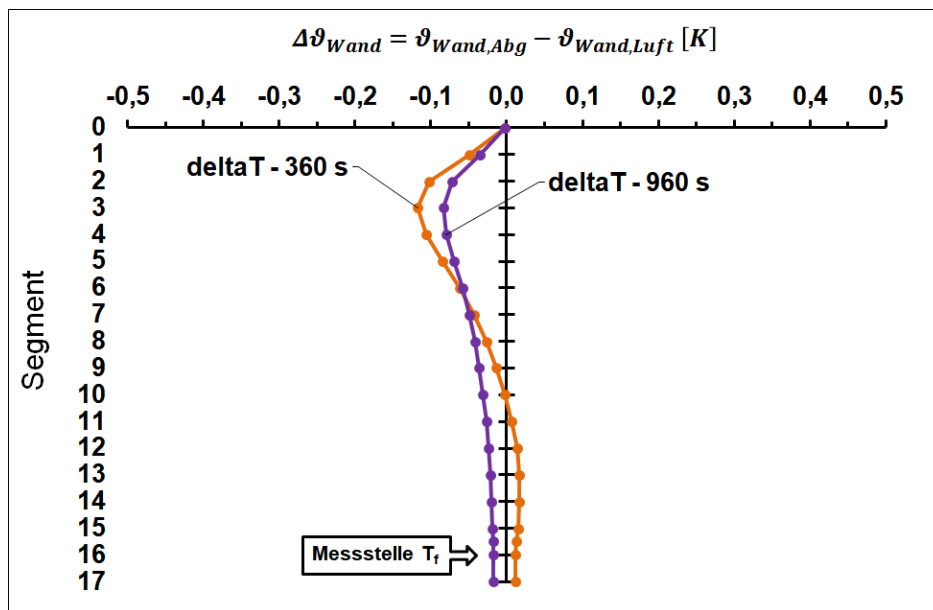
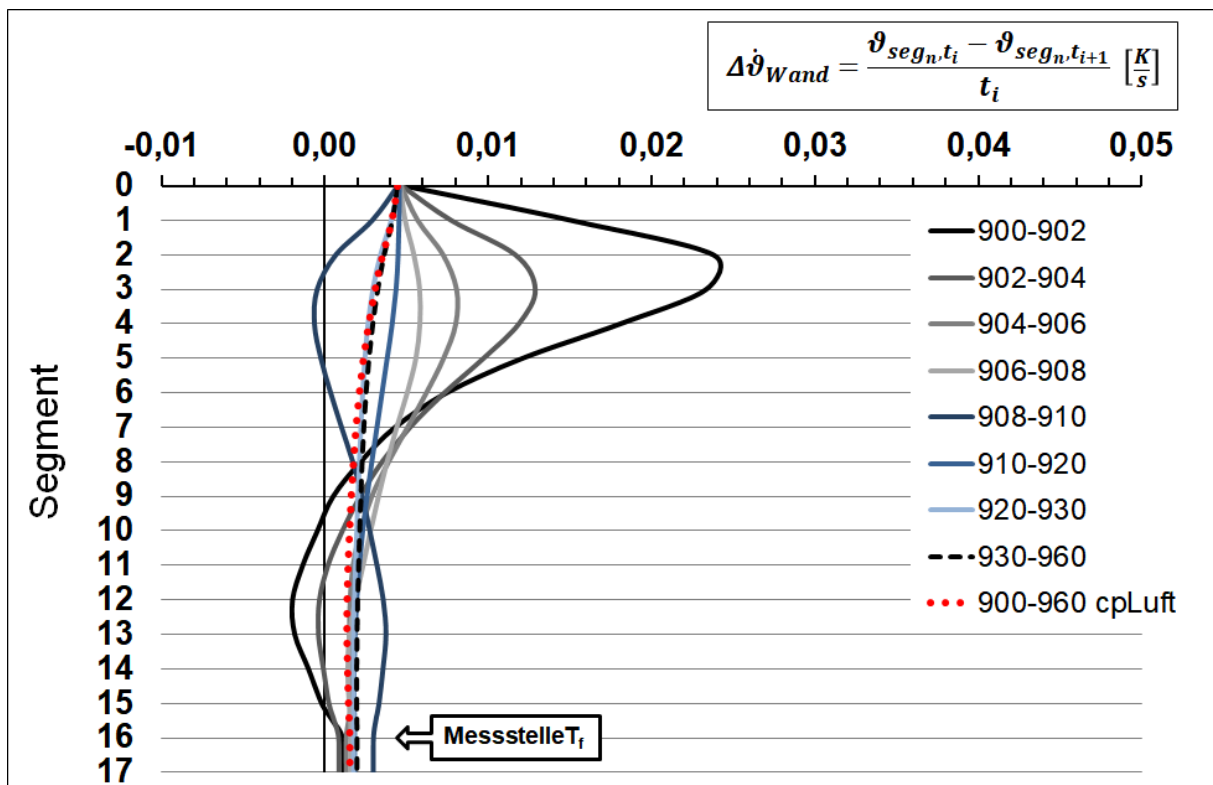


Abbildung B1.17 Differenz der Wandtemperatur vom Resonanzröhrchen bei Änderung der Gaszusammensetzung im Zeitintervall Sekunde 300 bis 360 und 900 bis 960

Die Temperatur an der Messstelle  $T_f$  im Segment 16 wird im Messgerät Wöhler SM 500 als Eingangsgröße zur Korrektur des Elastizitätsmoduls des Resonanzröhrchens herangezogen. Ändert sich die Gaszusammensetzung, ändert sich auch die Wandtemperatur und damit auch der E-Modul im ersten Drittel des Resonanzröhrchens. Die Temperatur an der Messstelle  $T_f$

ändert sich allerdings nicht im gleichen Maße. Damit wird bei der E-Modulkorrektur die Temperaturänderung nicht adäquat abgebildet. Die Messstelle  $T_f$  ist für diese Fälle nicht mehr repräsentativ für das gesamte Resonanzröhrchen.

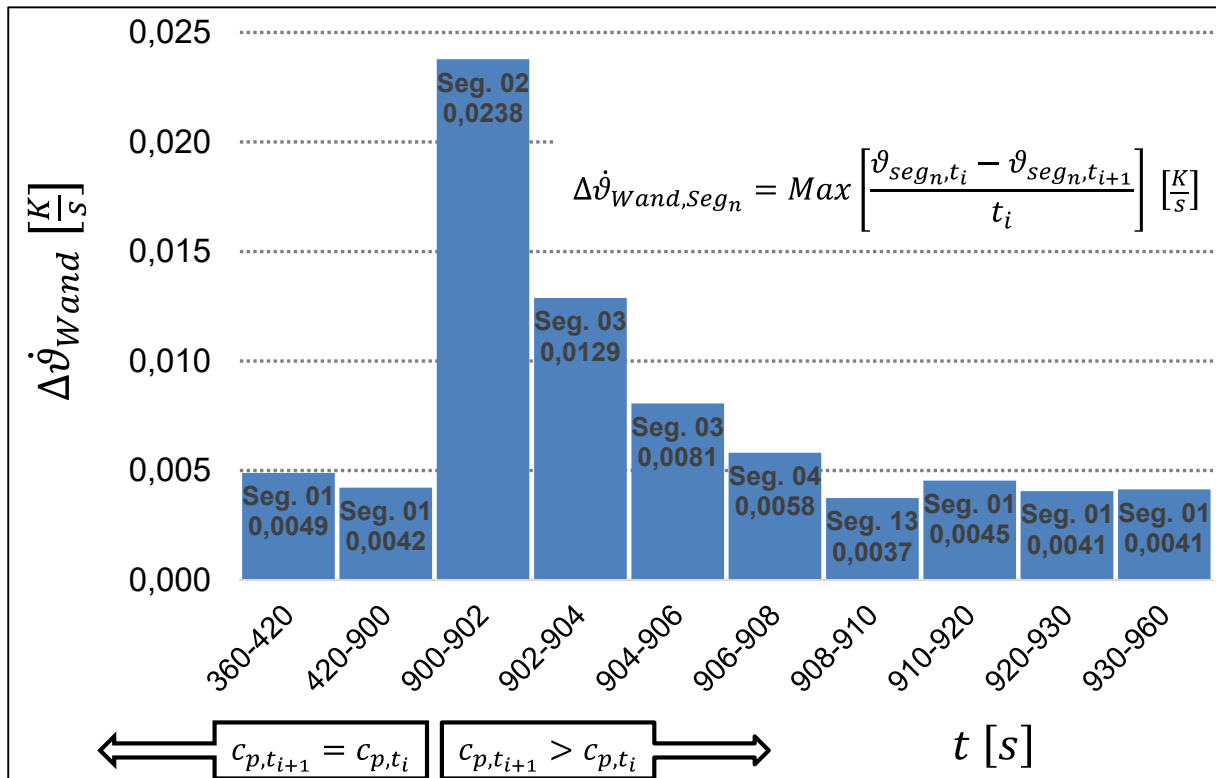
Abbildung B1.18 zeigt die zeitliche Temperaturänderung der Segmente 0 bis 17 des Resonanzröhrchens im Zeitintervall 900 bis 960. Das Segment 0, welches die Grundplatte repräsentiert, hat über das gesamte betrachtete Zeitintervall die gleiche zeitliche Temperaturabnahme und ein Einfluss auf Grund einer Änderung der Messgaszusammensetzung ist nicht fest zu stellen. Das Resonanzröhrchen im Segment 2 erfährt durch die Änderung der Messgaszusammensetzung in den ersten Sekunden die größte Temperaturänderung in Höhe von 0,0238 K/s. Die zeitliche Temperaturänderung wird dann von Zeitschritt zu Zeitschritt immer kleiner. Im Zeitintervall 908 - 910 ist sogar ein „überschwingen“ der zeitlichen Temperaturänderung fest zu stellen. Für die Messgasfluide Abgas und Luft ist ab der Sekunde 960 die gleich zeitliche Temperaturänderung über die Höhe des Resonanzröhrchens festzustellen.



**Abbildung B1.18** Zeitliche Änderung der Wandtemperatur bei Änderung der Gaszusammensetzung im Zeitintervall Sekunde 900 bis 960

An der Messstelle  $T_f$  ist die zeitliche Temperaturänderung über das gesamte Zeitintervall Sekunde 900 bis 960 gering, d.h. die größeren Temperaturänderungen in den ersten Segmenten des Resonanzröhrchens werden zur Korrektur des E-Moduls nicht erfasst. Nach ca. 30 bis 60 Sekunden hat sich die zeitliche Temperaturabnahme über die Höhe des Resonanzröhrchens wieder angeglichen.

In den einzelnen Segmenten des Resonanzröhrchens ändern sich bei wechselnder Gaszusammensetzung die Temperaturen im zeitlichen Verlauf unterschiedlich. Abbildung B1.19 zeigt für die Zeitintervalle Sekunde 360 - 900 und Sekunde 900 - 960 jeweils das Segment mit der größten zeitlichen Temperaturänderung und damit das Segment, in welchem die größte Änderung des E-Moduls auftritt.

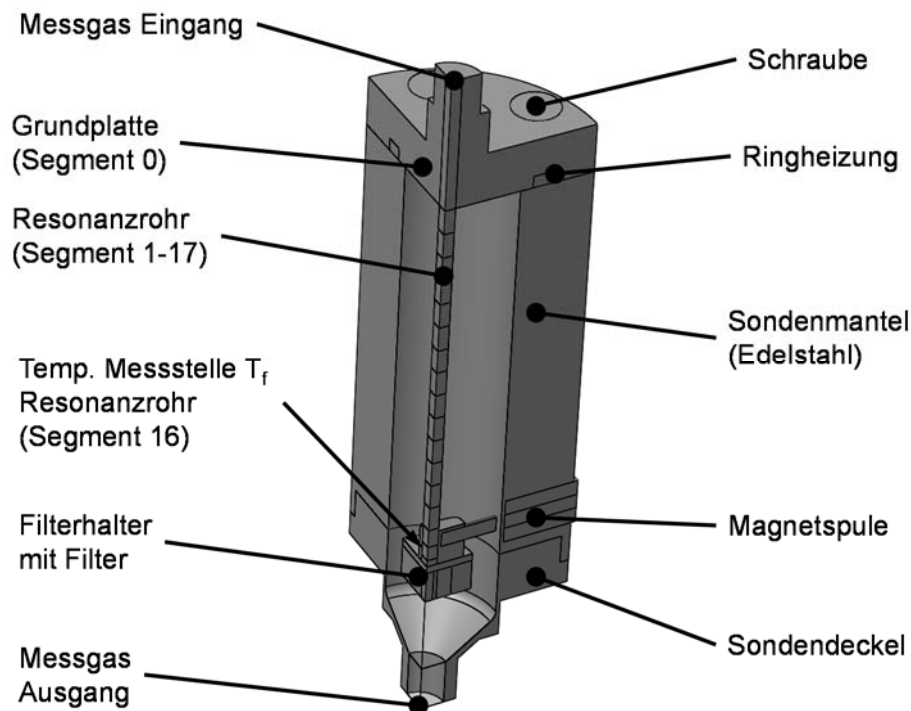


**Abbildung B1.19 Segment des Resonanzröhrchens mit der größten zeitliche Änderung der Wandtemperatur bei Änderung der Gaszusammensetzung in den Zeitintervallen Sekunde 360 - 900 und 900 - 960**

Vor einer Änderung der Gaszusammensetzung im Zeitintervall Sekunde 360 - 420, d.h. die spezifische Wärmekapazität  $c_{p,t_{i+1}} = c_{p,t_i}$ , liegt die größte zeitliche Temperaturänderung in Segment 1. Sobald sich ab dem Zeitschritt 900 die Gaszusammensetzung ändert, d.h. die spez. Wärmekapazität  $c_{p,t_{i+1}} > c_{p,t_i}$ , befindet sich die größte zeitliche Temperaturänderung zuerst im Segment 2 und wandert dann zu Segment 3 (Zeitintervall Sekunde 902 - 904 und 904 - 906). Im Zeitintervall Sekunde 906 - 908 findet die größte zeitliche Temperaturabnahme im Segment 4 und im Zeitintervall Sekunde 908 - 910 im Segment 13 statt. Ab dem Zeitschritt Sekunde 910 hat sich im Segment 1 mit einer nahezu konstanten zeitlichen Temperaturabnahme von ca. 0,004 K/s das System stabilisiert. Diese zeitliche Temperaturabnahme entspricht auch der zeitlichen Temperaturabnahme, bevor sich die Messgaszusammensetzung geändert hatte.

## B1.4 Untersuchung zur Verkürzung der Stabilisierungszeit

In den vorangegangenen Simulationen zeigte sich, dass in der Grundplatte eine Aufwärmung des Messgases stattfindet und diese einen großen Einfluss bezüglich der Wandtemperatur und der Stabilisierung des Staubmassesensors hat. Deshalb soll in einer weiteren Simulationsrechnung die Grundplatte für eine schnelle Aufheizung aktiv genutzt werden. Eine aktive Beheizung der Grundplatte soll durch eine Ringheizung realisiert werden. Diese soll den bisher vorhandenen O-Ring, welcher die Grundplatte und das Sensorgehäuse abdichtet, ersetzen (siehe Abbildung B1.20). Um den Wärmeeintrag von der Grundplatte in das Sondenmantel zu begrenzen, wird der Sondenmantel in Edelstahl anstatt wie bisher in Messing ausgeführt. Die Heizpatronen, welche sich normalerweise im Sondenmantel befinden, sollen bei diesen Rechnungen nicht genutzt werden. Alle anderen Randbedingungen werden aus der Simulation mit Schlauchheizung übernommen. Tabelle B1.3 gibt alle relevanten Eingangsgrößen und Änderungen für die Simulation wieder.

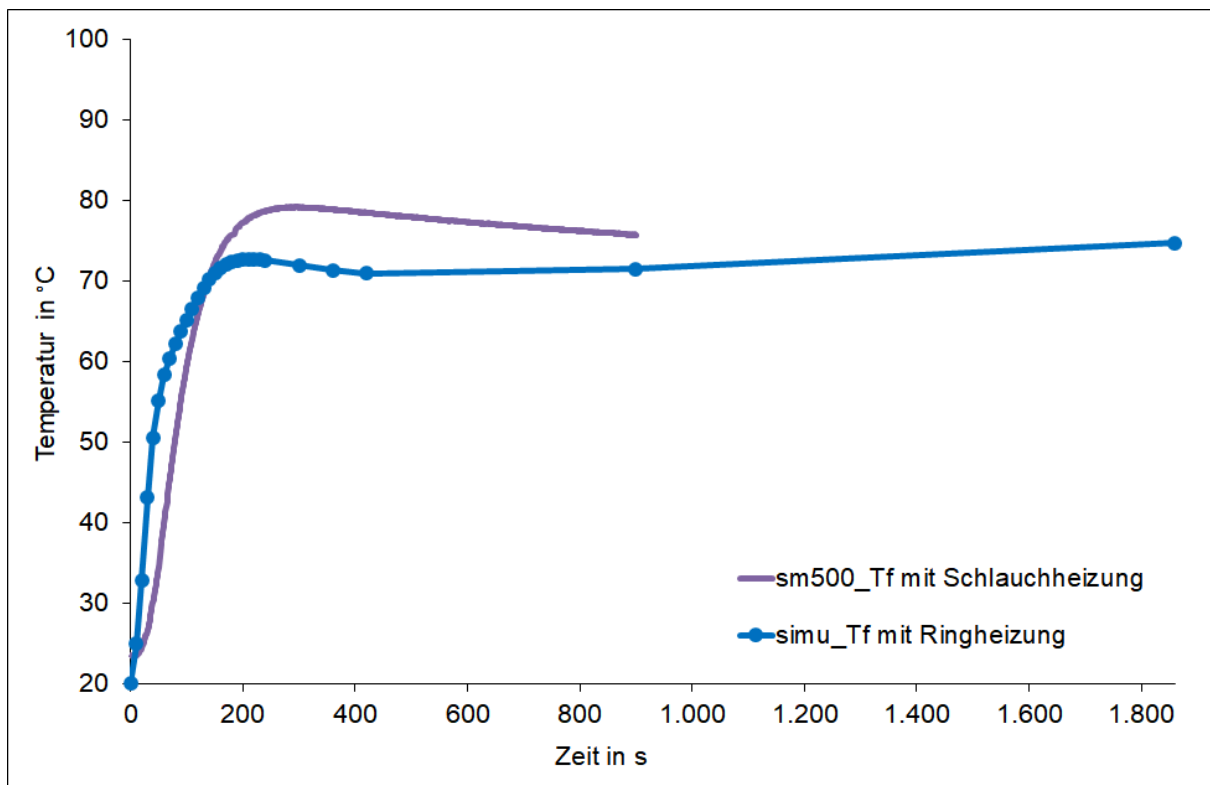


**Abbildung B1.20** Aufbau des CFD-Modells für den Staubmassensensor des Wöhler SM 500 mit Ringheizung zur Verkürzung der Stabilisierungszeit

In Abbildung B1.21 ist der simulierte Temperaturverlauf mit Ringheizung bis zur Sekunde 1.860 für die Messstelle Resonanzrohr  $T_f$  bei einer Einschaltdauer der Ringheizung von 30 Sekunden bei 100 % Heizleistung und danach dauerhaft mit 1 % Heizleistung in Blau (simu\_Tf mit Ringheizung) dargestellt (Schlauchheizung war ebenfalls in Betrieb). Im Vergleich hierzu ist der gemessene Temperaturverlauf des unveränderten Sensormoduls vom Wöhler SM 500 in Violett (sm500\_Tf mit Schlauchheizung) bis zur Sekunde 900 dargestellt.

