

## Entwicklung eines filterlosen katalytischen Systems zur Reduzierung der Emission von Dieselrußpartikeln mittels thermophoretischer Deposition

*Dipl.-Ing. A. Messerer, M.Sc., o. Univ.-Prof. Dr. R. Nießner*

*Technische Universität München, Institut für Wasserchemie und chemische Balneologie*

### 1. Einleitung

Aufgrund Ihres hohen Wirkungsgrades stellen Dieselverbrennungsprozesse besonders im Hinblick auf eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Eindämmung des Treibhauseffektes eine wichtige Energiequelle dar.

Bisherige außermotorische Verfahren zur Reduzierung der dabei emittierten Nanopartikeln, die momentan Einzug in die Serienproduktion halten, basieren ausschließlich auf Filtrationstechniken in keramischen Monolithen und können damit bei zunehmender Beladung aufgrund des hohen Abgasgedruckes den Kraftstoffverbrauch um bis zu 5% erhöhen. Außerdem besteht Verstopfungsgefahr durch Anlagerung von Ölaschebestandteilen, womit sich die Standzeit eines Rußpartikelfilters als kaum akzeptabel für den Nutzfahrzeugsektor mit hohen Laufleistungen erweist.

Macht man sich jedoch die Eigenschaft zunutze, dass die im Dieselabgas enthaltenen Partikeln i.R. zwischen 30 und 300 nm groß sind, so kann eine signifikante Deposition der Rußpartikeln mittels eines Temperaturgradienten erfolgen, der die thermophoretische Kraft entlang des Gradienten hervorruft. Dabei scheiden sich die Partikeln über das gesamte Volumen der thermophoretisch aktiven Depositionsstruktur homogen ab und bieten damit eine große spezifische Oberfläche für die heterogene Oxidationsreaktion mit aus den im Abgas enthaltenen reaktiven gasförmigen Spezies NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und O<sub>2</sub>.

Zum thermophoretischen Verhalten von Rußpartikelagglomeraten lagen bislang noch keine detaillierten experimentellen Untersuchungen vor. Deshalb war es ein Ziel, im Rahmen des Förderprogrammes den thermophoretischen Koeffizienten von fraktal-ähnlichen Rußpartikelagglomeraten zu bestimmen. Zudem sollte eine Modellabscheidestruktur in Form eines hinsichtlich thermischer Abscheidung optimierten Wärmeübertragers entwickelt und auf ihr Abscheideverhalten hin untersucht werden.

Aus Motorprüfstandsversuchen ist bekannt, dass Thermophorese einen wichtigen Beitrag zur Abscheidung von Rußpartikeln liefert [1], weshalb die thermophoretische Deposition in neuentwickelten PM-Kat<sup>®</sup>-Strukturen genauer beschrieben werden soll. Dazu soll der im Rahmen des Förderprogrammes ermittelte thermophoretische Koeffizient für Rußagglomerate herangezogen und in ein instationäres Strömungsmodell integriert werden.

### 2. Thermophorese

Partikeln in einem Temperaturgradientenfeld erfahren Stöße mit Gasmolekülen unterschiedlicher kinetischer Energie. Dadurch ergibt sich eine Kraft auf die Partikel zur kälteren Seite hin, die wie folgt beschrieben werden kann:

$$v_{th} = -K_{th} \frac{\mu_g \nabla T}{\rho_g T_p} \quad (1)$$

Dabei repräsentieren  $K_{th}$  den thermophoretischen Koeffizienten,  $\nabla T$  den Temperaturgradienten um die Partikel.  $\mu_g$  ist dynamische Viskosität des Gases,  $T_p$  die Partikeltemperatur und  $\rho_g$  die Gasdichte.

Für den Übergangsbereich mit  $Kn \approx 1$  ( $Kn = 2\lambda/d_p$ ), d.h. Partikeldurchmesser ( $d_p$ ) und mittlere freie Weglänge des Gases ( $\lambda$ ) befinden sich im gleichen Größenbereich, kann  $K_{th}$  für sphärische Aerosolpartikel wie folgt berechnet werden [2]:

$$K_{th} = 2C_c c_s \frac{k^* + c_t Kn}{(1 + 3c_m Kn)(1 + 2k^* + 2c_t Kn)} \quad (2)$$

$C_c$  ist der Cunningham Koeffizient,  $c_m$  repräsentiert den Geschwindigkeitsprungkoeffizienten,  $c_s$  den Thermischen Slipkoeffizienten und  $c_t$  den Temperatursprungkoeffizienten.  $k^*$  ist das Verhältnis der thermischen Leitfähigkeiten von Gas  $k_g$  und Partikeln  $k_p$ . Für die Berechnungen können folgende Werte herangezogen werden:  $C_c = 1 + 2\lambda/d_p \times (1,257 + 0,4 \exp(-0,55 d_p/\lambda))$  [3];  $c_m = 1,146$ ,  $c_s = 1,147$ , und  $c_t = 2,18$  [4].

Während  $K_{th}$  für sphärische Aerosolpartikeln verschiedener Materialien in zahlreichen Experimenten bestimmt wurde, liegen für fraktal-ähnliche Rußpartikelagglomerate im Übergangsbereich lediglich Anhaltswerte [1] bzw. komplexe numerische Annäherungen vor [5].

Die im Rahmen dieses Förderprojekts durchgeführten Experimente gliedern sich in Depositionsuntersuchungen an einem neu entwickelten Thermalplattenpräzipitator [6] sowie einem neuartigen Miniaturrohrbündelwärmeübertrager [7]. Zudem wurde ein numerisches Strömungsmodell für PM-Kat<sup>®</sup>-Strukturen entwickelt, mit dem thermophoretische Effekte in diesen neuartigen Katalysatorträgerstrukturen untersucht werden können.

