

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung	2
<b>2</b>	<b>KENNTNISSTAND</b>	<b>4</b>
2.1	Emissionen des Dieselmotors	4
2.1.1	Versottungsfördernde Abgasbestandteile	5
2.2	Maßnahmen zur Emissionsminderung im Dieselmotor	11
2.2.1	Abgasrückführung	11
2.2.2	Zielkonflikt der AGR mit anderen Abgasnachbehandlungskomponenten	13
<b>3</b>	<b>GRUNDLAGEN</b>	<b>14</b>
3.1	Transport und Abscheidung von Partikeln	14
3.1.1	Sedimentation	14
3.1.2	Interzeption (Sperrereffekt)	15
3.1.3	Impaktion (Trägheit)	15
3.1.4	Diffusion	17
3.1.5	Diffusiophorese	19
3.1.6	Elektrostatik	21
3.1.7	Thermophorese	21
3.2	Anhaften von Partikeln	22
3.2.1	Kondensation	22
3.2.2	Adhäsion	22
3.3	Berechnung von Partikelhaft- und -ablösekräften	23
3.3.1	Haftkräfte auf Partikel	23
3.3.2	Partikelabscheidung: Transportgeschwindigkeiten und -kräfte	30
3.3.3	Partikelablösung	34
3.3.4	Gleichgewichtskriterien	36
3.4	Grundlagen der turbulenten Rohrströmung mit Wärmeübertragung	39
3.4.1	Wärmeverluste bei der Strömung im Rohr – Lokale Energiebilanz	39
3.4.2	Wärmeverluste unter Berücksichtigung einer gasseitigen Isolationsschicht	40

<b>4</b>	<b>VERSUCHSDURCHFÜHRUNG UND AUSWERTUNG</b>	<b>45</b>
4.1	Hochdruck-AGR: Ablagerungsversuche im stationären Motorbetrieb	45
4.1.1	Aufbau der AGR-Strecke und des verwendeten Doppelrohrwärmetauschers	45
4.1.2	Versuchsmotor und Versuchsraum	47
4.2	Niederdruck-Abgaskühlung: Ablagerungsversuche im stationären Motorbetrieb	50
4.2.1	Aufbau der Abgaskühlstrecke und des verwendeten Doppelrohrwärmetauschers	50
4.2.2	Versuchsmotor und Versuchsraum	52
4.3	Schichtdickenbestimmung mittels Neutronenradiographie	52
4.4	Auswertung der Schichtdickenverläufe	54
4.4.1	Berechnungsverfahren	54
4.4.2	Schichtaufbau: Einfluss der Kühlmitteltemperaturen	56
4.4.3	Schichtaufbau: zeitliche und örtliche Entwicklung	61
4.4.4	Schichteigenschaft: Wärmeleitfähigkeit - Entwicklung bei hohen HC-Anteilen	63
4.4.5	Schichteigenschaft: Oberflächenbeschaffenheit - Entwicklung bei hohen HC-Anteilen	65
4.4.6	Auftreten wellenförmiger Ablagerungserscheinungen	66
<b>5</b>	<b>MODELLIERUNG DES VERSCHMUTZUNGSPROZESSES</b>	<b>70</b>
5.1	Bilanzgleichungen	74
5.1.1	Massenbilanz	74
5.1.2	Impulsbilanz	74
5.1.3	Energiebilanz	75
5.2	Wärmetransport	75
5.2.1	Wärmeübergang	75
5.3	Ablagerungsschicht	75
5.3.1	Schichtwachstum	76
5.3.2	Gleichgewichtszustand	78
5.3.3	Wärmeleitfähigkeit	80
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION</b>	<b>81</b>
6.1	Betriebspunkt 1	83
6.2	Betriebspunkt 2	90
6.3	Betriebspunkt 3	92

6.4	Betriebspunkt 4	95
6.5	Betriebspunkt 5	97
6.6	Betriebspunkt 6	99
6.7	Betriebspunkt 7	102
7	<b>ZUSAMMENFASSUNG, GRENZEN DER MODELLBILDUNG UND AUSBLICK</b>	<b>105</b>
8	<b>ANHANG</b>	<b>109</b>
8.1	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>109</b>
8.1.1	Abkürzungen	109
8.1.2	Dimensionslose Kennzahlen	109
8.1.3	Physikalische Größen und Konstanten	110
8.1.4	Indizes	111
8.1.5	Griechische Symbole	113
8.2	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>114</b>