**Tabelle B1.3 Übersicht der Änderungen in der Simulation zur Verkürzung der Stabilisierungszeit**

Bauteil	Änderung										
Schlauchheizung	unverändert, mit Schlauchheizung										
Grundplatte	unverändert, Material Messing										
Sondenmantel	Material Edelstahl										
Heizpatrone im Sondenmantel	keine Heizung, Material Edelstahl										
O-Ring	als Ringheizung ausgeführt, Heizleistung 250 W										
Heizdauer	30 Sekunden mit 100 % Heizleistung, danach dauerhaft mit 1 % (2,5 W) Heizleistung										
Zeitschritte in s	<table border="0"> <tr> <td>Simulationszeit</td> <td>Zeitschritt</td> </tr> <tr> <td>0 - 240 :</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>240 - 420 :</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>420 - 900 :</td> <td>380</td> </tr> <tr> <td>900 - 1.860:</td> <td>960</td> </tr> </table>	Simulationszeit	Zeitschritt	0 - 240 :	10	240 - 420 :	60	420 - 900 :	380	900 - 1.860:	960
Simulationszeit	Zeitschritt										
0 - 240 :	10										
240 - 420 :	60										
420 - 900 :	380										
900 - 1.860:	960										

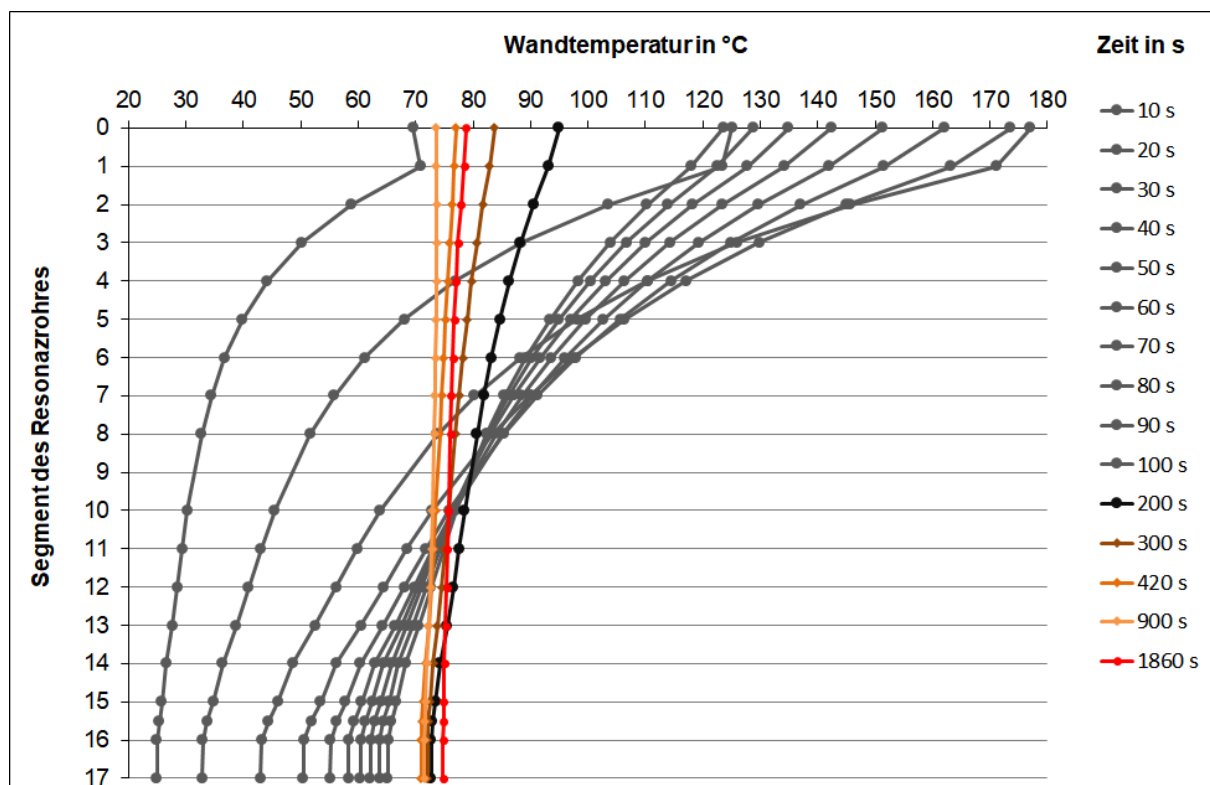


**Abbildung B1.21 Gemessener und simulierter Temperaturverlauf mit Ringheizung für die Messstelle Resonanzrohr  $T_f$  mit Schlauchheizung**

Durch die geänderte Beheizung ist ein steilerer Anstieg der Wandtemperatur des Resonanzrohres an der Messstelle  $T_f$  festzustellen. Nach 30 Sekunden wurde die Ringheizung abgeschaltet, da ein Überhitzen der Grundplatte vorsorglich verhindert werden sollte. In der 200. Sekunde erreicht die Temperatur an der Messstelle  $T_f$  ein Maximum mit 72,7 °C. Obwohl die

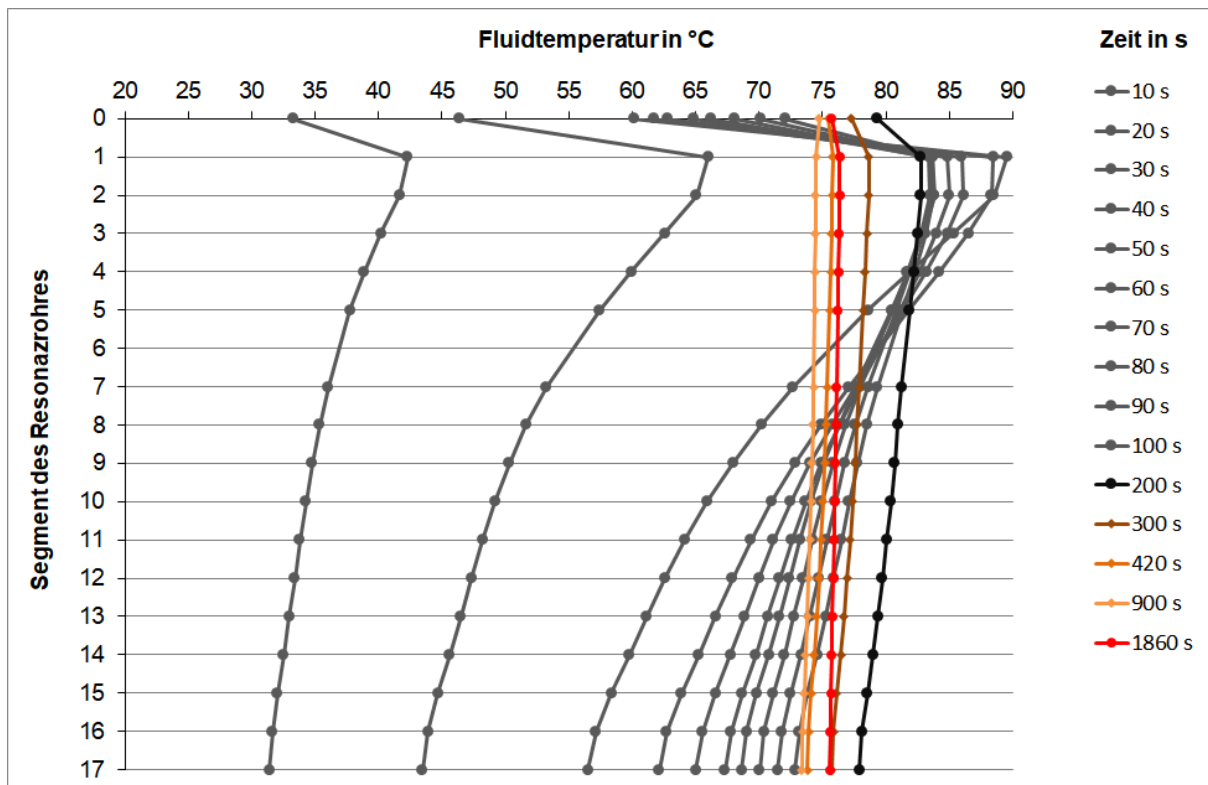
Ringheizung ab der 30. Sekunde auf eine Heizleistung von 1 % (2,5 W) gedrosselt wurde, ändert sich die Steigung in Aufheizphase erst ab der 60. Sekunde merklich. Nach überschreiten der maximalen Temperatur in der Sekunde 200 fällt die Temperatur an der Messstelle  $T_f$  wieder ab. Um die Wärmeverluste durch die Gehäuseoberfläche zu kompensieren, wurde die Ringheizung nicht vollständig abgeschaltet, sondern mit verminderter Leistung weiter betrieben, wodurch sich an der Messstelle  $T_f$  ab Sekunde 900 ein Temperaturanstieg ergibt.

Der Verlauf der Wandtemperatur des Resonanzröhrchens in den einzelnen Segmenten für den Betrieb mit Ringheizung ist in Abbildung B1.22 dargestellt. Bis zur Sekunde 420 sind beim Betrieb des Sensormoduls mit der Ringheizung hohe Temperaturgradienten über die Höhe des Resonanzröhrchens festzugstellen. Ab der 900 Sekunde findet eine deutliche Vergleichmäßigung der Temperaturen statt, die erst in der Sekunde 1.860 nahezu vollständig abgeschlossen ist. Gegenüber der ursprünglichen Konfiguration stellt dies mit einer Vergleichmäßigung der Temperatur ab Sekunde 200 und der Stabilisierung in der Sekunde 900 eine deutliche Verschlechterung der Stabilisierungszeit dar.



**Abbildung B1.22** Verlauf der Wandtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres mit Ringheizung im Betrachtungszeitraum von 1.860 s

Abbildung B1.23 zeigt den zeitlichen Verlauf der mittleren Fluidtemperatur (Gasttemperatur) des Resonanzröhrchens für die berechneten 18 Segmente. Hierbei gibt das Segment 0 die Eintrittstemperatur des Gases in die Grundplatte und die Auswertefläche 1 gibt die Austrittstemperatur von Segment 0 bzw. die Eintrittstemperatur in das Segment 1 wieder. Durch die Ringheizung in der Grundplatte findet eine Aufheizung des Gases im Segment 0 statt.



**Abbildung B1.23** Verlauf der Fluidtemperaturen in den einzelnen Segmenten des Resonanzrohres mit Ringheizung im Betrachtungszeitraum von 1.860 s

In der Sekunde 30 erreicht die Eintrittstemperatur in das Segment 1 ein Maximum in Höhe von 89,6 °C. Nach dem Abschalten der Ringheizung in der Sekunde 30 nimmt die Eintrittstemperatur in das Segment 1 kontinuierlich ab und erreicht in der Sekunde 900 eine Temperatur von 74,5 °C, die knapp unter der Solltemperatur der Schlauchheizung von 75 °C liegt. Zwischen der Sekunde 900 und 1.860 findet durch den weiteren Betrieb der Ringheizung mit 1 % der maximalen Leistung eine leichte Aufheizung des Gases in der Grundplatte statt.

Durch die Ringheizung in der Grundplatte wird eine schnellere Aufheizung des Gases im Resonanzröhrchen an der Messstelle  $T_f$  erreicht (in Sekunde 100: ca. 73°C gegenüber ca. 65°C beim Betrieb mit Heizelementen im Sondenmantel, siehe hierzu Abbildung B1.12). Allerdings geht dies mit einem Überhitzen der Grundplatte (gegenüber der Solltemperatur von 75 °C) einher und es werden dadurch sehr hohe Temperaturgradienten über der Höhe des Resonanzröhrchens erzeugt. Eine Vergleichmäßigung der Temperatur findet dann erst nach einer deutlich längeren Wartezeit statt. Somit konnte insgesamt keine Verkürzung der Stabilisierungsphase durch den Einsatz einer Ringheizung erreicht werden. Diese Maßnahme wurde deshalb nicht weiter verfolgt.



## B2 Messungen mit Entwicklungsvarianten

Mit dem vom Projektpartner Wöhler gelieferten Prototyp (SM 700, Gerät Nr. 3) wurden am IFK sowohl Untersuchungen im Labor mit Raumluft zur Bestimmung des Driftverhaltens als auch Messungen an Feuerungsabgasen durchgeführt. Während den Messungen wurde der Prototyp mehrfach verbessert. Die einzelnen Versionen des Prototyps unterscheiden sich wie folgt:

- SM 700 Nr.3-V1: Entwicklungsstand bei Übergabe Prototyp
- SM 700 Nr.3-V2: Software-Update (u.a. Modellanpassungen)
- SM 700 Nr.3-V3: Austausch elektronischer Bauteile
- SM 700 Nr.3-V4: Behebung der Signalausfälle für Schlauchtemperatur  $T_S$
- SM 700 Nr.3-V5: Kleinere Modellanpassungen.

Mittels der durchgeführten Entwicklungsschleifen konnte das Signalverhalten und die Stabilität des Prototyps merklich verbessert werden. So wurden vor allem das Signalrauschen und die Signalausfälle stark vermindert. Die im Labor und auf dem Feuerungsprüfstand ermittelten Versuchsergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

### B2.1 Messungen im Labor

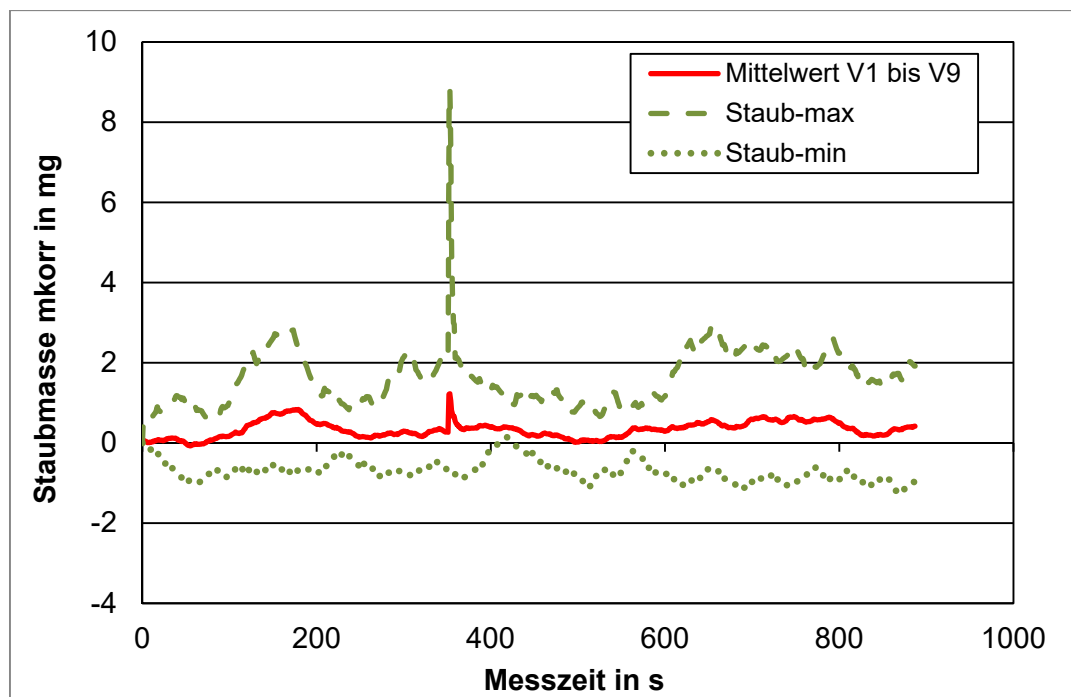
Die Messgerätedriften und die Schwankungsbreite der Messgeräteanzeigen wurden im Labor mit nahezu staubfreier Raumluft untersucht. Die Messdauer betrug hierbei immer 15 Minuten. Beim Messgerät SM 700 Nr.3 wurden folgende Parameter variiert:

- Volumenstrom bei der Probenahme im Bereich von 2,5 bis 7,0 NI/min
- Temperatur der Schlauchheizung und der Gehäuseheizung des Sensormoduls im Bereich von 75 (bisheriger Sollwert) bis 90 °C
- Startbedingung bei der Messung (kaltes Messgerät oder Neustart nach vorangegangener Messung).

Nach dem Einschalten des Messgerätes erfolgt eine Systemüberprüfung. Werden keine Fehler erkannt, kann der Messablauf gestartet werden. Dieser beginnt mit einer Dichtigkeitsprüfung. Im Anschluss daran können Messparameter festgelegt werden. Nach einer kurzen Kalibrierungsphase folgt die Gerätstabilisierung. Im Fall von Abgasmessungen kann anschließend die Sonde in das Abgasrohr eingebaut werden. Nach einer erneuten Stabilisierungsphase im Abgas beginnt dann automatisch die Staubmessung (z.B. für 15 Minuten).

#### B2.1.1 Prototyp SM 700 Nr.3-V1

Mit dieser ersten Variante des Prototyps V1 wurden 9 Labormessungen mit einer Messdauer von jeweils 15 Minuten mit unterschiedlichen Probenahmenvolumenströmen durchgeführt. Die Solltemperaturen der Schlauch- bzw. der Gehäuseheizung wurden jeweils auf 75 °C eingestellt. Die Mittelwerte der vom Messgerät gemessenen Staubmassen (mkorr) und die jeweils ermittelten maximalen (Staub-max) und minimalen Staubmassen (Staub-min) während der Messdauer von 900 s sind in Abbildung B2.1 für die 9 Versuche dargestellt.