### 3. Experimenteller Aufbau Thermalplattenpräzipitator

Abb. 1 zeigt den Längsschnitt des im Rahmen des Förderprojekts entwickelten Thermalpräzipitators. Er wurde für hohe Abscheideraten unter hohen Volumenströmen und Temperaturgradienten entwickelt. Die obere Aluminiumplatte wird mit 10 Heizpatronen über einen PID-Regler geheizt. Die untere Edelstahlplatte ist wassergekühlt, wobei das Kühlmedium über einen Kryostaten auf  $\pm 0,2$  K temperiert werden kann. Der Abstand  $H$  zwischen beiden Platten wurde mittels verschieden hohen Silikondichtstreifen eingestellt, die nur gering thermisch leitend sind, und damit einen über das gesamte durchströmte Volumen konstanten Temperaturgradienten  $\nabla T$  gewährleisten. Die Kanallänge  $L_C$  beträgt 450 mm, die Kanalbreite  $b = 23,0$  mm. Der Temperaturgradient wurde mittels Variation von  $H$  (0,45-1,45 mm) und  $\Delta T$  (20-110 K) eingestellt. Die Temperaturen wurden mit 3 NiCrNi-Thermoelementen pro Platte ermittelt, sie waren 250  $\mu\text{m}$  von der überströmten Fläche entfernt positioniert.

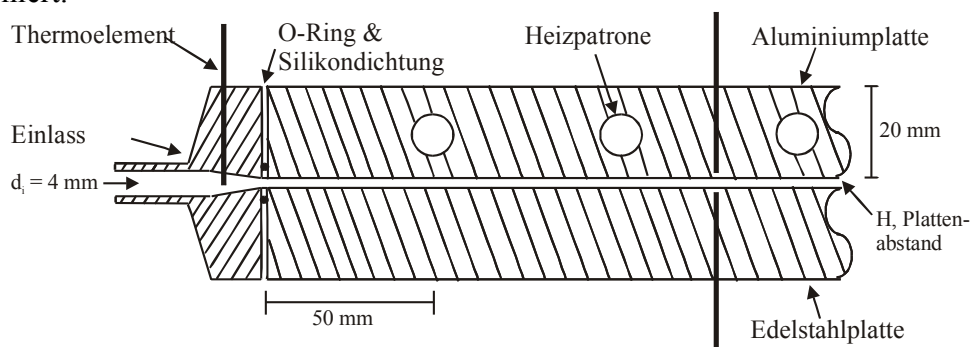


Abb. 1: Längsschnitt der Einlassseite des Thermalplattenpräzipitators.

Der für die Thermodepositionsuntersuchungen herangezogene Versuchsaufbau ist in Abb. 2 dargestellt. Das Modellrußaerosol wurde mittels eines Graphitfunktengenerators (PALAS GfG 1000 [8]) erzeugt. Die Partikelgrößenverteilung wurde vor und nach dem Thermalplattenpräzipitator mittels eines *Scanning Mobility Particle Sizers* (SMPS) bestimmt. Der Versuchsaufbau beinhaltet eine sorgfältige Aerosolkonditionierung, so dass Ladungseffekte und Thermophoreseverluste bei der Probenahme ausgeschlossen werden konnten [6]. Das Koagulationsverhalten, Einlaufverluste sowie diffusionsbedingte Verluste wurden im isothermen Präzipitator experimentell ermittelt und bei der Datenanalyse berücksichtigt.

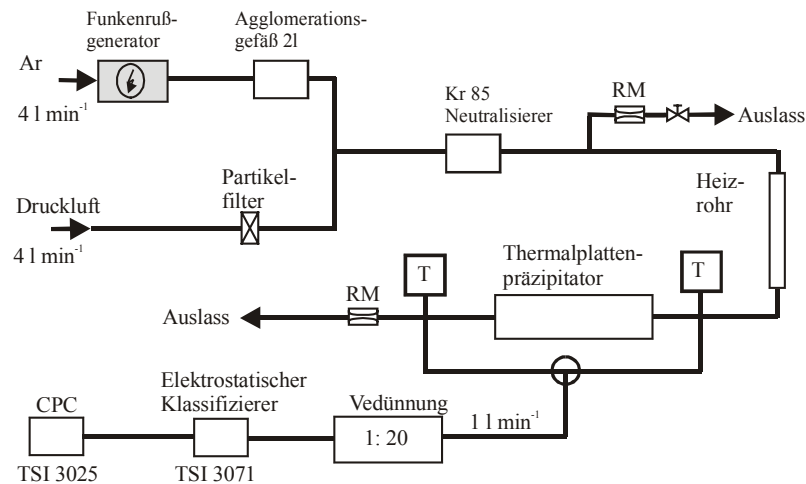


Abb. 2: Versuchsskizze zu den Experimenten am Thermalplattenpräzipitator.

Abb. 3 zeigt typische Partikelanzahlgrößenverteilungen, wie sie bei den Experimenten zur Thermophorese ermittelt wurden.

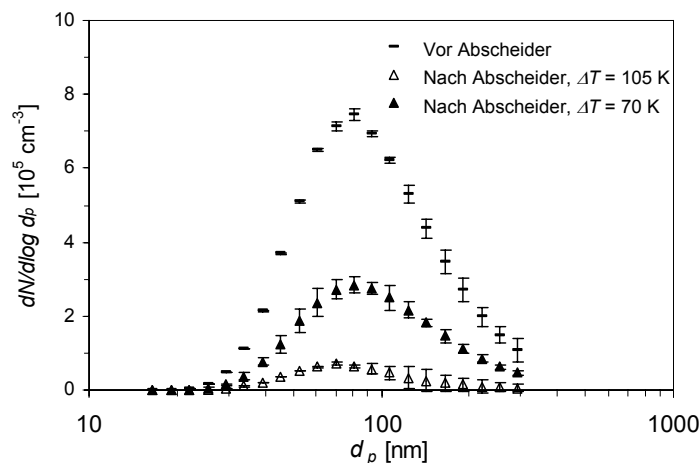
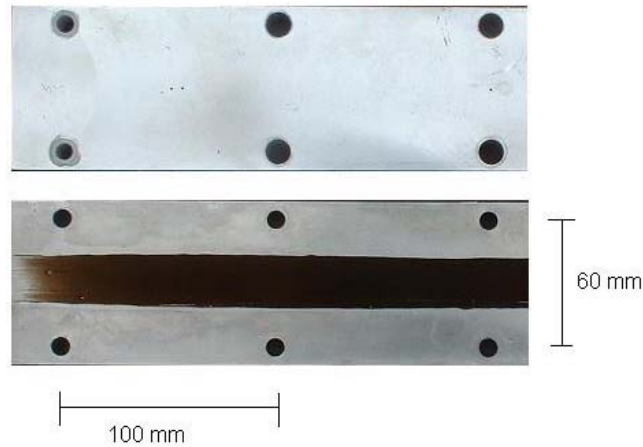


Abb. 3: Partikelanzahlgrößenverteilung von GfG-Modellruß vor und nach dem Thermalplattenpräzipitator mit  $H = 0,45$  mm,  $\Delta T = 70$  und  $105$  K.