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1: EXEMPLARISCHE ZUSAMMENSETZUNG VON DIESELROHEMISSIONEN IN VOLUMENPROZENT [12]	4
ABBILDUNG 2-2: SIEDETEMPERATUREN DER WICHTIGSTEN KOHLENWASSERSTOFFVERBINDUNGEN IM DIESELKRAFTSTOFF [18]	6
ABBILDUNG 2-3: RUßBILDUNG NACH DER ACETYLEN- ODER POLYZYKLENHYPOTHESE [20]	7
ABBILDUNG 2-4: RUßBILDUNG NACH DER ELEMENTARKOHLENSTOFFHYPOTHESE [20][21]	8
ABBILDUNG 2-5: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES PHÄNOMENOLOGISCHEN RUßMODELLS NACH TAO ET AL. [12][19]	9
ABBILDUNG 2-6: MIKROSKOPISCHE AUSWERTUNG EINES MITTELS GASENTNAHMESONDE AUS DEM BRENNRAUM GEWONNENEN PARTIKELAGGLOMERATES , 33,3MS NACH BRENNBEGINN [22]	9
ABBILDUNG 2-7: TYPISCHE PARTIKELGRÖßENVERTEILUNG EINES DIESELMOTORS [25]	10
ABBILDUNG 2-8: SCHEMATISCHER AUFBAU VON HOCHDRUCK- (HD) UND NIEDERDRUCK-AGR (ND)	12
ABBILDUNG 3-1: SEDIMENTATION (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG) [30]	14
ABBILDUNG 3-2: SPERREFFEKT (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG) [31]	15
ABBILDUNG 3-3: TRÄGHEIT (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG) [31]	15
ABBILDUNG 3-4: CFD-SIMULATION DER PARTIKELBEWEGUNG BEI ZENTRALER PARTIKELDOTIERUNG IN EINEM DURCHSTRÖMTEN ROHR.	16
ABBILDUNG 3-5: ZONEN ERHÖHTER PARTIKELABLAGERUNG IN „WAVY-FIN“-AGR-KÜHLERN [35]	16
ABBILDUNG 3-6: DIFFUSION (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG) [31]	18
ABBILDUNG 3-7: DIFFUSIOPHORESE (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG)	19
ABBILDUNG 3-8: THERMOPHORESE IM DURCHSTRÖMTEN, GEKÜHLTEN ROHR (SCHEMATISCHE DARSTELLUNG); WÄRMERE ZONEN SIND DURCH DUNKLERE, KÄLTERE ZONEN DURCH HELLERE ROTFÄRBUNG VERDEUTLICHT	21
ABBILDUNG 3-9: HAFTKRAFTVERLAUF ÜBER DEM PARTIKELDURCHMESSER ZWEIER GLEICH GROßER KUGELN	24
ABBILDUNG 3-10: OBEN: MODELLVORSTELLUNG ZUR PARTIKELANORDNUNG NACH [40]; UNTEN: DARSTELLUNG DER VAN-DER-WAALS-KRÄFTE ÜBER KLEINEN PARTIKELDURCHMESSERN DP (NANOPARTIKEL), ERMITTELT FÜR DREI VERSCHIEDENE DURCHMESSER D DER GROßEN PARTIKEL	26
ABBILDUNG 3-11: HAFTKRÄFTE DURCH FLÜSSIGKEITSBRÜCKEN FÜR PARTIKELDURCHMESSER $D_p = 100$ NM. LINKS: MODELLVORSTELLUNG NACH [41]; RECHTS OBEN: HAFTKRAFTVERLAUF ÜBER DEM BENETZUNGSWINKEL FÜR VERSCHIEDENE FLÜSSIGKEITEN BEI $T = 60^\circ\text{C}$ UNTER DER VORAUSSETZUNG $\theta = 0^\circ$ ; RECHTS UNTEN: HAFTKRAFTVERLAUF ÜBER DER TEMPERATUR DER DIESEL-FLÜSSIGKEITSBRÜCKE UNTER DER VORAUSSETZUNG KONSTANTER KONTAKT- ( $\theta = 0^\circ$ ) UND BENETZUNGSWINKEL ( $\alpha = 30^\circ$ )	28
ABBILDUNG 3-12: VERLAUF DER KNUDSEN-ZAHL IN ABHÄNGIGKEIT VON TEMPERATUR UND PARTIKELGRÖßE	31
ABBILDUNG 3-13: THERMOPHORETISCHER KOEFFIZIENT IN ABHÄNGIGKEIT VON TEMPERATUR UND PARTIKELGRÖßE	32

## **Kurzfassung / Abstract**

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Langzeitversuche über den Aufbau von Ablagerungsschichten in Doppelrohrwärmeübertragern infolge der Beaufschlagung mit Dieselrohmissionen durchgeführt. Es wurde festgestellt, dass die Ablagerungen insbesondere durch Partikel und auskondensierende Komponenten wie Kohlenwasserstoffe entstehen, wodurch an der Innenseite der Kühlerrohre eine stark isolierende Schicht erzeugt wird. Die Mechanismen des Schichtaufbaus wurden in Abhängigkeit von der Abgaszusammensetzung sowie von allgemeinen Prozessgrößen modelliert und anhand der Messergebnisse validiert.

In this study, long term experiments were carried out in order to build up deposit layers in tube-in-tube heat exchangers as a result of an exposure to diesel exhaust-gas emission. It was determined that the deposits are generated due to particles and condensing components such as hydrocarbons whereby an isolating layer is formed on the inner surface of the heat exchanger. The mechanisms of deposition buildup have been modeled in dependency on both the exhaust gas composition and general process factors and validated by means of the experimental data.