**Abbildung B2.1 Prototyp SM 700 Nr.3-V1: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmestrom: 2,5 bis 7,0 l/min)**

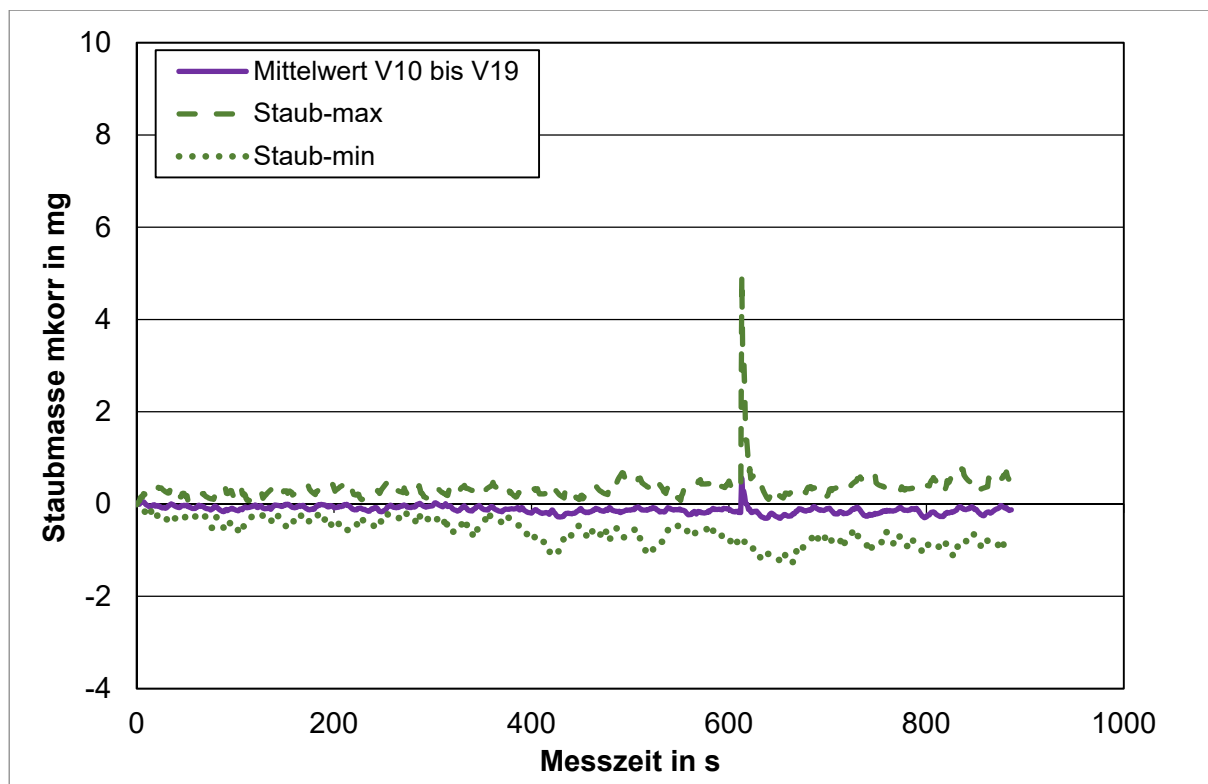
Für die mittlere Drift ergibt sich während der Messdauer meist eine positive Abweichung von der Nulllinie. Der Mittelwert der Drift für die Staubmasse während der Messdauer beträgt 0,34 mg und die Bandbreite liegt zwischen -0,07 und 1,23 mg, mit einem Ausreißer bis über 8 mg aufgrund einer kurzzeitigen Signalstörung bei der Schlauchtemperatur  $T_S$ .

Die Berechnung der Staubkonzentration erfolgt anhand der Differenz zwischen erstem (Sekunde 0) und letztem Messwert (z.B. Sekunde 900) der Staubmasse und des Probenahmestroms. Die für die Versuche V1 bis V9 ermittelte mittlere korrigierte Staubkonzentration mit Umgebungsluft beträgt 10,5 mg/m<sup>3</sup> mit einer Bandbreite von - 20,0 bis 47,7 mg/m<sup>3</sup>.

Aufgrund der, im Vergleich zur geplanten Nutzung des Messgerätes, relativ großen Driften und Bandbreiten der Drift bei Aufgabe von nahezu staubfreier Raumluft war es mit dieser Geräteversion nicht sinnvoll, Realgasmessungen in größerem Umfang und weitere Labormessungen durchzuführen. Stattdessen wurde ein Software-Update vorbereitet und durchgeführt, mit dem u.a. Modellanpassungen vorgenommen wurde.

### B2.1.2 Prototyp SM 700 Nr.3-V2

Mit dem verbesserten Prototyp V2 wurden weitere Labormessungen mit Raumluft durchgeführt. Die Mittelwerte der vom Messgerät gemessenen Staubmassen (mkorr) und die jeweils ermittelten maximalen (Staub-max) und minimalen Staubmassen (Staub-min) während der Messdauer von 900 s sind in Abbildung B2.2 für die insgesamt 7 verwendbaren Versuche in der Versuchsreihe V10 bis V19 dargestellt.



**Abbildung B2.2 Prototyp SM 700 Nr.3-V2: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmestrom: 3,0 bis 7,0 NI/min)**

Insgesamt zeigt die Geräteversion V2 ein deutlich besseres Driftverhalten als die Version 1. Die Mittelwerte der Drift für die dargestellten Versuche liegen näher an der Nulllinie mit überwiegend negativen Abweichungen, die Schwankungen sind deutlich reduziert.

Der Mittelwert der Drift für die Staubmasse während der Messdauer beträgt -0,12 mg und die Bandbreite liegt zwischen -0,31 und 0,56 mg, mit Ausreißern bis nahe 5 mg, wiederum aufgrund kurzzeitiger Signalstörungen bei der Schlauchtemperatur  $T_S$ .

Die für die verwertbaren Versuche in der Reihe V10 bis V19 ermittelte mittlere korrigierte Staubkonzentration mit Umgebungsluft beträgt -3,8 mg/m<sup>3</sup> mit einer Bandbreite von -17,8 bis 3,9 mg/m<sup>3</sup>. Eine Abhängigkeit des Driftverhaltens vom Probenahmestrom konnte für diese Versuche weder bei der Geräteversion 2 noch bei der Version 1 beobachtet werden.

Durch die bei der Geräteversion V2 durchgeführten Anpassungen in der Software konnte eine deutliche Verbesserung der Nullpunktstabilität und des Driftverhaltens gegenüber der Variante 1 erreicht werden.

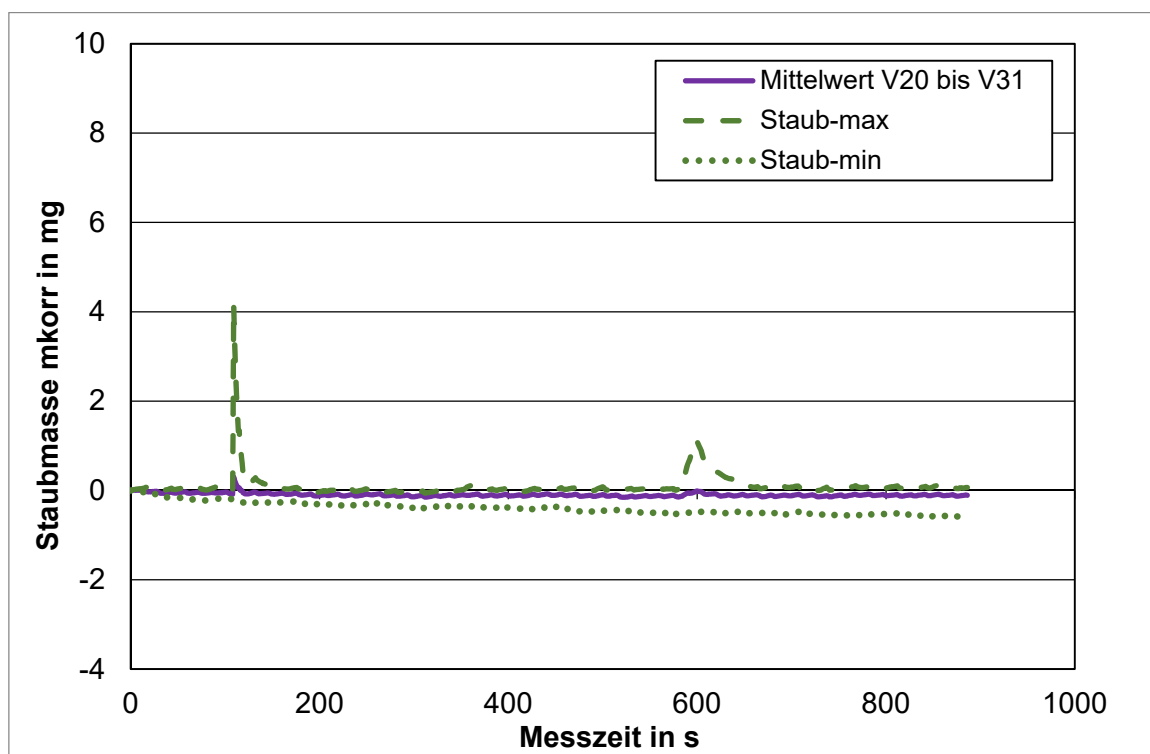
Versuche, bei denen die Temperatur der Schlauchheizung (85 statt 75 °C) und der Gehäuseheizung des Sensormoduls (80 statt 75 °C) erhöht wurde, konnten aufgrund von Signalausfällen der betreffenden Temperaturen nicht zur weiteren Auswertung herangezogen werden.

### B2.1.3 Prototyp SM 700 Nr.3-V3

Um das Signalrauschen und die Nullpunktstabilität weiter zu verbessern, wurde die Geräteversion V2 nochmals verändert. Es wurde ein Austausch elektronischer Bauteile vorgenommen. Mit der Gerätevariante V3 wurden dann sowohl Labor- als auch Realgasmessungen durchgeführt.

Mit dieser Geräteversion V3 (Versuchsreihe V20 bis V58) wurde der Einfluss des Volumensstroms bei der Probenahme und der Temperatur der Schlauchheizung näher untersucht.

Abbildung B2.3 zeigt die Mittelwerte der vom Messgerät gemessenen Staubmassen (mkorr) und die jeweils ermittelten maximalen (Staub-max) und minimalen Staubmassen (Staub-min) bei einem Probenahmestrom: 4,5 NI/min während der Messdauer von 900 s für die in der Versuchsreihe V20 bis V31 verwendbaren 11 Versuche.

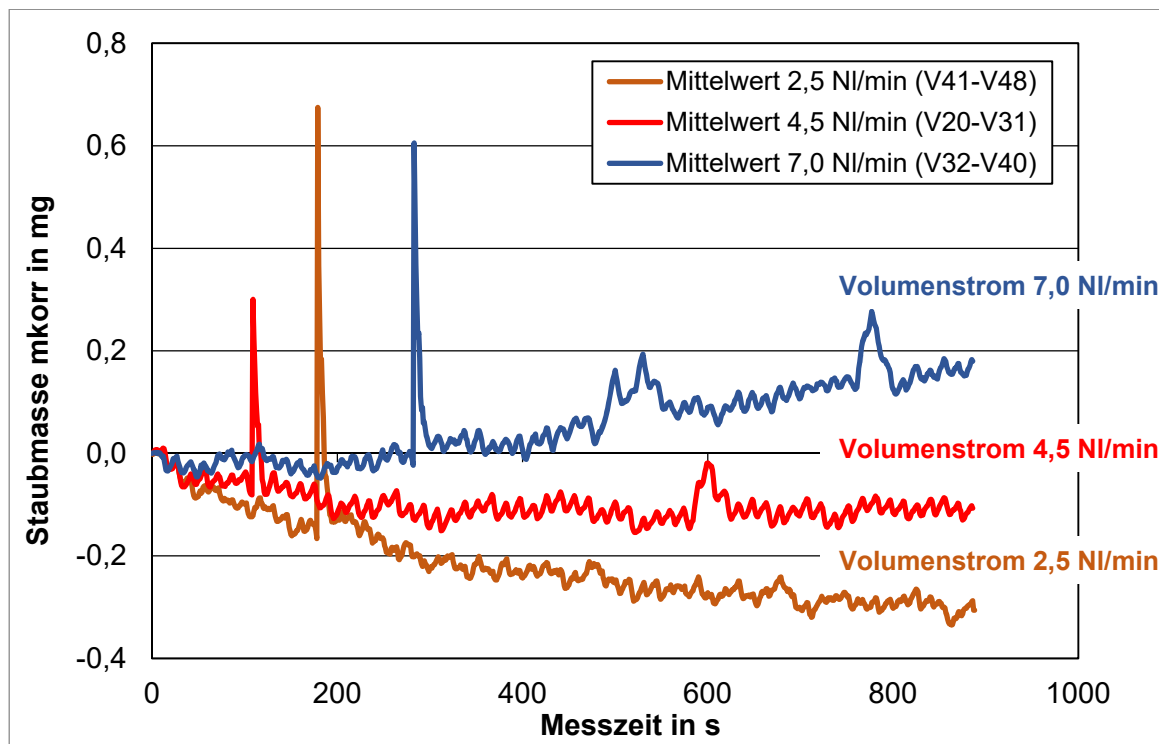


**Abbildung B2.3 Prototyp SM 700 Nr.3-V3: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmestrom: 4,5 NI/min)**

Durch die weiteren Anpassungen bei der Geräteversion V3 konnte vor allem das Signalrauschen im Bereich des Nullpunktes erheblich reduziert werden. Der Mittelwert der Drift für die Staubmasse während der Messdauer beträgt -0,10 mg und die Bandbreite liegt zwischen -0,15 und 0,30 mg, mit Ausreißern bis nahe 4 mg, verursacht durch kurzzeitige Signalstörungen bei der Schlauchtemperatur  $T_S$ .

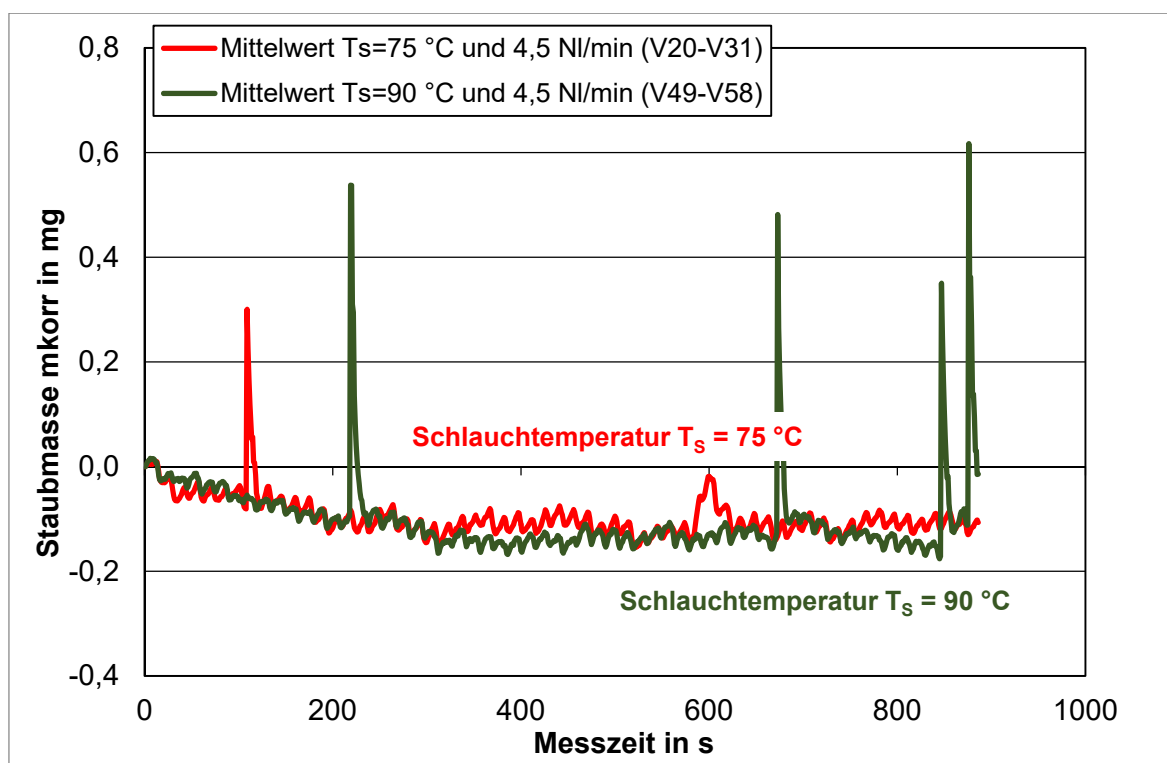
Die für die verwertbaren Versuche in der Reihe V20 bis V31 ermittelte mittlere korrigierte Staubkonzentration mit Umgebungsluft beträgt  $-1,5 \text{ mg/m}^3$  mit einer Bandbreite von  $-7,8$  bis  $0,9 \text{ mg/m}^3$ .

Entgegen der ersten Einschätzung aufgrund der mit den Geräteversionen V1 und V2 durchgeführten Labormessungen, zeigt sich bei der insgesamt verbesserten Version V3 doch ein deutlicher Einfluss des Probenahmestroms auf das Driftverhalten. Bei einem Probenahmestrom von  $4,5 \text{ NI/min}$  ergibt sich im Mittel der Versuche V20-V31 die geringste Drift in Höhe von  $-0,10 \text{ mg}$  für die gemessene und schwerpunktkorrigierte Staubmasse. Beim höchsten wählbaren Volumenstrom von  $7,0 \text{ NI/min}$  (Versuche V32 bis V40) nimmt die Gerätedrift zu und liegt mit  $1,6 \text{ mg}$  im positiven Bereich. Wird ein geringer Volumenstrom mit  $2,5 \text{ NI/min}$  (Versuche V41 bis V48) eingestellt, verläuft die Staubmassendrift stärker ins Negative und liegt im Mittel für diese Versuche bei  $-7,2 \text{ mg}$ . Abbildung B2.4 zeigt den beschriebenen Einfluss des Probenahmestroms auf die Staubmassendrift.



**Abbildung B2.4** Prototyp SM 700 Nr.3-V3: Staubmassenverlauf mit Raumluft bei unterschiedlichen Probenahmestromen (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur:  $75 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Ein Einfluss der Temperatur des Probenahmeschlauchs auf das Driftverhalten der Geräteversion V3 war bei einem gewählten Probenahmestrom von  $4,5 \text{ NI/min}$  nicht erkennbar (siehe Abbildung B2.5).