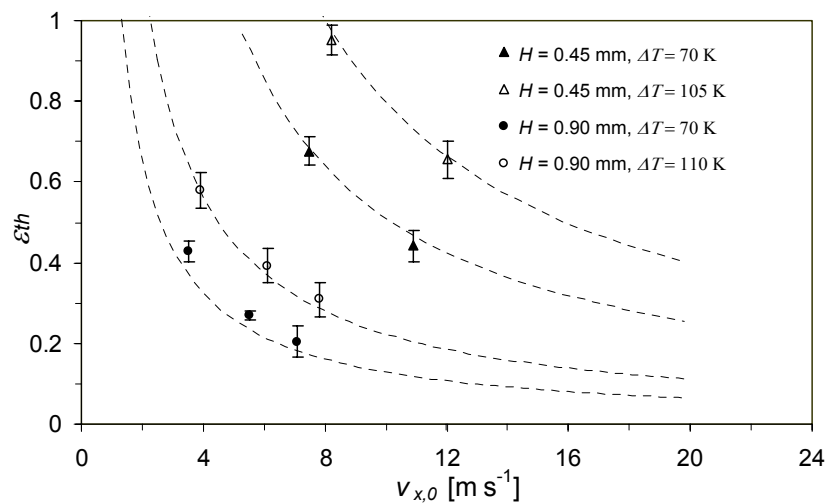
Aus jeweils 6 intermittierenden Messungen vor und nach dem Präzipitator wurde die thermophoretische Abscheideeffizienz  $\varepsilon_{th,i}$  je Partikelgrößenklasse  $i$  ermittelt. Vor jedem Experiment wurde der Abscheider gereinigt, um den Einfluss von Rußdepositen auf die Partikelabscheidung zu minimieren. Abb. 4 zeigt die durch Rußpartikelabscheidung hervorgerufene dunkle Färbung der unteren Platte.



**Abb. 4:** Foto der Einlassseite des Thermalpräzipitators nach einem Experiment. Keine sichtbaren Spuren von Partikelabscheidung auf der geheizten Aluminiumplatte, deutliche Dunkelfärbung der gekühlten Platte. Reduzierte Partikelabscheidung über die Einlauflänge.

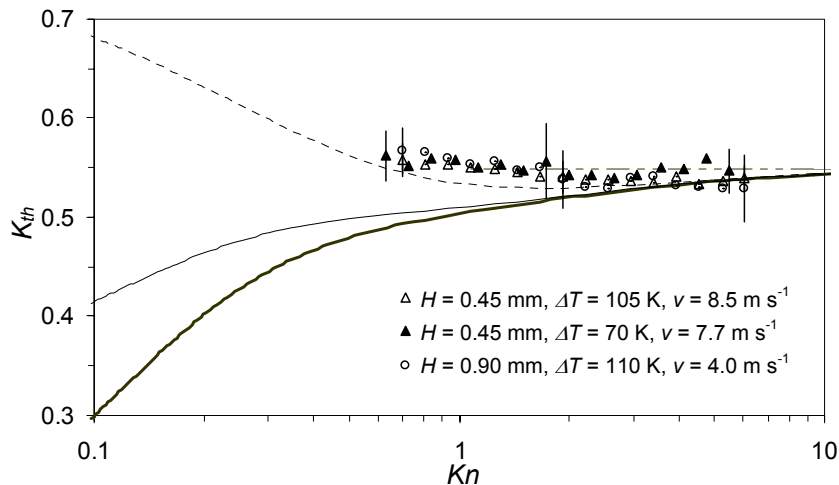
#### 4. Thermophoretisches Verhalten von fraktal-ähnlichen Rußagglomeraten

Im Laufe der Experimente wurde eine Vielzahl an Parametervariationen durchgeführt, wovon exemplarisch die Anzahl gewichtet gemittelten Abscheideeffizienzen für je 2 Temperaturdifferenzen und Plattenabstände in Abb. 5 dargestellt sind.



**Abb. 5:** Thermophoretische Abscheideeffizienz  $\varepsilon_{th}$  über der mittleren Strömungsgeschwindigkeit  $v_{x,0}$ . Linien repräsentieren Modellrechnungen mit  $K_{th} = 0,55$ .

Aus den nach Partikelgrößenklassen aufgelösten thermophoretischen Abscheideeffizienzen  $\varepsilon_{th,i}$  lässt sich bei bekannten Strömungs- und thermischen Randbedingungen der thermophoretische Koeffizient  $K_{th}$  ermitteln [6]. Abb. 6 stellt  $K_{th}$  über  $Kn$  dar für 3 verschiedene Experimente.



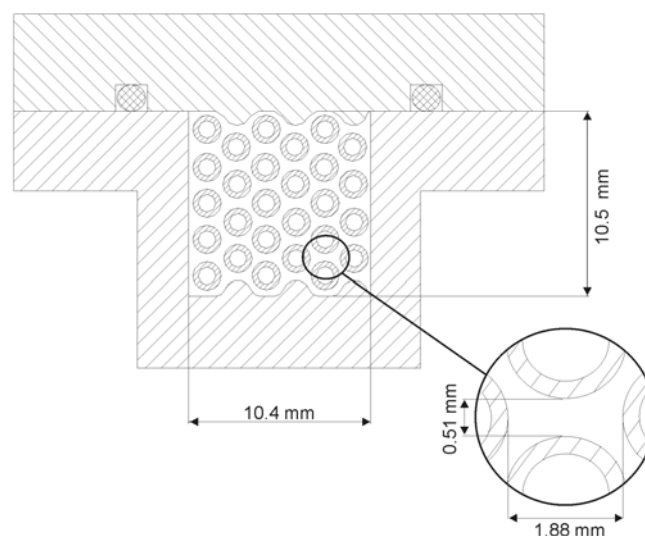
**Abb. 6:**  $K_{th}$  über  $Kn$ . Gestrichelte Linie repräsentiert Waldmann's Modell; Talbot's Modell ist dargestellt für  $k^* = 0.0064$  (dick),  $k^* = 0.16$  (dünn) and  $k^* = 1.0$  (gestrichelt).

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass die aufgrund der Agglomeratstruktur deutlich reduzierte thermische Leitfähigkeit innerhalb einer Partikel für größere Rußpartikeln ( $Kn < 1$ ) keine signifikante Reduzierung von  $K_{th}$  induziert, wie es bei sphärischen Partikeln beobachtet wird [4].

Somit wirkt Thermophorese quasi partikelgrößenunabhängig über das gesamte in Dieselprozessen beobachtete Partikelgrößenspektrum.

## 5. Thermophoretische Abscheidung im Miniaturrohrbündelwärmeübertrager

In einer weiteren Experimentreihe sollte ein Verfahren entwickelt und erprobt werden, welches eine kontinuierliche Deposition von Rußpartikeln mittels Thermophorese ermöglicht. Dazu wurde ein Miniaturrohrbündelwärmeübertrager entwickelt und umfassend hinsichtlich der darin möglichen thermophoretischen Abscheidung untersucht. Abb. 7 zeigt den Querschnitt, Abb. 8 den Längsschnitt des Wärmeübertragers. Nähere konstruktive Angaben finden sich in [7].



**Abb. 7:** Querschnitt des Miniaturrohrbündelwärmeübertragers.

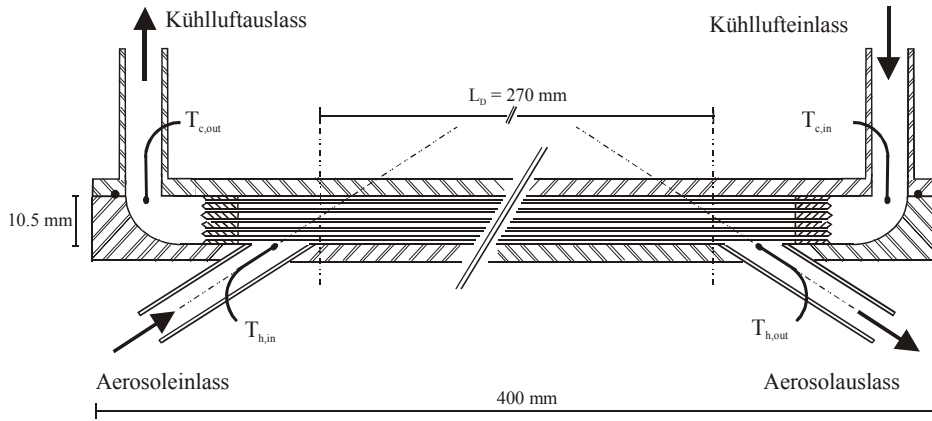


Abb. 8: Längsschnitt des Miniaturrohrbündelwärmeübertragers.

Die Modellaerosolsynthese erfolgte ähnlich wie unter 3. beschrieben [7]. Zur Ermittlung eines repräsentativen Temperaturgradienten wurde die logarithmische mittlere Temperaturdifferenz  $\Delta T_{\log, \text{mean}}$  berechnet aus den zwei Einlass- und Auslasstemperaturen des im Gegenstrom betriebenen Wärmeübertragers herangezogen. Die Kühlluft wurde durch die Rohre geführt, während das Modellaerosol sie umströmte.

Gegenüber dem Thermalplattenpräzipitator traten bei den Experimenten zum Wärmeübertrager deutlich höhere isotherme Partikelabscheidungen auf, welche den geringeren Strömungsgeschwindigkeiten zugeordnet werden können. Somit kann aus diesen Experimenten auf die Kopplung der verschiedenen Abscheidemechanismen rückgeschlossen werden. Die gemessene Abscheidung  $\varepsilon_{\text{tot},i}$  lässt sich für jede Partikelgrößenklasse  $i$  als Überlagerung der isothermen Abscheidung  $\varepsilon_{\text{iso},i}$  mit der thermophoretischen Deposition  $\varepsilon_{\text{th},i}$  beschreiben:

$$\varepsilon_{\text{tot},i} = \varepsilon_{\text{iso},i} + \varepsilon_{\text{th},i} + f_{\text{iso},\text{th}} \quad (3)$$

Dabei repräsentiert  $f_{\text{iso},\text{th}}$  einen Korrekturterm für den Mechanismus der Kopplung der verschiedenen Depositionsmechanismen. Entgegen früherer Arbeiten auf diesem Gebiet [9] ergab sich bei den im Rahmen dieses Förderprogramms durchgeführten Arbeiten die beste Übereinstimmung unter der Annahme unabhängig agierender Depositionsmechanismen, d.h.  $f_{\text{iso},\text{th}} = -\varepsilon_{\text{th},i} \times \varepsilon_{\text{iso},i}$ . Abb. 9 zeigt  $\varepsilon_{\text{tot},i}$ ,  $\varepsilon_{\text{iso},i}$  sowie daraus für verschiedene  $f_{\text{iso},\text{th}}$  errechnete  $\varepsilon_{\text{th},i}$ .