**Abbildung B2.5 Prototyp SM 700 Nr.3-V3: Staubmassenverlauf mit Raumluft bei unterschiedlichen Schlauchtemperaturen (Messdauer 15 Minuten, Sollwert Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmestrom: 4,5 NI/min)**

#### B2.1.4 Prototyp SM 700 Nr.3-V4

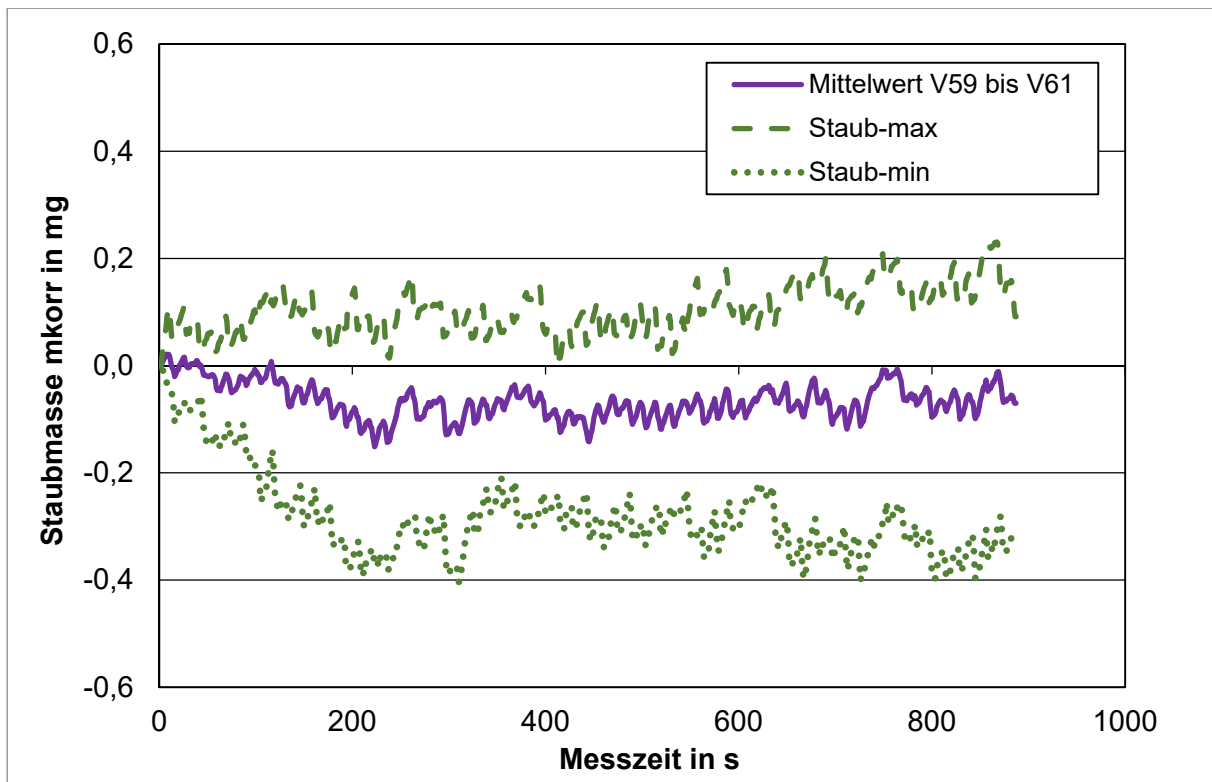
Zur Behebung der Signalausfälle für die Schlauchtemperatur  $T_S$ , die zu kurzzeitigen Spitzen im Staubmassenverlauf führen, wurde in der Geräteversion V4 weitere Änderungen vorgenommen.

Abbildung B2.6 zeigt die Mittelwerte der vom Messgerät gemessenen Staubmassen (mkorr) und die jeweils ermittelten maximalen (Staub-max) und minimalen Staubmassen (Staub-min) bei einem Probenahmestrom: 4,5 NI/min während der Messdauer von 900 s für die in der Versuchsreihe V59 bis V61 verwendbaren 3 Versuche. Signalausfälle für die Schlauchtemperatur  $T_S$  traten in dieser Versuchsreihe nicht mehr auf.

In einer letzten Entwicklungsschleife wurden weitere kleinere Modellanpassungen zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Schwingsystems vorgenommen.

Der Mittelwert der Drift für die Staubmasse während der Messdauer beträgt -0,07 mg und die Bandbreite liegt zwischen -0,28 und 0,10 mg.

Die für die Versuchsreihe V59 bis V61 ermittelte mittlere korrigierte Staubkonzentration mit Umgebungsluft beträgt  $-1,0 \text{ mg/m}^3$  mit einer Bandbreite von  $-4,2$  bis  $1,3 \text{ mg/m}^3$ .



**Abbildung B2.6 Prototyp SM 700 Nr.3-V4: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmestrom: 4,5 NI/min)**

### B2.1.5 Prototyp SM 700 Nr.3-V5

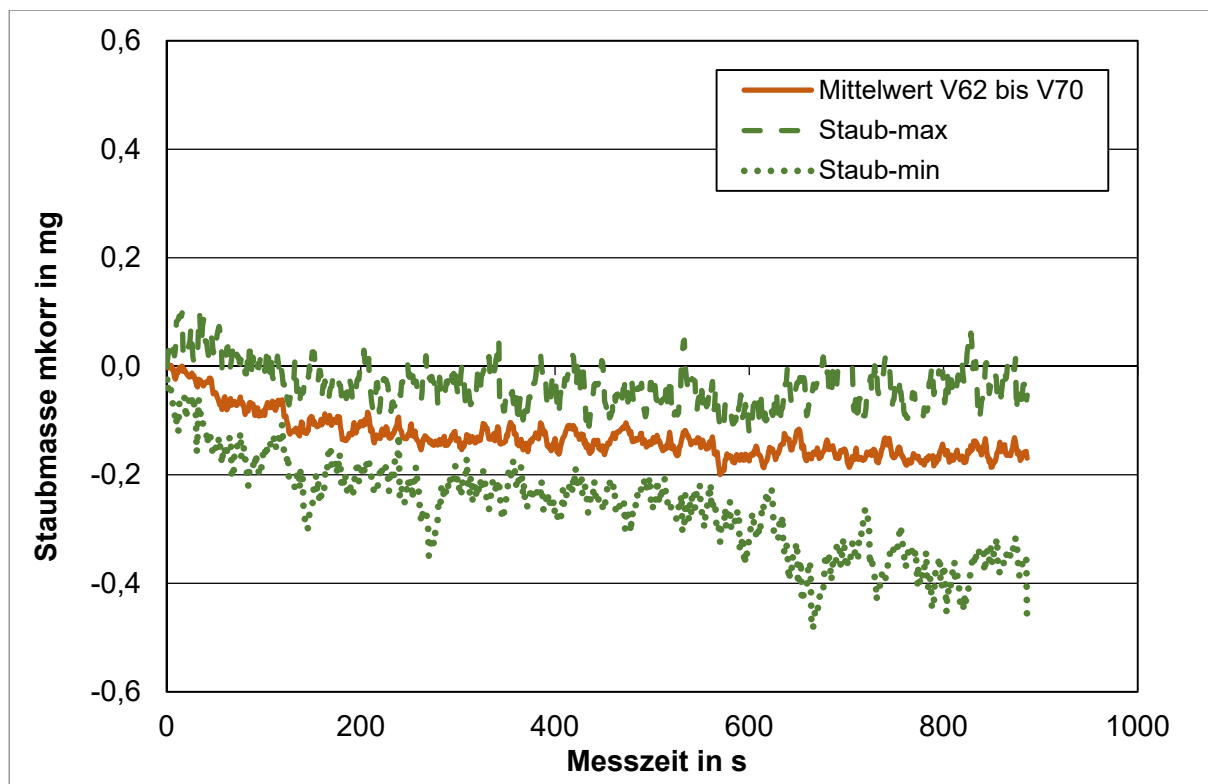
In der Geräteversion V5 wurden weitere kleinere Anpassungen am Korrekturmodell zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Schwingsystems vorgenommen.

Abbildung B2.7 zeigt die Mittelwerte der vom Messgerät gemessenen Staubmassen (mkorr) und die jeweils ermittelten maximalen (Staub-max) und minimalen Staubmassen (Staub-min) bei einem Probenahmestrom: 4,5 NI/min während der Messdauer von 900 s für die in der Versuchsreihe V62 bis V70 verwendbaren 9 Versuche.

Im Vergleich zur Geräteversion V4 (Kurve Mittelwert V59 bis 61) liegt der Verlauf der mittleren Staubmassenkurve für alle Versuche V62 bis V70 etwas weiter unterhalb der Nulllinie, wobei die Schwankungsbreite der Messwerte für die insgesamt 9 Versuche, charakterisiert durch die beiden Kurven Staub-max und Staub-min, geringer ist.

Der Mittelwert der Drift für die Staubmasse während der Messdauer beträgt -0,13 mg und die Bandbreite liegt zwischen -0,03 und -0,26 mg.

Für die Versuche V62 bis V70 beträgt die ermittelte mittlere korrigierte Staubkonzentration mit Umgebungsluft  $-2,3 \text{ mg/m}^3$  mit einer Bandbreite von  $-6,6$  bis  $-0,8 \text{ mg/m}^3$ .



**Abbildung B2.7 Prototyp SM 700 Nr.3-V5: Staubmassenverlauf mit Raumluft (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmestrom: 4,5 NI/min)**

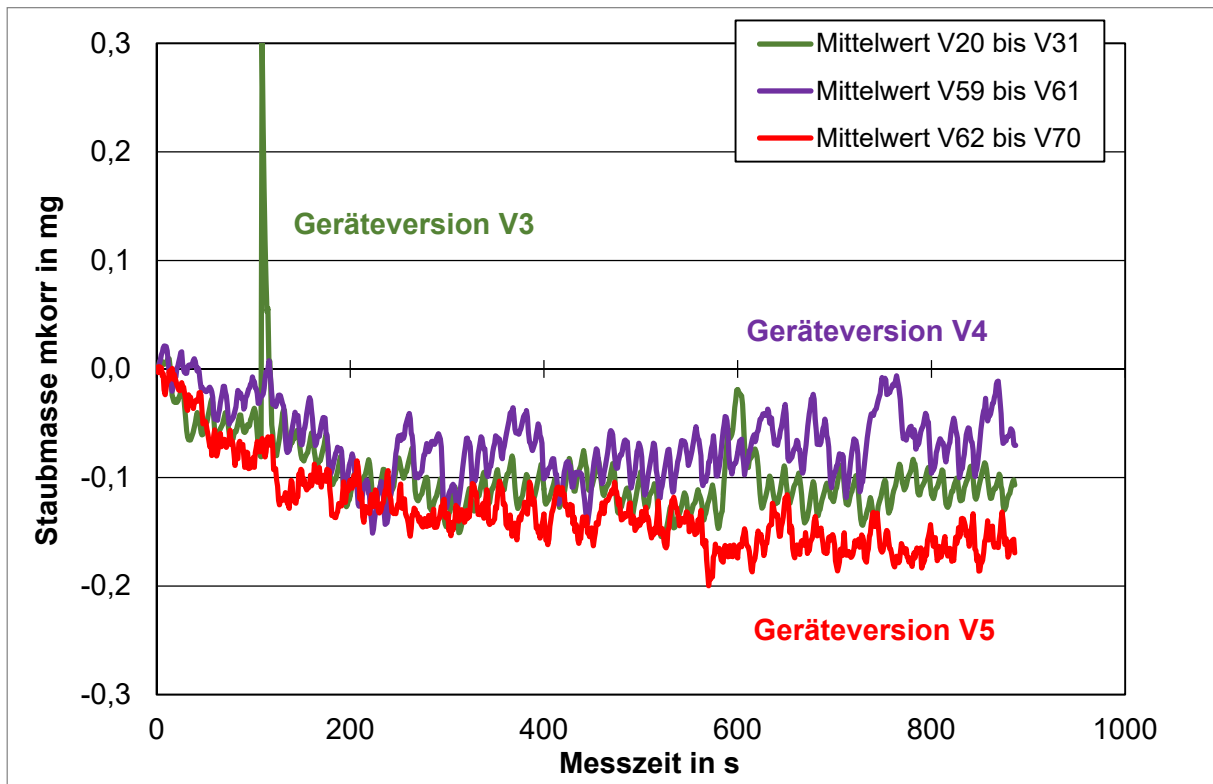
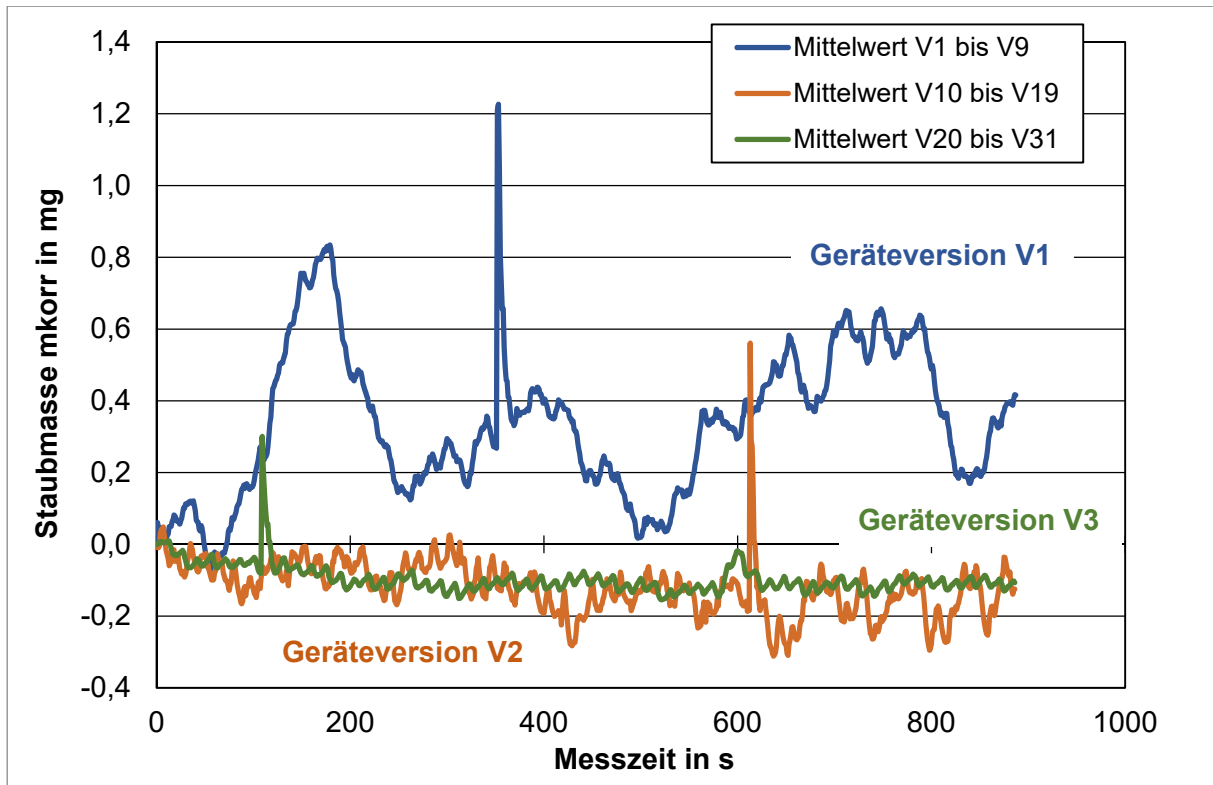
### B2.1.6 Zusammenfassung Labormessungen

Abbildung B2.8 zeigt im Überblick nochmals die Mittelwerte der gemessenen Staubmassen  $m_{\text{kor}}$  für die einzelnen Geräteversionen V1 (Mittelwert V1 bis V9), V2 (Mittelwert V10 bis V19), V3 (Mittelwert V20 bis V31), V4 (Mittelwert V59 bis V61) und V5 (Mittelwert V62 und V70).

Vor allem für die Geräteversionen V1 bis V3 ergaben sich grundlegende Verbesserungen in Bezug auf das Driftverhalten und der Schwankungsbreite der Messsignale bei Beaufschlagung mit nahezu staubfreier Raumluft (siehe Abbildung B2.8, oben). Die Signalverläufe der gemessenen Staubmassen bei den Geräteversionen V3 bis V5 unterscheiden sich nicht mehr so stark, in den ersten ca. 500 Sekunden der Gesamtmessdauer von 900 Sekunden liegen diese für alle Versionen nahe zusammen. In der Restmesszeit ergeben sich dann geringere Unterschiede, wobei auch die Anzahl der zur Mittelwertbildung verwendeten Versuche berücksichtigt werden muss (bei Geräteversion V4 sind dies nur drei Versuche).

Zusammenfassend sind in Tabelle B2.1 die Mittelwerte der Staubmassen (Anzeigewert nach Messende) für die einzelnen Geräteversionen V1 bis V5, sowie die Maximal- und Minimalwert für die einzelnen Versuchsreihen und die Bandbreite (Summe der Absolutwerte von Maximal- und Minimalwert) aufgeführt.





**Abbildung B2.8** Mittelwerte der mit Raumluft gemessenen Staubmassenverläufe für Prototypen SM 700 Nr.3-V1 bis V5 (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmevolumenstrom: 4,5 NI/min)

Mit angegeben ist jeweils die mittlere Staubkonzentration (berechnet anhand der Differenz zwischen erstem (Sekunde 0) und letztem Messwert (z.B. Sekunde 900) der korrigierten Staubmasse und des Probenahmevolumens). Zum Vergleich sind die entsprechenden Angaben für ein Wöhler SM 500 (Gerätenummer 1018) mit aufgeführt.