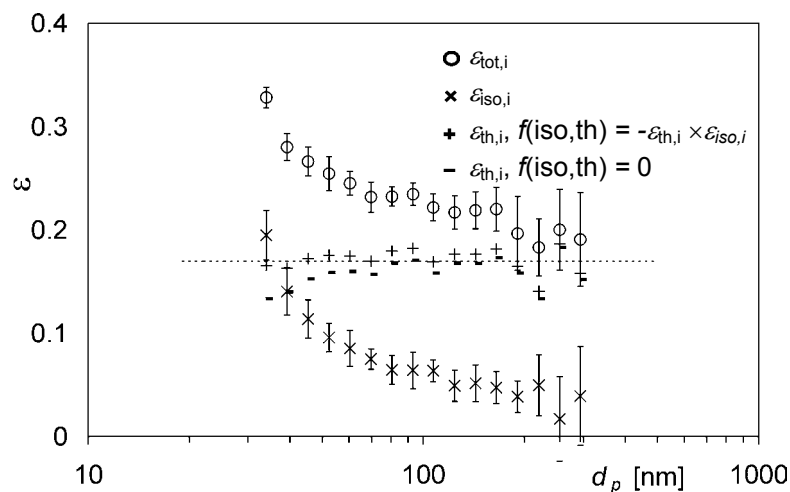
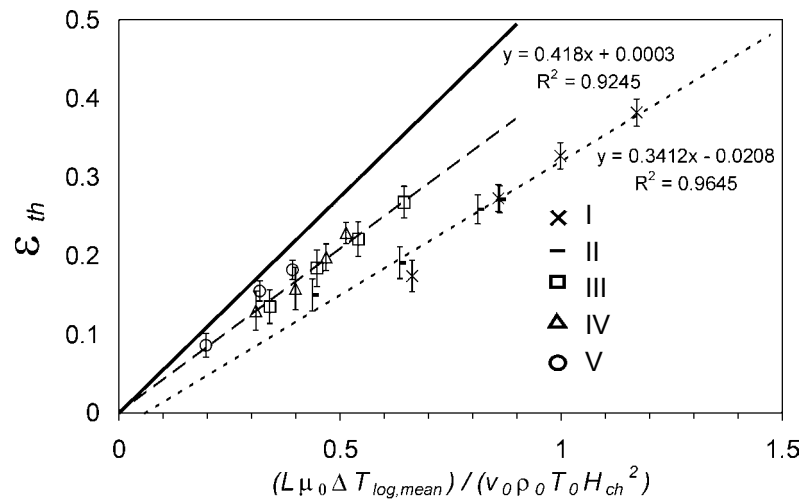


Abb. 9:  $\varepsilon_{\text{tot},i}$ ,  $\varepsilon_{\text{iso},i}$  und  $\varepsilon_{\text{th},i}$  berechnet aus  $f_{\text{iso},\text{th}} = -\varepsilon_{\text{th},i} \times \varepsilon_{\text{iso},i}$  und  $f_{\text{iso},\text{th}} = 0$  für ein Experiment. Die gestrichelte Linie zeigt  $\varepsilon_{\text{th,avg}}$  für aus  $f_{\text{iso},\text{th}} = -\varepsilon_{\text{th},i} \times \varepsilon_{\text{iso},i}$ .

Die für die verschiedenen Experimente ermittelten  $\varepsilon_{th,i}$  lassen sich als Funktion der Betriebsparameter des Miniaturrohrbündelwärmeübertragers darstellen (Abb. 10) [7].



**Abb. 9:**  $\varepsilon_{th,avg}$  für verschiedene Experimente über  $(L\mu_0\Delta T_{log,mean})/(v_0\rho_0T_0H_{ch}^2)$ . Die Linien sind lineare Fits für  $5 \text{ l min}^{-1}$  (gepunktet) und  $10 \text{ l min}^{-1}$  (gestrichelt) Kühlluftstrom.

Damit konnte gezeigt werden, dass sich in Analogie zu den Experimenten am Thermalplattenpräzipitator [6] für einen bestimmten Kühlluftstrom ein linearer Zusammenhang zwischen  $(L\mu_0\Delta T_{log,mean})/(v_0\rho_0T_0H_{ch}^2)$  und  $\varepsilon_{th}$  ergibt, was den experimentellen Aufwand zur Vorhersage der thermophoretischen Partikelabscheidung in derartigen Wärmeübertragern deutlich vereinfacht.

Für eine zuverlässige Abscheidung von Dieselrußpartikeln sind der vollständigen thermophoretischen Deposition aufgrund der relativ geringen Abgastemperaturen von i.R. weniger als  $300 \text{ }^\circ\text{C}$  sowie den hohen Strömungsgeschwindigkeiten Grenzen gesetzt. Die Deposition der Partikeln erfolgt an den kälteren Stellen des Abscheidesystems, so dass unter den dort vorherrschenden Bedingungen keine kontinuierliche Oxidation und Gasifizierung der Rußdeposite möglich ist [10].

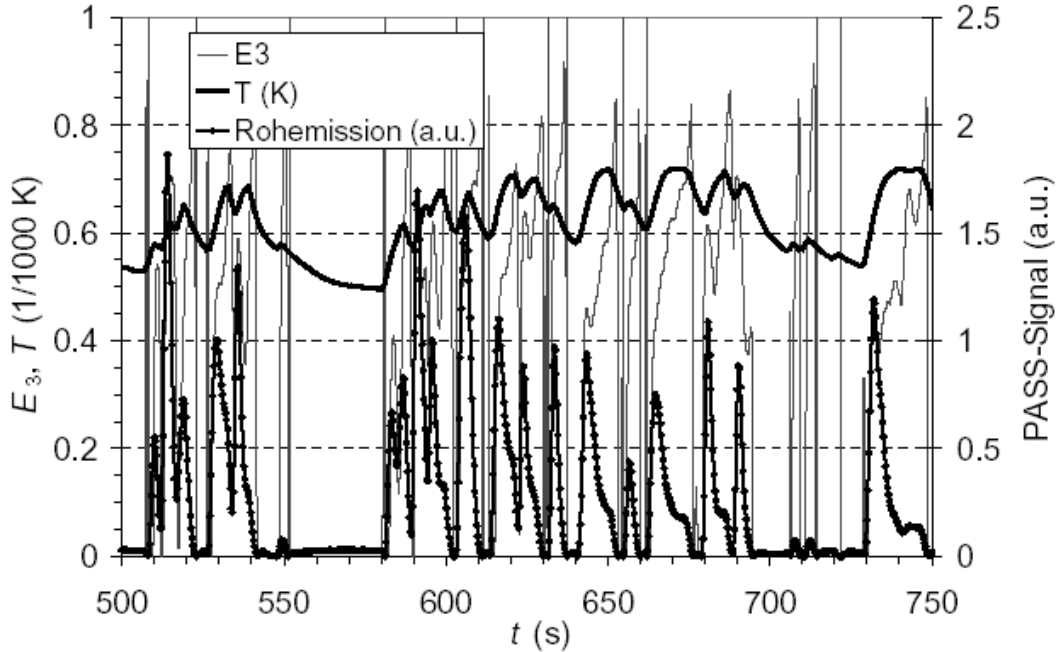
Im weiteren fokussierte die Arbeit auf den Beitrag von Thermophorese zur Partikeldeposition im Betrieb eines Katalysatorsystems zur Rußpartikelabscheidung.

## 6. Thermophorese im PM-Kat<sup>®</sup> im transienten Betrieb

Im Rahmen dieses Förderprojekts wird die Thermophorese bei Dieselprozessen im Hinblick auf ihren Beitrag zur Gesamtabscheidung untersucht. Experimentelle Ergebnisse zur isothermen Rußpartikelabscheidung sowie der Oxidationskinetik des abgeschiedenen Rußes unter abgasrelevanten Bedingungen an neu entwickelten Katalysatorträgerstrukturen liegen bereits vor [11]. Dazu wurden mittels Modellruß Depositionsuntersuchungen mit anschließenden REM-Aufnahmen durchgeführt und diese Strömungsbedingungen anhand eines Strömungsmodells der Katalysatorträgerstruktur basierend auf der kommerziellen CFD-Software CFX 5.6 nachgebildet. Die isotherme Partikeldeposition konnte mittels einer Lagrange'schen Vorgehensweise (Partikeltrajektorien) bereits gut mit den auf REM-Aufnahmen ersichtlichen Abscheidemustern in Einklang gebracht werden. Ein Euler/Euler-Verfahren befindet sich derzeit in Entwicklung [12].

Bei umfangreichen Untersuchungen zum Abscheideverhalten der PM-Kat<sup>®</sup>-Strukturen am Nfz-Motorenprüfstand zeigte sich, dass die Abscheideeffizienz während des transienten Prüfzyklus (ETC) um etwa 15-50 % höher war als während des stationären Prüfzyklus (ESC)

[13]. Abb. 10 zeigt die Nfz-Rußemission und den Verlauf der Abgastemperatur während des ETC. Bei Lastwechseln gehen Rußemissionspeaks mit einer Erhöhung der Abgastemperatur einher, so dass sich zeitlich variierende Temperaturgradienten in der Struktur etablieren, welche eine thermophoretische Deposition der Rußpartikeln bewirken.



**Abb.10:** Massenbezogener Trenngrad E3, Abgastemperatur vor dem Partikelkatalysator sowie Rußemission während eines ETC-Tests am Nfz-Motorenprüfstand.

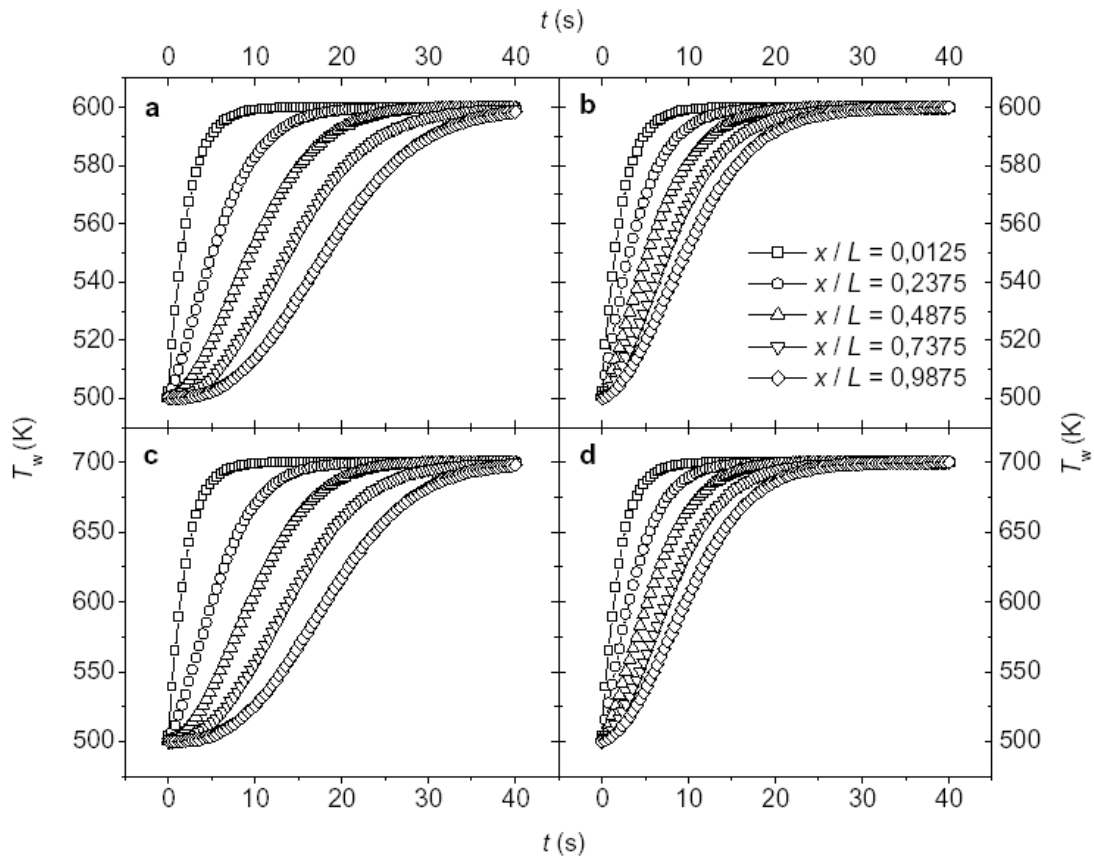
Im Rahmen dieser Arbeit galt es, den thermophoretischen Einfluss auf die Partikelabscheidung zu ermitteln. Deshalb wurde ein einfaches Modell laminar durchströmter Rohre, welche dicht gepackt aneinander liegen, herangezogen, um daran das Aufheizverhalten der Katalysatorstrukturen bei Lastwechseln abzubilden [14].