**Tabelle B2.1 Mittel-, Maximal- und Minimalwerte sowie Bandbreiten für die durchgeführten Versuche mit den Geräteversionen V1 bis V5 des Wöhler SM 700 (Nr. 3) und des SM 500 (Nr. 1018) (Messdauer 15 Minuten, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmevolumenstrom: 4,5 NI/min)**

Geräteversion	Versuche	Staubmasse in mg				Staubkonzentration in mg/m <sup>3</sup> (Mittelwert)
		Mittelwert	Maximalwert	Minimalwert	Bandbreite	
V1	V1 bis V9	0,42	1,92	-0,96	2,88	10,5
V2	V10 bis V19	-0,14	0,45	-0,85	1,30	-3,8
V3	V20 bis V31	-0,11	0,07	-0,57	0,64	-1,5
V4	V59 bis V61	-0,07	0,09	-0,31	0,40	-1,0
V5	V62 bis V70	-0,17	-0,06	-0,48	0,54	-2,3
SM 500 (Nr. 1018)	9 Versuche	-0,01	0,26	-0,39	0,65	-0,18

## B2.2 Realgasmessungen

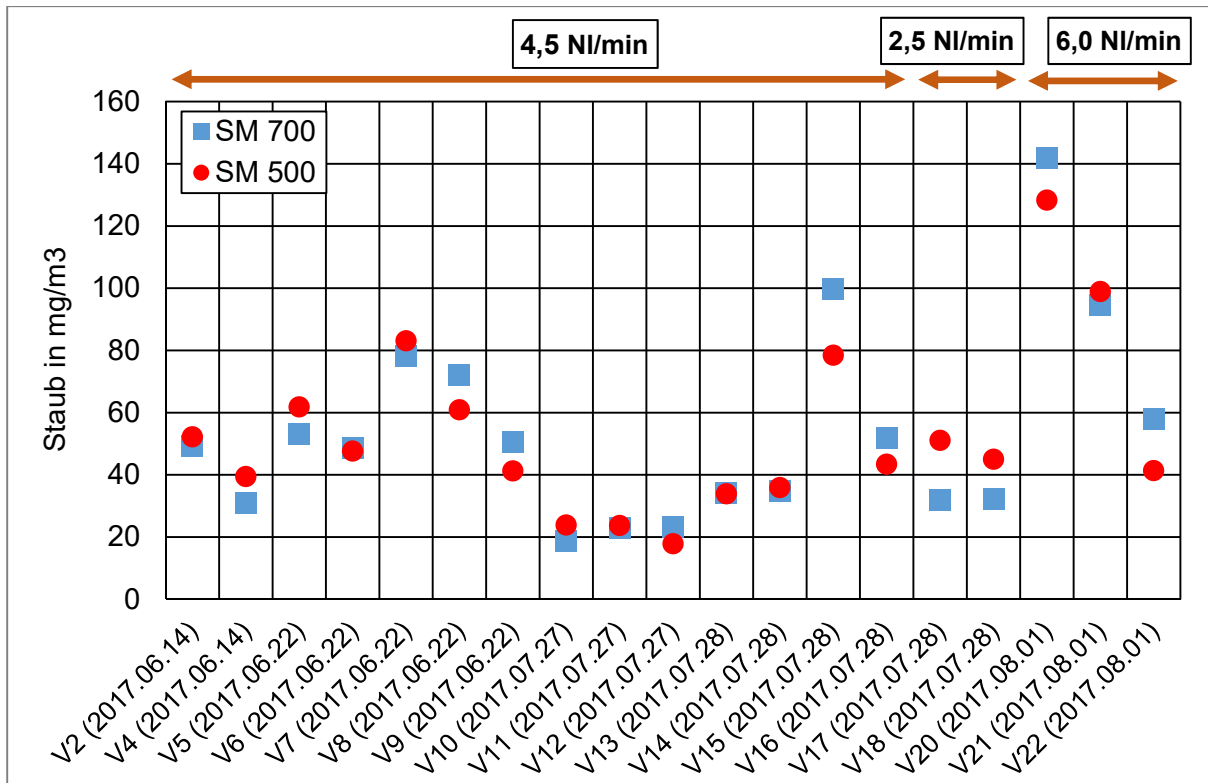
In diesem Kapitel werden die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Vergleichsmessungen zwischen dem Standardreferenzmessverfahren nach Richtlinie VDI 2066 Blatt 1 [6] und den Wöhler SM 700 sowie Wöhler SM 500 an einem Hackgutkessel und zwei unterschiedlichen Kaminöfen vorgestellt.

### B2.2.1 Messungen am Hackgutkessel

Mit den Geräteversionen 3 und 5 des SM 700 wurden Realgasmessungen an einem Hackgutkessel (Hersteller Fa. Fröling, Typ T4-24, Nennwärmeleistung 24 kW, Baujahr 2012) mit unterschiedlichen Brennstoffen durchgeführt.

Erste orientierende Staubmessungen wurden mit dem Wöhler SM 700 Nr. 3-V3 im Vergleich zum SM 500 Nr. 1018 mit einer Brennstoffmischung aus Holzpellets mit geringen Anteilen von Strohpellets durchgeführt, siehe Abbildung B2.9. Hierbei wurden beim SM 700 Nr.3-V3 der Probenahmevolumenstrom im Bereich von 2,5 bis 6,0 NI/min variiert, die Sollwerte für die Gehäuse- und Schlauchtemperatur betragen jeweils 75 °C. Beim SM 500 Nr. 1018 war der Probenahmevolumenstrom auf 4,5 NI/min eingestellt. Als Brennstoff wurde eine Mischung aus Holzpellets und geringen Anteilen von Strohpellets verwendet. Die Strohpellets in unterschiedlichen Anteilen wurden beigemischt, um schwankende Staubkonzentrationen zu erzeugen.

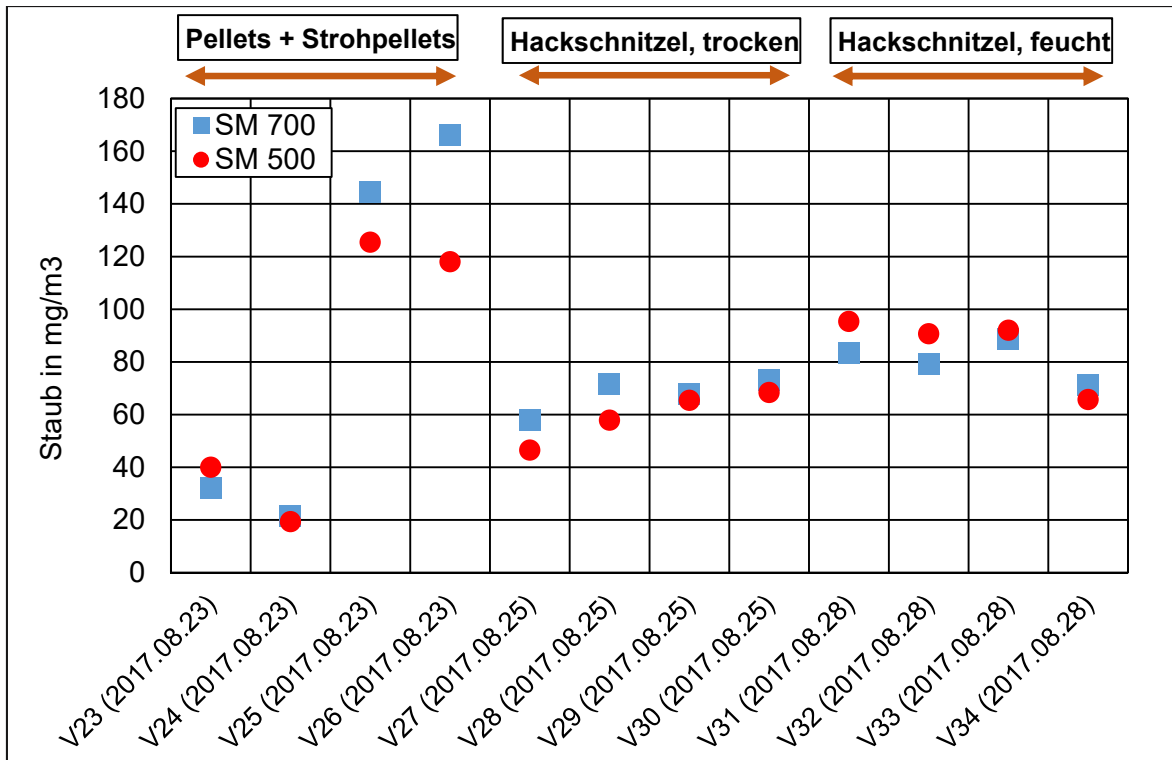
Bei den dargestellten Versuchen zeigt sich eine gute Übereinstimmung der ermittelten korrigierten Staubkonzentrationen vom SM 700 Nr.3-V3 und SM 500 Nr. 1018. Die gemessenen korrigierten Staubkonzentrationen der beiden Messgeräte unterscheiden sich im Mittel lediglich um weniger als 2 %, bei der Betrachtung einzelnen Versuchspaare können größere Abweichungen auftreten.



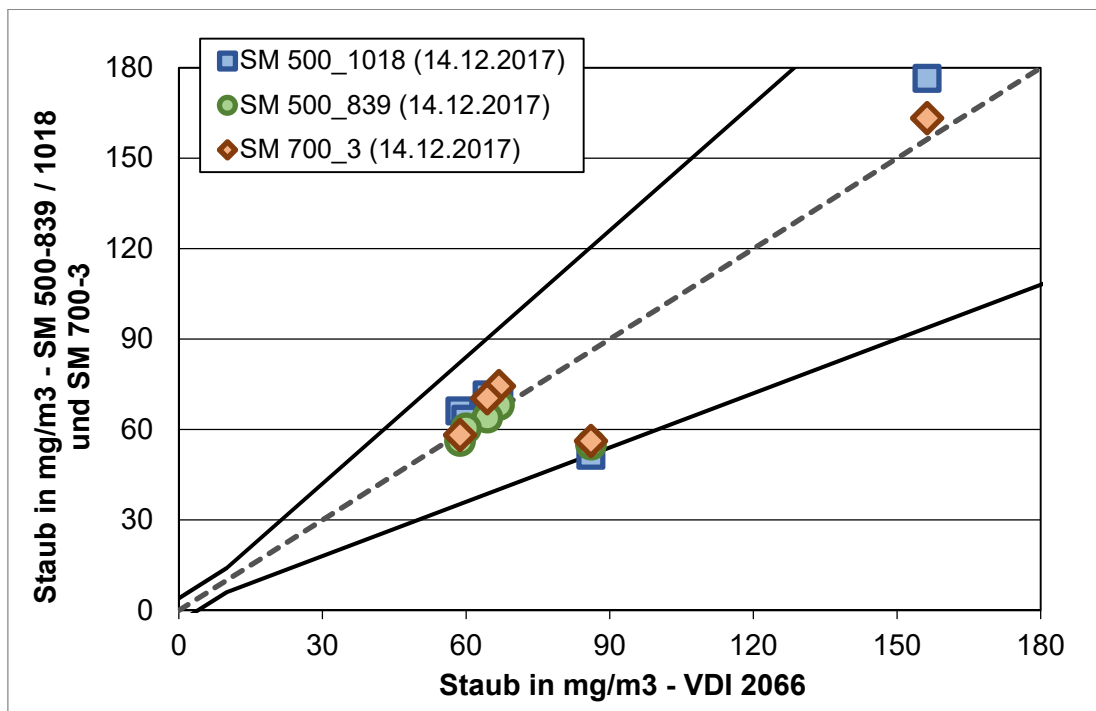
**Abbildung B2.9 Realgasmessungen am Hackgutkessel: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V3 bei unterschiedlichen Probenahmevolumenströmen im Vergleich zum SM 500 Nr. 1018 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Holzpellets mit geringem Anteil an Strohpellets)**

In einer weiteren Versuchsreihe am Hackgutkessel wurde untersucht, ob die Brennstoffqualität und damit die Partikeleigenschaften und die Partikelkonzentration einen Einfluss auf das Messergebnis beim SM 700 Nr. 3-V5, im Vergleich zum Wöhler SM 500 Nr. 1018, hat. Die Ergebnisse sind in Abbildung B2.10 dargestellt. Bei Staubkonzentrationen < 100 mg/m<sup>3</sup> weichen die Ergebnisse der beiden Messgeräte im Mittel über diese Versuche nur um 3 % voneinander ab. Höhere Staubkonzentrationen führen zu größeren Abweichungen bei den Geräteergebnissen.

Am Hackgutkessel wurden weitere Realgasmessungen mit der aktuellsten Geräteversion V5 des SM 700 Nr. 3 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 und den beiden Staubmessgeräten SM 500 Nr. 1018 und Nr. 839 mit einer Brennstoffmischung von Hackschnitzel aus Nadelholz und Rinde durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Abbildung B2.11 dargestellt. Alle Messergebnisse des SM 700 und der SM 500 liegen innerhalb der Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 [4] an die erweiterte Messunsicherheit (im Diagramm durch schwarze Linien dargestellt). Größere Abweichungen zwischen den Messgeräten ergeben sich nur bei den 2 Versuchen mit den höchsten Staubkonzentrationen nach dem Referenzmessverfahren (ca. 156 und 86 mg/m<sup>3</sup>), die unmittelbar hintereinander durchgeführt wurden. Hier wird vermutet, dass beim Versuch mit der höchsten Staubkonzentration die Sondenspülung nicht vollständig erfolgte, so dass sich Ablagerungen vor dem Staubfilter erst beim folgenden Versuch lösten und dort mit erfasst wurden. Hierdurch ist der erste Messwert beim Referenzmessverfahren in der Tendenz zu niedrig und der folgende zu hoch.



**Abbildung B2.10 Realgasmessungen am Hackgutkessel: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V3 bei unterschiedlichen Brennstoffen im Vergleich zum SM 500 Nr. 1018 (15-Minuten-Mittelwerte, Sollwerte Gehäuse- und Schlauchtemperatur: 75 °C, Probenahmevolumenstrom: 4,5 NI/min)**



**Abbildung B2.11 Realgasmessungen am Hackgutkessel: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V5, SM 500 Nr. 1018 und Nr. 839 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Hackschnitzel aus Nadelholz und Rinde)**

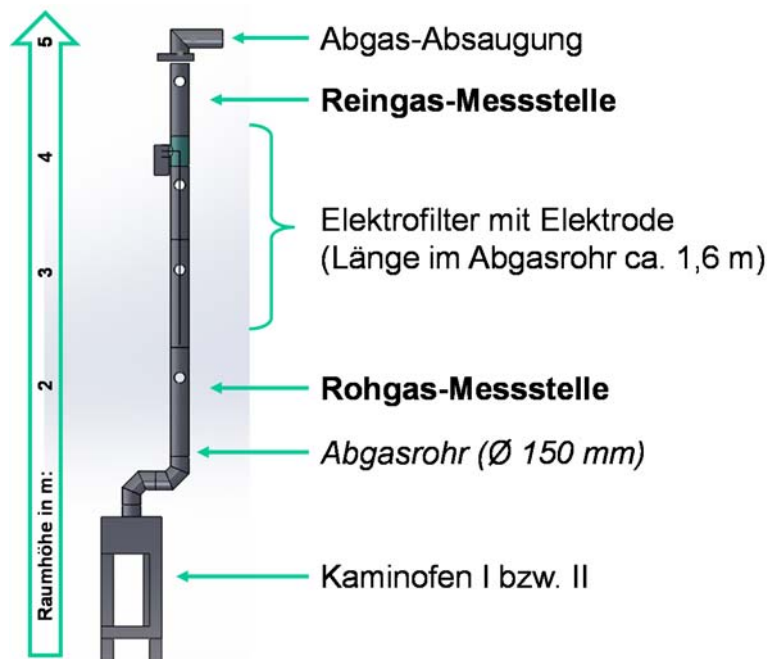
Die mittleren Abweichungen der am 14.12.2017 durchgeführten Staubmessungen, im Vergleich zum Referenzverfahren, sind für alle Staubmessgeräte der Firma Wöhler geringer als 10 %, für das SM 500 Nr. 1018 und das neuentwickelte SM 700 Nr.3-V5 sogar kleiner als 5 %.

### B2.2.2 Messungen am Kaminofen I

Mit der aktuellsten Geräteversion V5 des SM 700 wurden umfangreiche Messungen an zwei Kaminöfen vorgenommen, die an einen kleinen Elektrofilter angeschlossen waren. Hierbei wurden zeitgleich vor und nach dem Elektrofilter Staubmessungen mit dem Standardreferenzmessverfahren nach VDI 2066 Blatt 1 [6] durchgeführt. Neben Messgeräten vom Typ SM 700 wurden im Vergleich auch Geräte vom Typ SM 500 eingesetzt.

Bei diesen Messungen sollte insbesondere geklärt werden, ob elektrisch geladene Partikel (diese sind üblicherweise nach kleineren Elektrofiltern im Abgas vorhanden) einen signifikanten Einfluss auf die Messgenauigkeit bzw. den gewählten technischen Ansatz zur Kompensation der temperaturabhängigen Massendrift beim SM 700 haben.

In Abbildung B2.12 ist der Versuchsstand für die Messungen an den beiden Kaminöfen mit Elektrofilter schematisch dargestellt. An den Messstellen Roh- und Reingas waren jeweils ein Referenzmessverfahren für Staub, ein Wöhler SM 500 und SM 700 Version 5 eingebaut, die möglichst zeitgleich nach der Brennstoffaufgabe gestartet wurden. Die Messdauer betrug jeweils 15 Minuten.



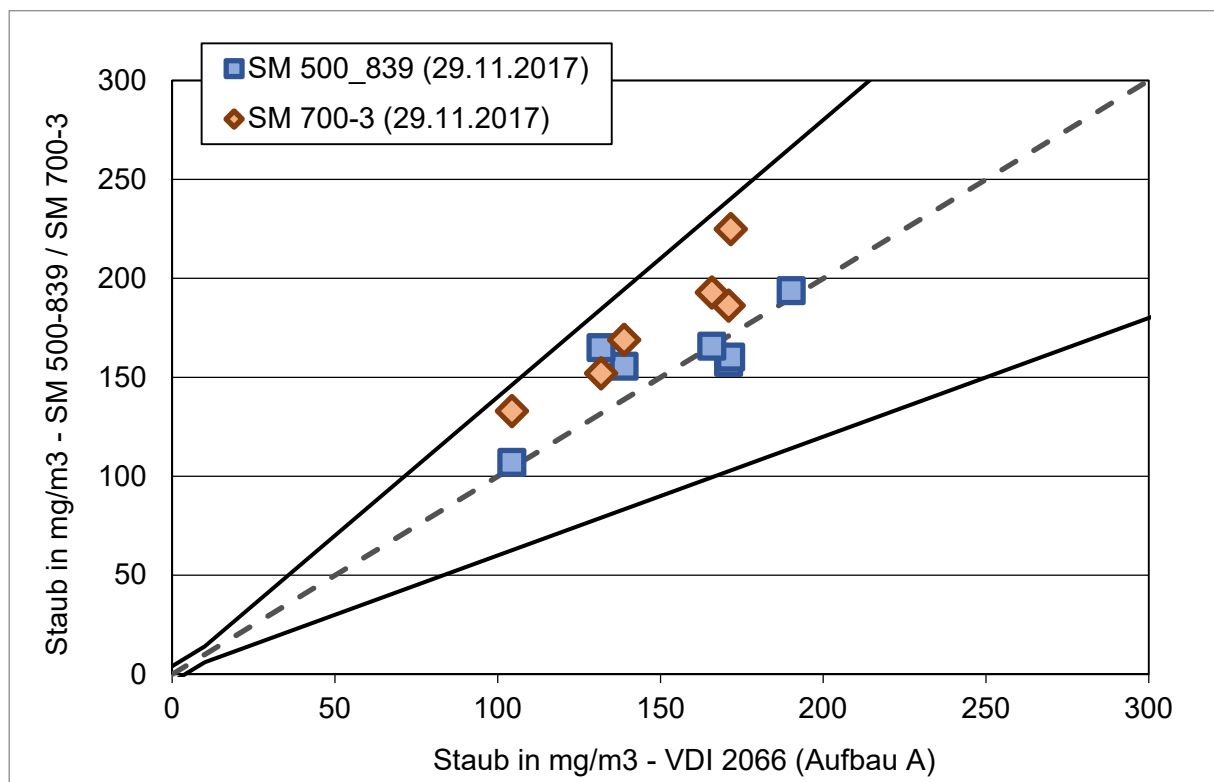
**Abbildung B2.12 Versuchsstand schematisch mit Höhenangaben für die Messungen an Kaminöfen mit Elektrofilter**

Durch den Messbeginn kurz nach der Brennstoffaufgabe wurden die Konzentrationsspitzen an Staub während des Anbrennvorganges der aufgegebenen Holzcharge im Kaminofen mit

erfasst. Der Kaminofen wurde jeweils im Bereich der Nennwärmeleistung betrieben, die Brenndauer je Holzcharge betrug in etwa 45 Minuten. Die Brennstoffaufgaben erfolgten jeweils auf eine vorhanden Grundglut nach dem Ende des vorangegangenen Chargenabbrandes. Beim Kaminofen I (Hase, Modell Modena, Nennwärmeleistung 8 kW, Baujahr 2013) war der Elektrofilter immer in Betrieb und hatte eine Verfügbarkeit von nahezu 100 %.