Abb. 11 zeigt den zeitlichen Verlauf der Katalysatorwandtemperatur  $T_w$  an verschiedenen axialen Positionen im System für Eintrittstemperaturen  $T_h = 600$  K (a und b) bzw. 700 (c und d) sowie  $RG = 58.720$  h<sup>-1</sup> (a und c) bzw. 117.440 h<sup>-1</sup> (b und d). Für geringe Strömungsgeschwindigkeiten ergibt sich ein homogener Temperaturverlauf in der Struktur erst nach  $\sim 35$  s, bei den höheren bereits nach  $\sim 25$  s. Für das Abgassystem vor dem Partikelkatalysator wurden Zeitintervalle von 5-10 s bis zum Erreichen einer konstanten Abgastemperatur beobachtet (Abb. 10). Das Abscheidersystem weist eine relativ hohe thermische Masse von  $\sim 750$  g l<sup>-1</sup> auf, so dass damit die höheren berechneten Zeiten bis zum Aufheizen des Systems erklärt werden können.

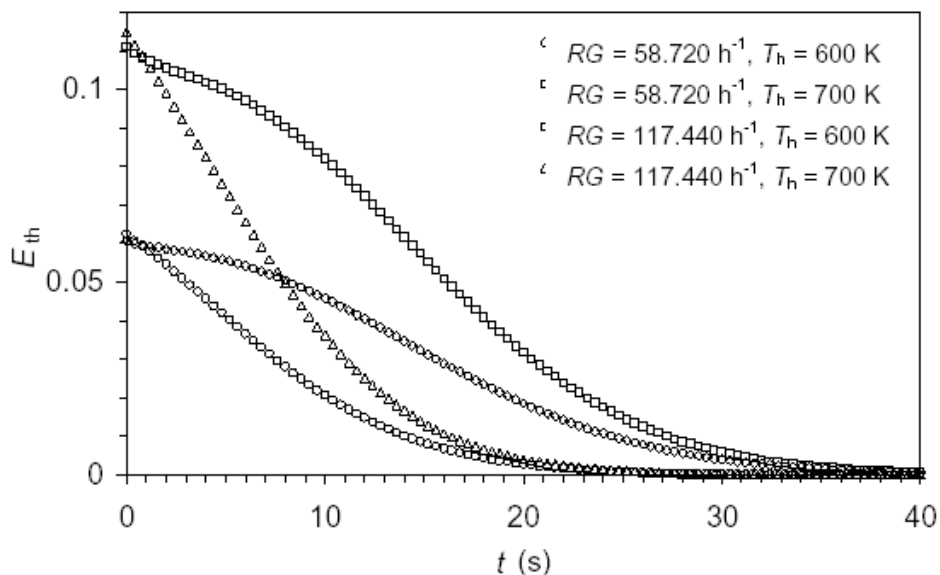
Diese zeitlichen Temperaturverläufe wurden im weiteren herangezogen, um zusammen mit dem zuvor bestimmten  $K_{th}$  von fraktal-ähnlichen Rußpartikelagglomeraten die thermophoretische Deposition von Rußpartikeln während dieser Aufheizphase der Abscheiderstruktur abzuschätzen. Dazu wurde gemäß den Vorschlägen von Houssiadas und Drossinos [15] die Lösung von Nishio et al. [16] appliziert, welche auch die bei laminaren Strömungen beobachtete thermophoretische Deposition gut wiedergab [12]:

$$\varepsilon_{th} = 1 - \exp\left(-\frac{c_p \mu_{avg} K_{th}}{k_g T_{avg}} (T_{h,0} - T_{w,0}) \left(1 - \exp\left(-\frac{4hx}{d v_{x,0} \rho_{avg} c_p}\right)\right)\right) \quad (3)$$





**Abb.11:** Berechneter zeitlicher Verlauf der Wandtemperatur  $T_w$  einer 152 mm langen Partikelkatalysatorstruktur für Eintrittstemperaturen  $T_h = 600$  K (a und b) bzw. 700 (c und d) sowie  $RG = 58.720 \text{ h}^{-1}$  (a und c) bzw.  $117.440 \text{ h}^{-1}$  (b und d) an verschiedenen axialen Positionen.



**Abb.12:** Berechneter zeitlicher Verlauf des thermophoretischen Trenngrades  $E_{th}$  in der 152 mm langen Modellstruktur für die in Abb. 11 dargestellten Verläufe der Strukturtemperatur.

Dabei wird jeweils für ein Zeitintervall  $\Delta t$  von einem stationären Geschwindigkeits- und Temperaturverlauf ausgegangen. Die berechneten thermophoretischen Abscheideeffizienzen der 40 einzelnen Strukturabschnitte werden gemäß Gl. (2.41) gekoppelt, so dass sich daraus der zeitliche Verlauf des thermophoretischen Trenngrades  $E_{th}$  für die in Abb. 11 dargestellten Temperaturverläufe ergibt (Abb. 12).

Für höhere Eintrittstemperaturen  $T_h = 700$  K zeigt sich eine anfängliche thermophoretische Abscheidung von  $\sim 11$  %, welche für höhere  $RG$  schneller abnimmt als für geringere, da sich in diesem Fall die Abscheiderstruktur schneller aufheizt (Abb. 12 c und d). Für geringere Eintrittstemperaturen ergibt sich eine maximale thermophoretische Abscheidung von  $\sim 6$  %, welche je nach Strömungsgeschwindigkeit entsprechend der Aufheizgeschwindigkeit der Struktur (Abb. 12 a und b) abnimmt.

Dieser thermophoretische Beitrag zur Partikeldeposition kann nun in ein phänomenologisches Modell integriert werden, um für ein Nfz-Partikelkatalysatorsystem die überlagerten Prozesse der Partikeldeposition und -oxidation zu berechnen [17].

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des geförderten Projekts wurden experimentelle Untersuchungen zum Verhalten von Rußpartikelagglomeraten in Temperaturgradientenfeldern durchgeführt. Dazu wurde zum einen ein Plattenthalpräzipitator entwickelt und gebaut, mit dem eine signifikante thermophoretische Abscheidung selbst bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten ermöglicht wird. Aus den ermittelten Abscheideraten konnte der thermophoretische Koeffizient errechnet werden, welcher im Gegensatz zu sphärischen Aerosolpartikeln für größere Rußpartikelagglomerate im Übergangsbereich nahezu unabhängig vom Partikeldurchmesser ist.