In Abbildung B2.13 sind die Ergebnisse für die Messstelle Rohgas beim Kaminofen I dargestellt. Alle Messergebnisse des SM 700 Nr. 3-V5 und des SM 500 Nr. 839 liegen innerhalb der Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 [4] an die erweiterte Messunsicherheit (im Diagramm durch schwarze Linien dargestellt), wobei die Staubkonzentrationen beim SM 700 Nr. 3-V5 meist etwas höher liegen als beim SM 500 Nr. 839. So liegt für die dargestellten Versuche die mittlere Abweichung für das SM 500 Nr. 839 bei ca. - 3 % und für das SM 700 Nr. 3-V5 bei ca. - 20 %, jeweils in Bezug auf das Referenzmessverfahren.

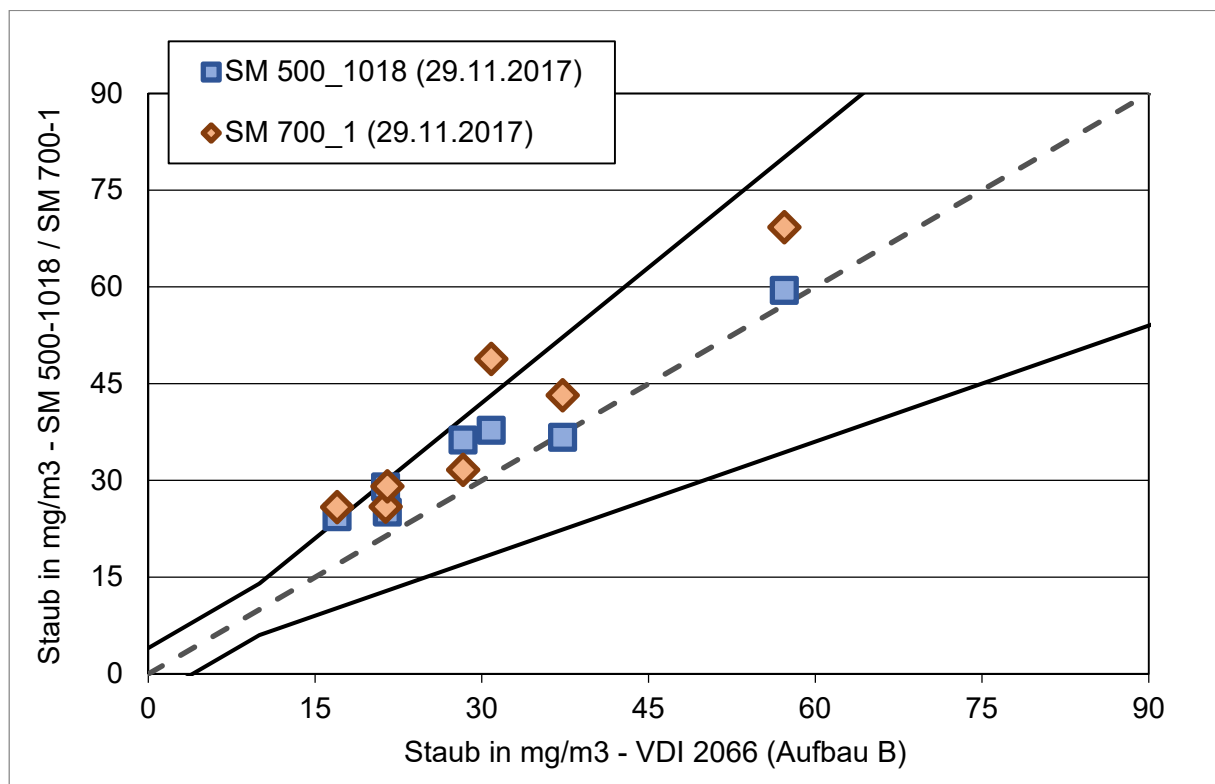
Bei der Interpretation der Ergebnisse im Rohgas ist zu beachten, dass bereits geringe Abweichungen im Startzeitpunkt der Staubmessung bei den einzelnen Staubmessgeräten aufgrund der kurzzeitigen Spitzenkonzentration an Staub während des Anbrennvorganges zu einer gewissen Messwertabweichung führen kann, da geringfügig unterschiedliche Anteile der Spitzenkonzentration erfasst werden.



**Abbildung B2.13** Realgasmessungen am Kaminofen I - Rohgas: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V5 und SM 500 Nr. 839 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Buchenholzscheite)

Abbildung B2.14 zeigt die Ergebnisse für die Messstelle Reingas beim Kaminofen I. Alle Messergebnisse des SM 500 Nr. 1018 liegen noch innerhalb der Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 [4] an die erweiterte Messunsicherheit (im Diagramm durch schwarze Linien dargestellt). Beim SM 700 Nr. 1-V5 liegen die Ergebnisse z.T. außerhalb der zulässigen Grenzen für die erweiterte Messunsicherheit.

Bei der Interpretation der Ergebnisse im Reingas ist aber zu beachten, dass aufgrund der Platzverhältnisse eine notwendige Ein- und Auslaufstrecke an der Messstelle Reingas nach dem Elektrofilter nicht realisiert werden konnte, sich Abbildung B2.15. Über den Elektrofilter gelangt Umgebungsluft in das Abgasrohr, wodurch eine erhebliche Verdünnung des Abgases erfolgt. Deshalb kann eine gewisse Strähnenbildung, die sich u.U. zeitlich und örtlich ändert, an der Messstelle Reingas nicht ausgeschlossen werden. Hierdurch könnten sich etwas höhere Messwertabweichungen zwischen den einzelnen Staubmessgeräten ergeben.



**Abbildung B2.14 Realgasmessungen am Kaminofen I - Reingas: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 1-V5 und SM 500 Nr. 1018 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Buchenholzscheite)**

Insgesamt liegen, wie im Rohgas, die Staubkonzentrationen beim SM 700 Nr. 1-V5 etwas höher als beim SM 500 Nr. 1018. Für die dargestellten Versuche im Reingas ergibt sich als mittlere Abweichung für das SM 500 Nr. 1018 ca. - 17 % und für das SM 700 Nr. 1-V5 ca. - 28 %, jeweils in Bezug auf das Referenzmessverfahren.

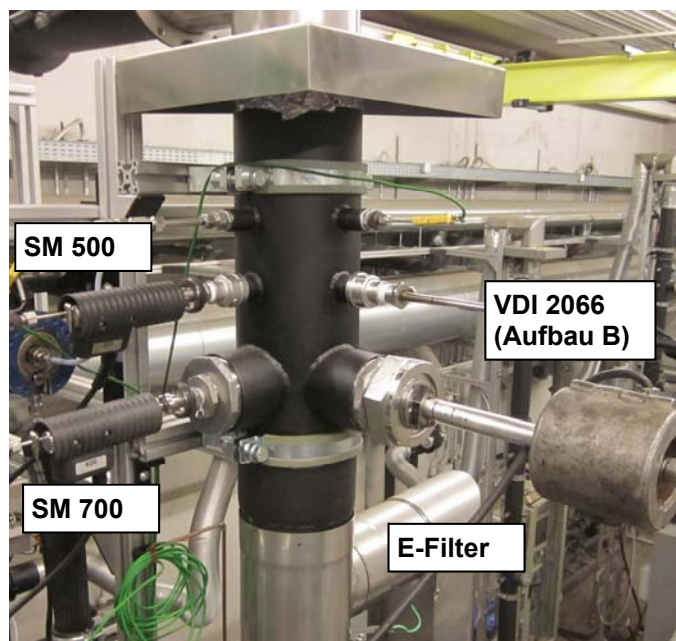


Abbildung B2.15 Realgasmessungen am Kaminofen I - Reingas-Messstelle

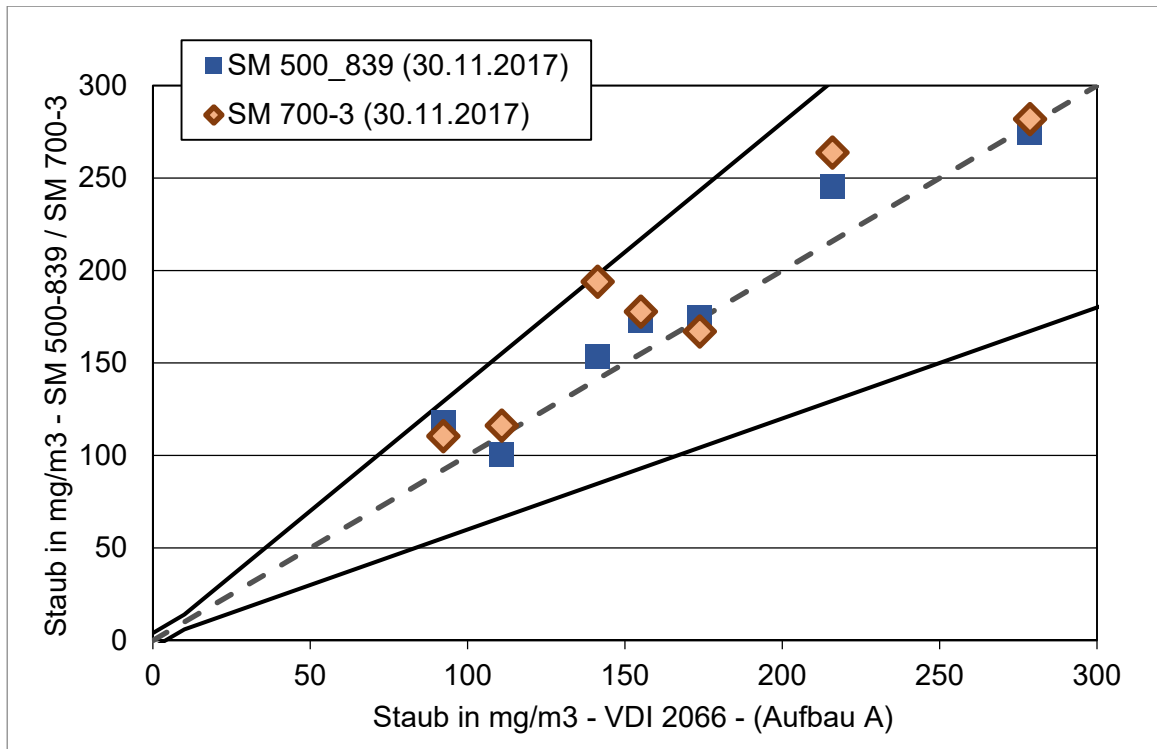
### B2.2.3 Messungen am Kaminofen II

Im Anschluss an die Messungen am Kaminofen I wurde eine weitere Versuchsreihe am selben Versuchsstand mit Elektrofilter und einem anderen Kaminofen durchgeführt. Der Kaminofen II (Hase, Modell Lagos, Nennwärmeleistung 5 kW, Baujahr 2013) wurde zusätzlich eingesetzt, um andere Staubkonzentrationen und andere Partikelzusammensetzungen (höhere Anteile von hochsiedenden organischen Verbindungen und Teeren) zu erhalten. Die grundsätzliche Vorgehensweise bei den Versuchen und die Messdauer wurden beibehalten, d.h. auch bei diesem Kaminofen wurden die Spitzenkonzentrationen an Staub während des Anbrennvorganges der Holzcharge erfasst.

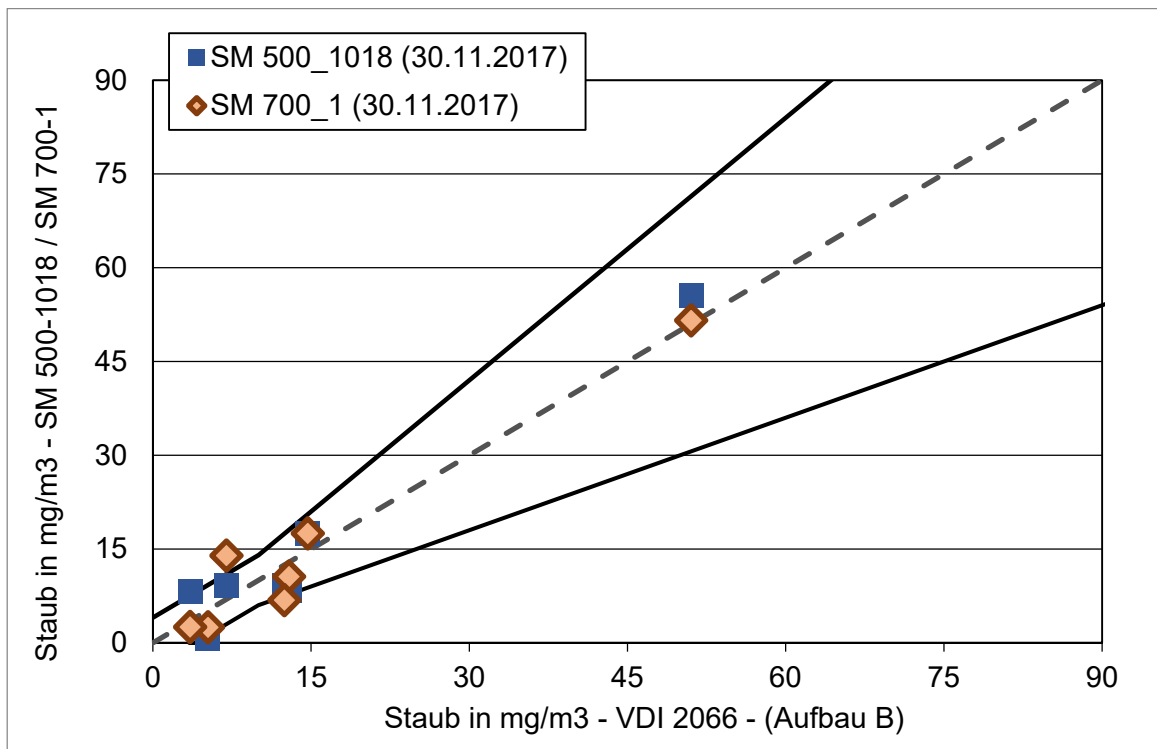
Abbildung B2.16 zeigt die Ergebnisse für die Messstelle Rohgas beim Kaminofen II. Alle Messergebnisse des SM 700 Nr. 3-V5 und des SM 500 Nr. 839 liegen innerhalb der Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 [4] an die erweiterte Messunsicherheit (im Diagramm durch schwarze Linien dargestellt), wobei die Staubkonzentrationen beim SM 700 Nr. 3-V5 meist etwas höher liegen als beim SM 500 Nr. 839. Für die dargestellten Versuche liegt die mittlere Abweichung für das SM 500 Nr. 839 bei ca. - 6 % und für das SM 700 Nr. 3-V5 bei ca. - 12 %, jeweils in Bezug auf das Referenzmessverfahren. Insgesamt sind die Ergebnisse der Staubmessungen im Rohgas von Kaminofen I und II mit ähnlichen Abweichungen zum Referenzmessverfahren gut vergleichbar.

In Abbildung B2.17 sind die Ergebnisse für die Messstelle Reingas beim Kaminofen II aufgeführt. Alle Messergebnisse des SM 500 Nr. 1018 liegen noch innerhalb der Anforderungen der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 [4] an die erweiterte Messunsicherheit (im Diagramm durch schwarze Linien dargestellt). Beim SM 700 Nr. 1-V5 liegen die Ergebnisse z.T. außerhalb der zulässigen Grenzen für die erweiterte Messunsicherheit.





**Abbildung B2.16** Realgasmessungen am Kaminofen II - Rohgas: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 3-V5 und SM 500 Nr. 839 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Buchenholzscheite)



**Abbildung B2.17** Realgasmessungen am Kaminofen II - Reingas: Staubkonzentrationen des SM 700 Nr. 1-V5 und SM 500 Nr. 1018 im Vergleich zum Referenzmessverfahren VDI 2066 (15-Minuten-Mittelwerte, Brennstoff: Buchenholzscheite)

In dieser Versuchsreihe wurde beim letzten Chargenabbrand der Elektrofilter abgeschaltet, weshalb dann im Reingas auch die höchste Staubkonzentration im Bereich von ca. 50 mg/m<sup>3</sup> gemessen wurde. Insgesamt sind die Abweichungen zum Referenzmessverfahren für die Abbrände mit Elektrofilterbetrieb, trotz der niedrigen Staubkonzentrationen, gering und betragen beim SM 500 Nr. 1018 im Mittel nur ca. 4 % und beim SM 700 Nr. 1-V5 lediglich ca. 3 %, jeweils in Bezug auf das Referenzmessverfahren.

### B2.2.4 Ergebnisse für Kaminöfen im Vergleich

In Tabelle B2.2 sind die Ergebnisse der Staubmessungen an den Kaminöfen I und II als Mittelwerte für die einzelnen Versuchstage zusammengefasst dargestellt. Mit aufgeführt sind die aus den mittleren Staubkonzentrationen berechneten Abweichungen der Staubmessgeräte SM 500 und SM 700 zum Referenzmessverfahren.

**Tabelle B2.2 Mittelwerte der Staubkonzentrationen im Roh- und Reingas bei den Kaminofen-Messungen sowie mittlere Messwertabweichungen (Messdauer 15 Minuten, Brennstoff: Buchenholzscheite)**

Vergleich der mittleren Staubkonzentrationen und hieraus berechneten Abweichungen		Kaminofen I Messtag 29.11.2016	Kaminofen II Messtag 30.11.2016	
<b>Rohgas - Versuche:</b>		<b>V8 bis V13</b>	<b>V1 bis V7</b>	
Referenz - Aufbau A	mg/m <sup>3</sup>	147	167	
SM 500-Nr. 839		152	177	
SM 700-Nr. 3		176	187	
Abweichung Ref. zu SM 500-Nr. 839 *	%	-3,1	-6,1	
Abweichung Ref. zu SM 700-Nr. 3 *		-19,8	-12,2	
<b>Reingas - Versuche:</b>		<b>V7 bis V13</b>	<b>V1 bis V6</b>	<b>V7</b>
Referenz - Aufbau B	mg/m <sup>3</sup>	31	9,3	51
SM 500-Nr. 1018		36	8,9	56
SM 700-Nr. 1		39	9,0	52
Abweichung Ref. zu SM 500-Nr. 1018 *	%	-16,5	4,4	-8,9
Abweichung Ref. zu SM 700-Nr. 1 *		-28,3	3,4	-1,1

\* berechnet aus: (Referenzwert - Messwert SM) / Referenzwert \* 100

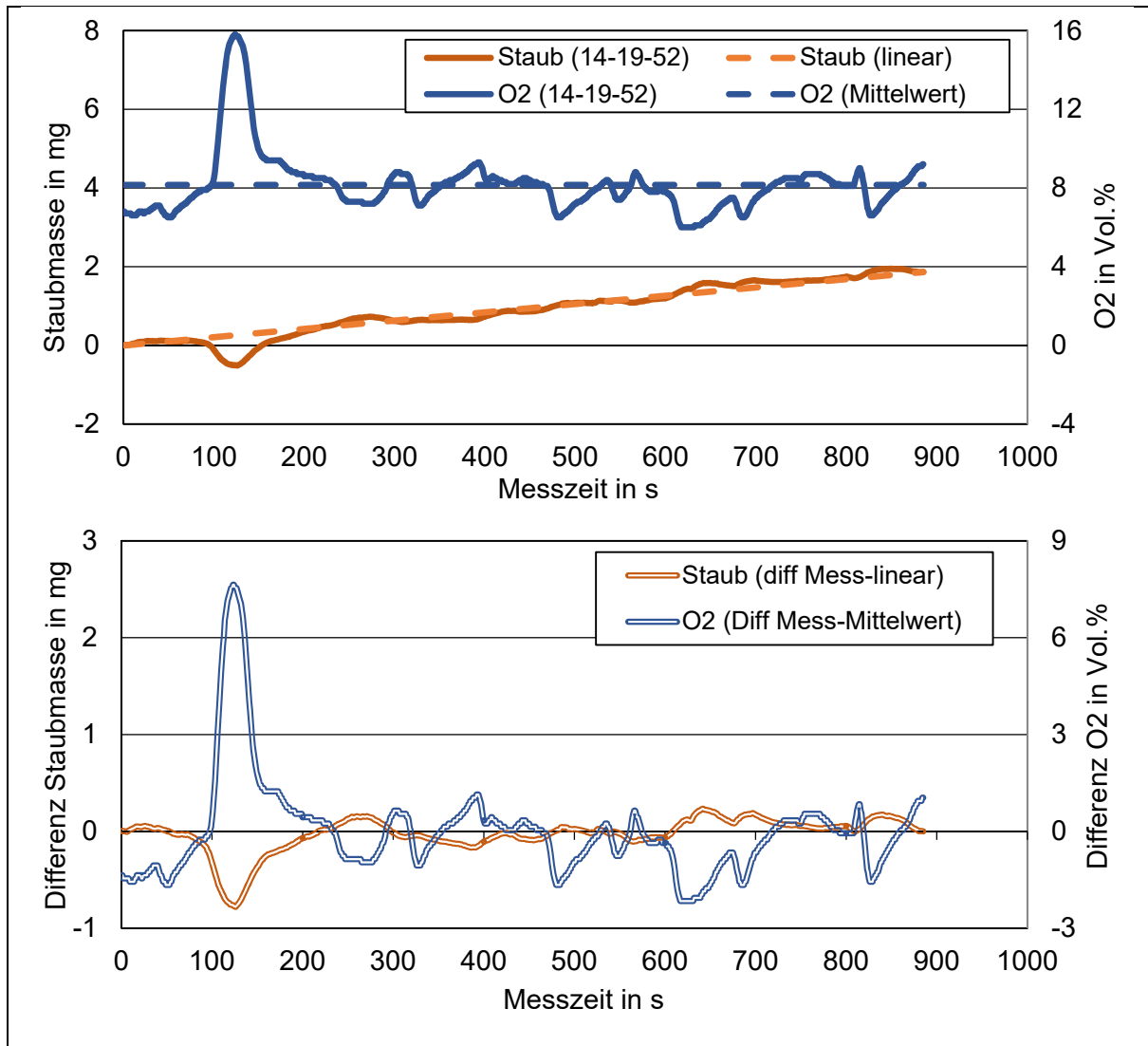
Die mittleren Abweichungen bei den beiden SM 500 liegen in einem Bereich von -16,5 bis +4,4 %, wobei im Rohgas eine geringere Bandbreite vorliegt. Bei den beiden SM 700 liegen die mittleren Abweichungen in einem ähnlichen Bereich von -28,3 bis +3,4 %. Ein Einfluss des Elektrofilters auf die Messwertabweichungen ist nicht erkennbar.

### B2.2.5 Messsignal und Wärmekapazität vom Probengas

Beim SM 500 wirkt sich eine Änderung der Wärmekapazität des Probengases auf das Messsignal aus, da sich bei instationären Wärmeströmen im Massensensor der Elastizitätsmodul in einer Art und Weise ändert, die nicht durch die integrierte Temperaturkompensation des Messsignals eliminiert werden kann. Bei Realgasmessungen kann sich die Wärmekapazität

des Probengases z.B. durch wechselnde Brennstofffeuchten oder durch größere Änderungen der Abgaszusammensetzung (z.B. O<sub>2</sub>-Konzentration) merklich verändern.

In Abbildung B2.18 ist der Einfluss einer Änderung der Wärmekapazität am Beispiel einer O<sub>2</sub>-Konzentrationsänderung für eine Messung an einer größeren Rostfeuerung, die mit Hack-schnitzeln betrieben wurde und mit einem Elektrofilter ausgerüstet war, exemplarisch anhand der gemessenen Staubmassenverläufe dargestellt.

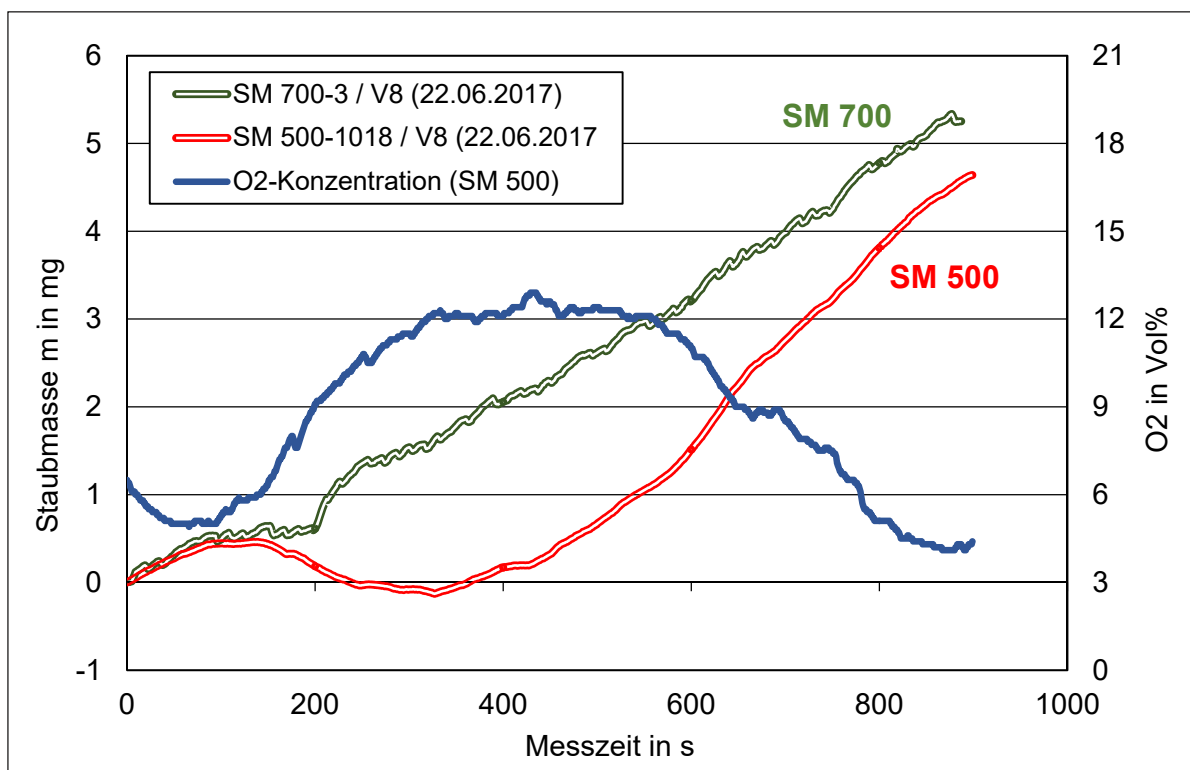


**Abbildung B2.18** Verläufe der Staubmassen beim SM 500 in Abhängigkeit der O<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas (Rostfeuerung mit Elektrofilter, Brennstoff: Hackschnitzel)

In Abbildung B2.18 (oben) ist der gemessene Staubmassen- und O<sub>2</sub>-Verlauf sowie die berechnete mittlere O<sub>2</sub>-Konzentration und eine angenommene lineare Zunahme der Staubkonzentration im Messintervall von 900 Sekunden dargestellt. Aufgrund des Einsatzes des Elektrofilters kann in guter Näherung bei dieser Anlage für diese Messung von einer nahezu konstanten Staubkonzentration im Abgas ausgegangen werden, d.h. auf dem Staubfilter des SM 500 müsste sich eine lineare Zunahme der Staubmasse während der Messung ergeben.

Abbildung B2.18 (unten) zeigt die Verläufe der Staubmasse als Differenz des aktuellen Messwertes zum angenommenen linearen Verlauf und die O<sub>2</sub>-Konzentration als Differenz des aktuellen Messwertes zum Mittelwert. Hier ist nur klar ersichtlich, dass größere Schwankungen der O<sub>2</sub>-Konzentrationen auch gegenläufige Schwankungen der angezeigten Staubmasse hervorrufen. Dass sich die Staubmasse hierbei nicht tatsächlich verändert hat wird dadurch ersichtlich, dass im Messverlauf immer wieder negative Staubmassen vom SM 500 detektiert werden, was nicht plausibel ist. Dies wirkt sich aber meist nicht in vollem Umfang auf die ermittelte Staubkonzentration der Messung aus, da im weiteren Messverlauf eine gewisse Kompensation dieser auftretenden Drift erfolgt, kann aber letztlich zu einer größeren Streuung der Messergebnisse führen. So lag auch für die dargestellte Messung mit dem SM 500 die ermittelte Staubkonzentration im Rahmen der Anforderungen an die erweiterte Messunsicherheit nach VDI 6206 Blatt 2 [4].

Wie in Abbildung B2.19 ersichtlich, ist beim SM 700 dieser Effekt nicht mehr oder nur noch in sehr geringem Maße zusehen, der neu entwickelte Ansatz zur Driftkompensation erfasst die Änderung der Wärmekapazität bzw. deren Auswirkung auf das Elastizitätsmodul des Schwingröhrchens weitgehend.



**Abbildung B2.19** Verlauf der Staubmassen beim SM 500 und SM 700 in Abhängigkeit der O<sub>2</sub>-Konzentration im Abgas bei Realgasmessungen am Hackgutkessel (Brennstoff: Holzpellets mit geringen Anteilen von Strohpellets)

## B3 Maßnahmen zur Minimierung der Staubablagerungen

### B3.1 Grundlagen

Wird eine Probenahmevorrichtung von einem Aerosol durchströmt, wirken verschiedene Mechanismen auf die Partikel, die zur Abscheidung der Partikel an der Wand der Probenahmevorrichtung führen. Die Abscheidung der Partikel kann hierbei durch Trägheit, Schwerkraft, Diffusion, Thermophorese und Koagulation erfolgen (siehe auch Tabelle A5.1). Im Folgenden werden die einzelnen Mechanismen separat und unabhängig voneinander betrachtet. Für jeden Abscheidemechanismus wird ein Ansatz für die Depositionsrate betrachtet, darunter wird der Anteil der Partikel verstanden, der durch den betrachteten Mechanismus aus dem Gasstrom abgeschieden wird. Die ausführliche Darstellung und Diskussion der Mechanismen und Berechnungen sowie eine ausführliche Quellenliste ist in [17] enthalten.

Bei den Betrachtungen wird hauptsächlich auf die Abscheidung von Partikeln aus einem Aerosol im laminaren Strömungsbereich eingegangen, da in der Probenahmevorrichtung des Wöhler SM 500 bzw. 700 laminare Verhältnisse vorliegen.

#### B3.1.1 Trägheit

Wird ein Rohr von einem Aerosol durchströmt, können Partikel aufgrund der Trägheit ihrer Masse aus der Strömung an der Rohrwand abgeschieden werden. Dieser Effekt tritt auf, wenn es im Rohr zu einer Richtungsänderung der Strömung, z.B. aufgrund eines Rohrbogens, kommt. Die in dem Aerosol mitgeführten Partikel können der Fluidströmung dann nicht unmittelbar folgen und können mit der Rohrwand in Kontakt kommen und abgeschieden werden. Die Abweichung zwischen Strömungslinie und Partikelbahn ist umso größer, je schwerer die Partikel sind. Dies bedeutet, dass leichte Partikel den Strömungslinien folgen und den Rohrbogen durchströmen können ohne abgeschieden zu werden.

Die Fähigkeit von Partikeln einer Strömung zu folgen, kann durch die dimensionslose Stokes-Zahl beschrieben werden. Ist die Stokes-Zahl  $\ll 1$ , können die Partikel einer umgelenkten Strömungslinie unmittelbar folgen. Ist die Stokes-Zahl  $\gg 1$  bewegen sich die Partikel auf einer geraden Linie weiter, obwohl dem Fluidstrom eine Richtungsänderung widerfahren ist. Auf Basis der Definition zur Berechnung der Stokes-Zahl und weiteren vereinfachenden Annahmen lassen sich Depositionsraten in Rohrstömungen näherungsweise berechnen.

Inwieweit eine Partikelabscheidung aus einem Aerosol durch Trägheit berücksichtigt werden muss, hängt von der Partikelgröße (aerodynamischer Partikeldurchmesser) ab. Ab einer Partikelgröße von  $0,5 \mu\text{m}$  sollten Trägheitskräfte als Abscheidemechanismen berücksichtigt werden, eine gewisse Abscheidung könnte aber bereits ab Partikelgrößen von  $100 \text{ nm}$  stattfinden.

#### B3.1.2 Schwerkraft

Auf alle Teilchen, die sich im Schwerfeld der Erde befinden, wirkt die Schwerkraft. Da die Schwerkraft am Teilchen immer in Richtung Erdmittelpunkt angreift, wirkt diese auf eine Aerosolströmung in einem horizontalen Rohr entmischend. Hier führt die Schwerkraft dazu, dass

sich Partikel aus dem Aerosol in Richtung unterer Rohrwand bewegen und dadurch mit dieser in Kontakt kommen und abgeschieden werden können.

Fließt die Aerosolströmung dagegen in einem vertikalen Rohrabschnitt kann der Einfluss der Schwerkraft auf die Partikel vernachlässigt werden, da die Wirkrichtung der Schwerkraft und die Strömungsrichtung in einer Achse verlaufen und somit die Schwerkraft zur Partikelabscheidung an der Rohrwand keinen Beitrag leistet.

Zur Berechnung der Absetzgeschwindigkeit von kugelförmigen Partikeln in horizontalen Rohren mit kreisförmigem Querschnitt wurde ein Ansatz entwickelt. Die Absetzgeschwindigkeit ist hierbei von der Partikeldichte, dem Partikeldurchmesser, der Erdbeschleunigung und der dynamischen Viskosität des Trägergases abhängig. Aus diesem Ansatz lässt sich folgern, dass die Depositionsrate durch Schwerkraft in horizontalen Rohren umso größer wird, je größer die Partikeldichte und der Partikeldurchmesser ist und je kleiner die dynamische Viskosität des Trägergases und der Rohrradius ist. Weiterhin erhöht sich die Depositionsrate durch Schwerkraft bei einer langen Verweilzeit des Partikels im Rohr.

Der Einfluss der Schwerkraft auf die Partikelabscheidung ist allerdings erst bei größeren Partikeln mit aerodynamischen Durchmessern ab 1 bis 2  $\mu\text{m}$  zu berücksichtigen.

### **B3.1.3 Diffusion**

Als Partikeldiffusion wird der Transport von Partikel entlang eines Konzentrationsgradienten bezeichnet. Die Kraft, die aufgrund des Konzentrationsgradienten auf die Aerosolpartikel wirkt, ist in Richtung der niederen Konzentration gerichtet. Somit wird im System durch die Partikeldiffusion ein Konzentrationsausgleich erreicht. Auch ohne Anliegen eines Konzentrationsgradienten unterliegt ein Aerosolpartikel einer ständigen ungerichteten Bewegung. Sie wird hervorgerufen durch allseitige Stöße mit Gasmolekülen oder anderen Partikeln und wird als Brownsche Partikelbewegung bezeichnet. Durch die Brownsche Partikelbewegung bzw. durch die Partikeldiffusion können Partikel bei der Strömung eines Aerosols durch ein Rohr mit der Rohrwand in Kontakt kommen und abgeschieden werden.

Die Depositionsrate durch Diffusion kann, aufbauend auf einer empirischen Formel für die Partikelabscheidung durch Diffusion, näherungsweise berechnet werden und ist u.a. abhängig vom Diffusionskoeffizienten der Partikel, der Länge des Strömungskanals und vom Volumenstrom des Aerosols. Eine geringe Depositionsrate wird bei einem hohen Volumenstrom, einem kurzen Strömungskanal und einem kleinem Diffusionskoeffizient erreicht. Der Diffusionskoeffizient wird kleiner bei niedriger Temperatur, höherer dynamischer Viskosität und größeren Partikeldurchmessern.

Es liegen Untersuchungen vor, nach denen der Durchmesser des Strömungskanals keinen Einfluss auf die Abscheidung der Partikel aus dem Aerosol hat. Werden zwei Strömungskanäle mit unterschiedlichen Durchmessern mit demselben Volumenstrom durchströmt, so hat das Partikel in dem Strömungskanal mit der größeren Querschnittsfläche einen weiteren Weg bis zur Wand zurückzulegen, aber auch eine größere Verweilzeit im Kanal. Diese beiden Effekte heben sich auf und deshalb hat der Durchmesser des Strömungskanals keinen Einfluss auf die Abscheidung.

Schätzungen gehen davon aus, dass die Diffusion bei Partikel mit einem Durchmesser kleiner als  $0,01 \mu\text{m}$  als dominanten Abscheidemechanismus aus einer laminaren Strömung anzusehen ist. Experimentelle Untersuchungen zeigten auch, dass die Partikelabscheidung durch Diffusion durch Bögen und Winkel in der Probenahmeleitung deutlich verstärkt wird.