Um das Verfahren der kontinuierlichen thermophoretischen Deposition mit minimalem zusätzlichem Energieaufwand zu untersuchen, wurde ein Minaturrohrbündelwärmeübertrager entwickelt und gefertigt, mittels dessen umfangreiche Parameterstudien zur thermophoretischen Abscheidung durchgeführt wurden. Es wurde ein Kopplungsmechanismus zwischen isothermer und thermophoretischer Abscheiderate ermittelt. Darüber hinaus konnte aufgezeigt werden, dass sich für den Wärmeübertrager eine lineare Abhängigkeit zwischen bestimmenden Parametern und thermophoretischer Abscheideeffizienz ergibt. Für Dieselprozesse ist eine Partikelabreinigung basierend auf Thermophorese allein nur schwer zu bewerkstelligen.

Für die neu entwickelten Partikelkatalysatorträgerstrukturen wurde ein CFD-Modell entwickelt, welches für isotherme Betriebsbedingungen eine gute Übereinstimmung zwischen experimentell ermittelten Depositionsraten und -orten sowie den berechneten ergibt. Basierend auf den im Rahmen dieses Förderprojekts bestimmten thermophoretischen Koeffizienten für fraktal-ähnliche Rußpartikelagglomerate wurde das Modell um einen Term für den Einfluss der Thermophorese auf die Partikeldeposition erweitert. Damit konnte der Beitrag von Thermophorese zur Partikeldeposition in transienten Betriebszyklen analysiert und die verstärkte Partikelabscheidung gegenüber stationären Testzyklen erklärt werden.

## Danksagung

Die Autoren danken der Max-Buchner-Forschungstiftung, die durch ihre finanzielle Unterstützung die vorgestellten Arbeiten ermöglicht hat.

## Literatur

- [1] J.E. Johnson, D.B. Kittelson; Deposition, Diffusion and Adsorption in the Diesel Oxidation Catalyst, *Appl. Cat. B: Environm.* **10** (1996) 117-137.
- [2] L. Talbot, R.K. Cheng, R.W. Schefer, D.R. Willis; Thermophoresis of Particles in a Heated Boundary Layer, *J. Fluid Mech.* **101** (1980) 737-758.
- [3] S.K. Friedlander; *Smoke, Dust and Haze*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [4] G.K. Batchelor, C. Shen; Thermophoretic Deposition of Particles in Gas Flowing over Cold Surfaces, *J. Colloid Interface Sci.* **107** (1985) 21 – 37.
- [5] D.E. Rosner, Y.F. Khalil; Particle Morphology– and Knudsen Transition-Effects on Thermophoretically Dominated Total Mass Deposition Rates from “Coagulation-Aged” Aerosol Population, *J. Aerosol Sci.* **31** (2000) 273 – 292.
- [6] A. Messerer A., R. Niessner, U. Pöschl; Thermophoretic Deposition of Soot Aerosol Particles under Experimental Conditions relevant for Modern Diesel Engine Exhaust Gas Systems, *J. Aerosol Sci.* **34** (2003) 1009–1021.
- [7] A. Messerer, R. Niessner, U. Pöschl; Miniature Pipe Bundle Heat Exchanger for Thermophoretic Deposition of Ultrafine Soot Aerosol Particles at High Flow Velocities, *Aerosol Sci. Technol.* **38** (2004) 456-466.
- [8] C. Helsper, W. Mölter, F. Löffler, C. Wadenpohl, S. Kaufmann, G. Wenninger; Investigation of a New Aerosol Generator for the Production of Carbon Aggregate Particles, *Atmos. Environ.* **27** (1993) 1271-1275.
- [9] F.J. Romay, S.S. Takagaki, D.Y.H. Pui, B.Y.H. Liu; Thermophoretic Deposition of Aerosol Particles in Turbulent Pipe Flow, *J. Aerosol Sci.* **29** (1998) 943–959.
- [10] A. Messerer, R. Niessner, U. Pöschl; Comprehensive Kinetic Characterization of the Oxidation and Gasification of Model and Real Diesel Soot by Nitrogen Oxides and Oxygen under Engine Exhaust Conditions: Measurement, Langmuir-Hinshelwood and Arrhenius-Parameters, *Carbon* (2005) eingereicht.
- [11] A. Messerer, D. Rothe, U. Pöschl, R. Niessner; Advances in the Development of Filterless Soot Deposition Systems for the Continuous Removal of Diesel Particulate Matter, *Topics Catal.* **30/31** (2003) 247-250.
- [12] A. Messerer, H.-J. Schmid, C. Knab, U. Pöschl, R. Niessner; Enhancement of the Deposition of Ultrafine Diesel Soot Particles by Microsphere Coating on Metal Support-Based Catalyst Structures, *Chem. Ing. Tech.* **76** (2004) 1092-1096.
- [13] D. Rothe, F.I. Zuther, E. Jacob, A. Messerer, U. Pöschl, R. Niessner, C. Knab, M. Mangold, C. Mangold; New Strategies for Soot Emission Reduction for HD Vehicles, *SAE Techn. Pap.* 2004-01-3024, 2004.
- [14] A. Messerer; *Mechanistische Untersuchungen und Modellbildung der kontinuierlichen Rußpartikeldeposition und –oxidation in neuartigen Katalysatorstrukturen für*

*Nutzfahrzeugabgassysteme*, Dissertation TU München, Institut für Wasserchemie, in Vorbereitung.

- [15] C. Housiadas, Y. Drossinos; Thermophoretic Deposition in Tube Flow, *Aerosol Sci. Technol.* **39** (2005) 304-318.
- [16] G. Nishio, S. Kitani, K. Takahashi; Thermophoretic Deposition of Aerosol Particles in a Heat-Exchanger Pipe, *Ind. Eng. Chem.* **13** (1974) 408-415.
- [17] A. Messerer, D. Rothe, R. Niessner, U. Pöschl; Kinetische Betrachtungen und Modellrechnungen zur kontinuierlichen Regeneration von NFZ-Dieselrußpartikelabscheidesystemen, *Chem. Ing. Tech.* **77** (2005) im Druck.