Die Partikelabscheidung durch Diffusion aus einer turbulenten Strömung ist wesentlich höher als aus einer laminaren Strömung. Dies wird auf einen größeren Konzentrationsgradienten in der viskosen Unterschicht der Strömung im Wandbereich des Rohres zurückgeführt. Für die Berechnung von Depositionsraten durch turbulente Diffusion existieren ebenfalls Ansätze, die durch experimentelle Daten gestützt sind.

### **B3.1.4 Thermophorese**

Unter Thermophorese wird der physikalische Effekt verstanden, dass sich Partikel in einem Aerosol unter Einfluss eines Temperaturgradienten bewegen. Die thermophoretische Kraft, die auf die Partikel aus dem Aerosol wirkt, ist immer in Richtung der niedrigeren Temperatur gerichtet. Die Bewegungsrichtung resultiert aus einer höheren kinetischen Energie der Partikel auf der warmen Seite. Somit ist die Stoßhäufigkeit und -stärke auf der warmen Seite des Partikels mit anderen Partikeln größer und es entsteht ein Nettoimpuls, der in Richtung des Wärmestroms zeigt.

Wird ein kaltes Rohr von einem warmen Aerosol durchströmt, führt die thermophoretische Kraft zu einer verstärkten Abscheidung der Partikel an der kalten Rohrwand. Je größer der Temperaturgradient zwischen Kernströmung und Rohrwand ist, desto größer ist die Abscheidewirkung von Partikeln aus dem Aerosol durch Thermophorese. Entlang des Rohres vermindert sich der Einfluss der Thermophorese, da sich Aerosoltemperatur und Wandtemperatur annähern und somit der treibende Temperaturgradient abnimmt. Werden isotherme Verhältnisse im Rohr erreicht, wird die Partikelabscheidung aus dem Aerosol nicht mehr durch die Thermophorese beeinflusst.

Zur Berechnung der (totalen) thermophoretischen Depositionsrate von Partikeln aus einer laminaren Gasströmung existiert ebenfalls ein Ansatz, wobei diese u.a. vom Produkt aus Prandtl-Zahl und thermophoretischem Koeffizienten, der Wandtemperatur und der Eintrittstemperatur des Aerosols abhängig ist. Der thermophoretische Koeffizient zeigt wiederum eine Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Gases und der Partikel sowie der Knudsen-Zahl, die das Verhältnis von mittlerer freien Weglänge der Gasmoleküle zum Partikeldurchmesser beschreibt. Außerdem spielt bei der Berechnung des thermophoretischen Koeffizienten die Cunningham-Korrektur eine Rolle. Unter der totalen thermophoretischen Depositionsrate wird das Zusammenspiel von Konvektion, Diffusion und Thermophorese als Einflüsse auf die Abscheidung von Partikeln aus einem Aerosol angesehen.

Wenn die Abscheidemechanismen Diffusion und Thermophorese in einer laminaren Strömung gleichzeitig wirken, ist die Thermophorese bei Partikeln mit einem Durchmesser von  $0,01 \mu\text{m}$  und größer der dominante Effekt. Werden Partikel allein auf Grund der thermophoretischen

Kraft aus dem Aerosol abgeschieden, kann die Depositionsrates unabhängig von der Partikelgröße sein. Es existieren allerdings auch Untersuchungen, die eine Abhängigkeit der thermophoretischen Abscheidung von der Partikelgröße (Partikel zwischen 0,05 und 8 µm) belegen.

Es existiert außerdem ein Einfluss des Massen- bzw. Volumenstroms auf die Partikelabscheidung. So steigt bei kleineren Volumenströmen und endlicher Rohrlänge die Depositionsrates an. Bei einem Rohr mit unendlicher Länge ist die Partikelabscheidung unabhängig vom Volumenstrom.

Da die thermophoretische Kraft maßgeblich vom sich einstellenden Temperaturgradient abhängt, ist diese bei einer warmen Aerosolströmung in kaltem Rohr besonders im Eintrittsbereich des Rohres hoch und wird entlang des Rohres immer geringer. Somit treten erhöhte Depositionsrates im Eintrittsbereich des Rohres auf. Dieser Effekt wird u.U. noch durch ein noch nicht voll entwickeltes Strömungsprofil verstärkt.

### **B3.1.5 Koagulation**

Koagulation entsteht, wenn Partikel in einem Aerosol mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten transportiert werden. Durch die Geschwindigkeitsdifferenz der Partikel stoßen sie aufeinander und können so ihre Form und Größe verändern. Durch Koagulation kommt es also zum Größenwachstum von Partikeln. Hierbei bleibt die Masse der Aerosolpartikel im System konstant, die Anzahlkonzentration der Partikel im Aerosol wird aber verringert.

Durch die Vergrößerung der Partikel im Aerosol verändert die Koagulation die Wirksamkeit von einigen Transport- bzw. Abscheidemechanismen. So wird der Einfluss der Diffusion auf die Partikelabscheidung verringert, wohingegen beispielsweise der Einfluss der Trägheitsabscheidung durch das Partikelwachstum verstärkt werden kann.

Es kann zwischen der Brownschen Koagulation und der kinematischen Koagulation unterschieden werden. Die Brownsche Koagulation wird durch die Brownsche Molekülbewegung und die kinematische Koagulation durch andere äußere Kräfte, wie z.B. Gravitation, hervorgerufen, die eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Partikeln im Aerosol verursachen.

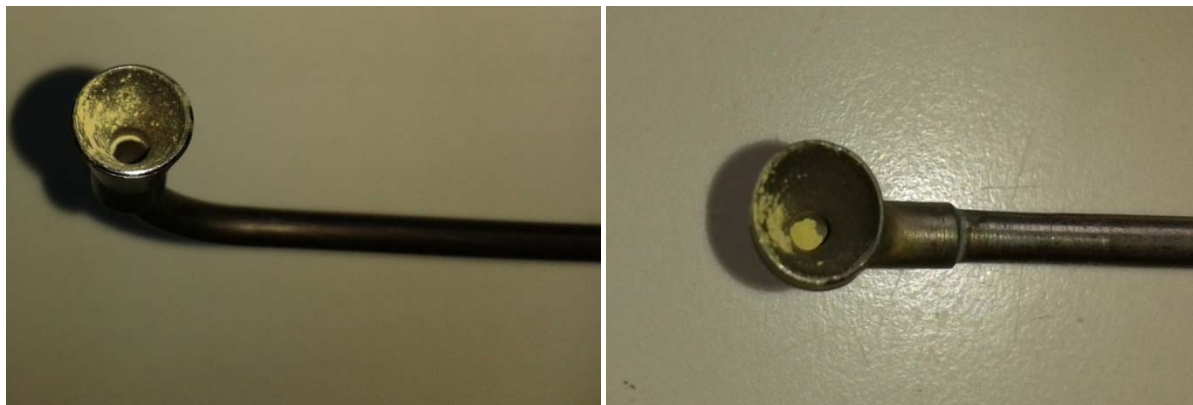
In einem polydispersen System verläuft die Koagulation deutlich schneller als in einem monodispersen System. Dieser Effekt ist umso größer, je stärker sich die Partikelgrößen unterscheiden. Außerdem nimmt die Koagulationsrate aufgrund ihrer Temperaturabhängigkeit mit steigender Temperatur zu und ist stark von der Eintrittszahlkonzentration und der Verweilzeit der Aerosolpartikel im System abhängig. Bei niedrigen Partikelanzahlkonzentrationen beeinflusst die Koagulation den Partikeltransport zur Rohrwand u.U. nicht mehr, da die Zeit, die zur Koagulation benötigt wird, größer ist als die Verweilzeit der Partikel im System.

## **B3.2 Laboruntersuchungen zu Staubablagerungen**

In umfangreichen Laboruntersuchungen wurden Abhängigkeiten der Staubablagerungen im Probenahmesystem der Wöhler SM-Messgeräte von der Staubart, dem Probenahmestrom, der Sondenform und der Bauart vom SONDENSCHLAUCH untersucht. Hierbei festgestellt, dass die Staubart die Ablagerungen in der Probenahmeverrichtung am stärksten beeinflusst,



siehe hierzu beispielhaft Abbildung B3.1. Eine Veränderung der Sondenform, des eingesaugten Volumenstroms und des Sondenschlauchs hat dagegen einen geringeren Einfluss auf die Partikelverluste in der Probenahmeverrichtung.



**Abbildung B3.1 Staubablagerungen bei unterschiedlichen Sondenformen bei Beaufschlagung größerem Teststaub (links: Sonde mit Einlaufbogen, rechts: Sonde mit geradem Sondenrohr)**

Weiter wurde festgestellt, dass das Verhältnis zwischen den Ablagerungen in der Entnahmesonde und im Sondenschlauch unabhängig von der Staubart und abhängig von der Staubkonzentration ist. Außerdem kann festgehalten werden, dass die Geometrie der Staubentnahmesonde einen Einfluss auf die in ihr abgeschiedene Partikelmasse hat. Je weniger stark die Aerosolströmung in der Staubentnahmesonde umgelenkt wird, desto geringer sind auch die Staubablagerungen in ihr. Die Stärke dieses Effektes hängt allerdings auch von der Staubart (u.a. der Partikelgrößenverteilung) ab. Der Einfluss auf die Partikelverluste in der Probenahmeverrichtung bei Erhöhung des Probenahmestroms ist ebenfalls von der Staubart abhängig. Die Untersuchungen mit verschiedenen Bauarten von Sondenschläuchen haben dagegen keinen Einfluss auf die Partikelabscheidung gezeigt.

### B3.3 Realgasmessungen zu Staubablagerungen

Am Hackgutkessel (Hersteller Fa. Fröling, Typ T4-24, Nennwärmeleistung 24 kW, Baujahr 2012) wurden verschiedene Versuchsreihen mit unterschiedlichen Partikelkonzentrationen und Brennstoffen zur Untersuchung der Staubablagerungen in der Probenahmeverrichtung des Wöhler SM 500 durchgeführt.

Hierbei zeigte sich eine Abhängigkeit der Staubablagerungen in der Probenahmeverrichtung vom eingesetzten Brennstoff, der Staubkonzentration und dem Reinigungszustand der Probenahmeverrichtung. Geringe Staubkonzentrationen im Abgas führen zu vergleichsweise hohen Anteilen von Staubablagerungen im Probenahmesystem. Bei höheren Staubkonzentrationen im Abgas und einem bereits mit Staub belegten Probenahmesystem liegen prozentual geringere Staubablagerungen vor. Werden die Spülanteile aus der Probenahmeverrichtung des Wöhler SM 500 mitbetrachtet, liegen die Messwerte im Bereich der Grenzen des Referenzverfahrens nach VDI 2066 Blatt 2 [6].

Insgesamt zeigten die Staubmessungen mit dem Wöhler SM 500 ohne Spülung eine gute Übereinstimmung mit dem Standardreferenzmessverfahren.

### **B3.4 Schlußfolgerungen**

Bei den theoretischen Betrachtungen, den praktischen Untersuchungen und den Berechnungen zu den Partikelverlusten wurde die Partikelabscheidung in der Probenahmeverrichtung insgesamt und die einzelnen Mechanismen (Trägheit, Schwerkraft, Diffusion und Thermophorese) intensiv untersucht und bewertet. Hierbei zeigte sich, dass im Grundsatz noch gewisse Optimierungsmöglichkeiten durchgeführt werden könnten, um z.B. den Einfluss der Thermophorese zu reduzieren. Dies könnte z.B. für eine weitere Verbesserung des Messgerätes im Anwendungsbereich der 1. BImSchV sinnvoll sein.

Werden maximale Anforderungen an die Messgenauigkeit und an die Reproduzierbarkeit bei gleichzeitig niedrigen Staubkonzentrationen und einer großen Bandbreite an Staubeigenschaften gestellt, wie z.B. bei Anwendungen von genehmigungsbedürftigen Anlagen, dann kann nach derzeitigem Erkenntnisstand auf die Erfassung der in der Probenahmeverrichtung abgelagerten Stäube nicht verzichtet werden. Hierzu wäre dann eine dem Messverfahren entsprechend angepasste Vorgehensweise zu entwickeln, damit auch dieser Staubanteil unmittelbar im Anschluss an die Messung bestimmt werden kann, damit das Gesamtergebnis der Staubmessung auch zeitnah und vor Ort vorliegt.

## Zusammenfassung und Bewertung des Entwicklungsstandes

Wesentliches Ziel des Vorhabens war, die Erweiterung des Einsatzbereiches des Online-Messgerätes Wöhler SM 500 über die Überwachungsmessungen der 1. BImSchV hinaus zu untersuchen. Hierzu sollte ein neues Online-Messgerät entwickelt werden, das auch für Messaufgaben bei genehmigungsbedürftigen Anlagen (z.B. nach TA-Luft eingesetzt werden kann). Hierdurch ergeben sich allerdings deutlich höhere Anforderungen an ein Messverfahren. Dies betrifft u.a. die Bandbreite des möglichen Einsatzes, der Einsatzbedingungen, der Messgenauigkeit und der Reproduzierbarkeit. Letztlich müsste ein derartiges Staubmessgerät dieselben Anforderungen wie das Standardreferenzmessverfahren für Staub nach VDI 2066 Blatt 1 [6] erfüllen.

Grundvoraussetzung zur Erreichung dieses Zieles war die Entwicklung eines neuen Korrekturmodells zur Kompensation der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls des Resonanzsystems, um Gerätedriften und Querempfindlichkeiten (z.B. der Wärmekapazität des Proben-gases) weitestgehend zu reduzieren.

In äußerst aufwendiger Grundlagen- und Detailarbeit konnte letztlich das neue Korrekturmodell entwickelt und so weit verbessert werden, dass mit dem aktuellen Prototyp der Geräteversion V5 des SM 700 ein im Labor und an Realgasen uneingeschränkt einsetzbares Messgerät zur Verfügung steht, welches die Anforderungen an die Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit entsprechend der VDI-Richtlinie 4206 Blatt 2 [4] erfüllt.

Ob das neue Korrekturmodell bzw. das gesamte Messverfahren unter den gegebenen Randbedingungen (z.B. Abmessungen des Sensorgehäuses, des Resonanzröhrchens und der Filterkappe) noch soweit verbessert werden kann, dass eine dem Referenzmessverfahren entsprechende Genauigkeit und Reproduzierbarkeit erreicht werden kann, ist unsicher. Wesentliches Hindernis sind hierbei die vergleichsweise geringen maximal möglichen einstellbaren Probenahmenvolumenströme, die bei geringen Staubkonzentrationen im Proben-gas auch zu geringen Staubmassen in der Filterpatrone des Messgerätes führen.

Aktuelle Bewertungen zeigen allerdings, dass ohne eine Änderung der Kernkomponenten (Staubmassensensor und Korrekturmodell) mit einer stärkeren Pumpe ein höherer Probenahmenvolumenstrom bis ca. 8 l/min entnommen werden kann, so dass zuverlässig Staubkonzentrationen ab etwa 10 mg/m<sup>3</sup> erfasst werden können. Hierdurch lassen sich für das direkt-gravimetrische Messverfahren neue Anwendungsfelder über die deutsche 1. BImSchV hinaus erschließen.

## Literaturverzeichnis

- [1] M. Struschka, C. Schäfer und S. Ester, „Entwicklung eines Feinstaubmessgerätes für Überwachungsmessungen an Feuerungsanlagen für feste Brennstoffe im Geltungsbereich der 1. BImSchV. Endbericht DBU-Projekt Az 27741,“ Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart und Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH, Stuttgart und Bad Wünnenberg, 2012.
- [2] S. Ester, A. Stizenberg, M. Struschka und C. Schäfer, *Weiterentwicklung des Online-Staubmessgerätes SM 500 für Langzeitmessungen und zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung. Endbericht DBU-Projekt Az 30739*, Bad Wünnenberg und Stuttgart: Wöhler Messgeräte Kehrgeräte GmbH und Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart, 2015.
- [3] 1. BImSchV, *Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes. Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen*, Bonn: Bundesgesetzblatt Jahrgang 2010 Teil I Nr. 4, 1. Februar 2010.
- [4] VDI 4206 Blatt 2, *Mindestanforderungen und Prüfpläne für Messgeräte zur Überwachung der Emissionen an Kleinf Feuerungsanlagen. Blatt 2: Messgeräte zur Ermittlung von partikelförmigen Emissionen*, Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe Febr. 2015.
- [5] Umweltbundesamt, *Bekanntmachung über die bundeseinheitliche Praxis bei der Überwachung der Emissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen*, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucher, BAnz AT 26.08.2015 B5.
- [6] VDI 2066 Blatt 1, *Messen von Partikeln Staubmessung in strömenden Gasen. Gravimetrische Bestimmung der Staubbelastung.*, Berlin: Beuth Verlag, Ausgabe November 2006.
- [7] L. Aerdker, *Modellbasierte Analyse der Ersatzfederkonstanten eines elektromechanischen Federpendels zur Partikelmassemessung bei instationären Wärmeströmen*, Paderborn: Masterarbeit am Fachgebiet Elektrische Messtechnik, Fakultät für Elektrotechnik, Informatik und Mathematik der Universität Paderborn, 2017.
- [8] R. Crane und R. Evans, „Inertial deposition of particles in a bent pipe,“ *J. Aerosol Sci.*, pp. 161-170, Vol. 8 1977.
- [9] D. Y. Pui, F. Romay-Novas und B. Y. Liu, „Experimental study of particle deposition in bends of circular cross section,“ *Aerosol Science and Technology*, pp. 301-315, 07 June 2007.
- [10] J. Pich, „Theory of gravitational deposition of particles from laminar flows in channels,“ *Aerosol Science*, pp. 351-361, Vol 3 1972.
- [11] J. Thomas, „Particle loss in sampling conduits,“ in *Assessment of Airborne Radioactivity*, Vienna, 3-7. July 1967.
- [12] F. Stratmann, E. Otto und H. Fissan, „Thermoeoretical and diffusional particle transport in cooled laminar tube flow,“ *J. Aerosol Sci.*, pp. 1305-1319, Vol 25 1994.
- [13] M. Gaderer, *Wärmeversorgung mit fester Biomasse*, München: Dissertation Fakultät Maschinenwesen. Technische Universität München, 2008.
- [14] COMSOL, „<https://www.comsol.de/products>,“ COMSOL AB, Stockholm, Schweden, Dezember 2017. [Online]. [Zugriff am Dezember 2017].

- [15] M. Naumann, *Untersuchungen des Partikelverlustes in der Probenahmevorrichtung eines Staubmessgerätes für Kleinfeuerungsanlagen*, Stuttgart: Masterarbeit am Institut für Feuerungs- und Kraftwerkstechnik der Universität Stuttgart, 2015.
- [16] U. Fischer, *Tabellenbuch Metall mit Formelsammlung*, Haan: Verlag Europa Lehrmittel, 2011.
- [17] T. Fröhlich, *Temperaturkompensation von Präzisionsmeßgeräten*, Ilmenau: Technische Universität Ilmenau, Institut für Prozessmess- und Sensortechnik, 2006.