

Hans-Peter
Reichenberger

Schriftenreihe zur
Aufbereitung und Veredlung

84

Abgasreinigung mit einem radial durchströmten regenerativen Schüttschichtwärmeübertrager – Kombination von thermischer Nachverbrennung und integrierter Staubabscheidung

Herausgeber:
Univ.-Prof. Dr. Kathrin Greiff
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

RWTHAACHEN

ABGASREINIGUNG
MIT EINEM RADIAL DURCHSTRÖMTEN REGENERATIVEN
SCHÜTTSCHICHTWÄRMEÜBERTRAGER –
KOMBINATION VON THERMISCHER NACHVERBRENNUNG
UND INTEGRIERTER STAUBABSCHEIDUNG

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (Univ.) Hans-Peter Reichenberger

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Georg Quicker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich

Tag der mündlichen Prüfung: 16. September 2022

Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Kathrin Greiff
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba

Band 84

Hans-Peter Reichenberger

**Abgasreinigung mit einem radial durchströmten
regenerativen Schütttschichtwärmeübertrager –
Kombination von thermischer Nachverbrennung
und integrierter Staubabscheidung**

Shaker Verlag
Düren 2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2022)

Lehrstuhl für Anthropogene Stoffkreisläufe
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Kathrin Greiff
Wüllnerstraße 2
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-95700, Fax +49(0)241 - 8092232
E-Mail: lehrstuhl@ants.rwth-aachen.de

Lehr- und Forschungsgebiet Technologie der Energierohstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker
Wüllnerstraße 2
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-95705, Fax +49(0)241 - 8092624
E-Mail: info@teer.rwth-aachen.de

Lehr- und Forschungsgebiet Aufbereitung mineralischer Rohstoffe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Wotruba
Lochnerstraße 4 - 20
D - 52056 Aachen
Tel. +49(0)241 - 80-97246, Fax +49(0)241 - 8092635
E-Mail: amr@amr.rwth-aachen.de

Copyright Shaker Verlag 2022

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8819-9
ISSN 1617-6545

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

*„Leben können wir nur in der Gegenwart
von Leistungen der Vergangenheit,
die wir erdacht und geplant haben,
als die Gegenwart noch Zukunft war.“*

Josef Schmidt

Gründer von SchmidtColleg
und Entwickler des Management-Systems/-Lehrwerks „UnternehmerEnergie“

Für meine Eltern

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand am FRAUNHOFER INSTITUT FÜR UMWELT-, SICHERHEITS- UND ENERGIETECHNIK (UMSICHT), Institutsteil Sulzbach-Rosenberg (vormals ATZ ENTWICKLUNGSZENTRUM). Gelingen konnte sie durch die tatkräftige Mithilfe besonderer Menschen. Ihnen gebührt mein herzlichster Dank!

An erster Stelle bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Quicker, Institutsleiter des Lehr- und Forschungsgebiets TECHNOLOGIE DER ENERGIEROHSTOFFE (TEER) an der RHEINISCH-WESTFÄLISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE AACHEN, und bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, Inhaber des Lehrstuhls RESSOURCEN- UND ENERGIESYSTEME (RES) an der TECHNISCHEN UNIVERSITÄT DORTMUND, für die sehr gute fachliche Betreuung meiner Dissertation. Ihre Anregungen und ihre individuelle Förderung halfen mir dabei diese Arbeit zu erstellen. Frau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Kathrin Greiff danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Meinen Dank spreche ich Herrn Dr.-Ing. Konrad Till und Herrn Dr.-Ing. Rainer Scholz aus: Beide waren mir in vielen Diskussionen durch ihren Rat, ihre Fachkompetenz und ihre beharrliche Geduld (!) eine große Hilfe. Dies hat mich vor so manchen experimentellen und mathematischen Umwegen bewahrt und letztlich den Weg zur Fertigstellung meiner Arbeit geebnet.

Weiterhin danke ich Herrn Dipl.-Ing. Gerold Dimaczek für die Bereitstellung von Fachpersonal und instrumenteller Versuchsausstattung, Herrn Dr.-Ing. Rolf Börner und Herrn Steffen Lippmann für ihre Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen, Herrn Prof. Dr. rer. nat. Mario Mocker für seine Erfahrungswerte zum Schüttschichtwärmeübertrager und Herrn Bernhard Hirsch für die funktional gekonnte Umsetzung der verfahrenstechnischen Vorgaben bei der Anlagenkonstruktion. Den Herren Kurt Deyerl, Gerhard Guttenberger, Helmut Heinel, Erwin Herbst und Claus Lindmayer danke ich für die immer prompte und kompetente Ausführung aller Arbeiten rund um den Aufbau und die Instandhaltung der Anlagentechnik. Frau Andrea Farmer danke ich für die stets reibungslose Erledigung vielfältiger Organisations- und Verwaltungsaufgaben sowie für die oft mit hohem Unterhaltungswert geprägten Gespräche, durch die der Arbeitsalltag nie langweilig wurde. Mein weiterer Dank gehört den Studenten, die einen Beitrag im Rahmen ihrer Diplomarbeit bzw. ihres Praktikums leisteten: Herr Roland Engelhard, Herr Ruben Henrich, Frau Sandra Irmer, Frau Daniela Kulka, Herr Matthias Merkel, Frau Claudia Moser, Herr Jan Ochmann, Herr Manish Sonarghare, Herr Dominik Springer und Herr Prateek Thakkar. Schließlich danke ich

allen Institutskollegen für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und für das freundliche, bodenständige oberpfälzer Arbeitsklima.

Mein Dank gilt zudem der Firma LUFT- UND THERMOTECHNIK BAYREUTH GMBH (LTB) – aufgegangen in der Firma DÜRR SYSTEMS AG – für die gute Kooperation sowie für die finanzielle und die fertigungstechnische Unterstützung bezüglich der Technikumsanlage. Hierbei danke ich vor allem dem ehemaligen Geschäftsführer, Herrn Dipl.-Ing. Bernd Rüskamp, für seinen fachlichen Rat und Herrn Reimund Friedel für die Organisation der Bauteilfertigung.

Meinen Eltern bin ich zu tiefer Dankbarkeit verpflichtet, da sie mich immer unterstützt haben und durch ihre Förderung erst die Voraussetzungen für mich geschaffen haben, dass ich diese Dissertation entstehen lassen konnte. Meinem Bruder und seiner Familie danke ich sehr für die Hilfsbereitschaft in vielen Lebenslagen, was mir auch während des Verfassens meiner Arbeit zugutekam. Vielmals danke ich Herrn Josef Schmidt für die allzeit bereichernden Gespräche und Denkanstöße, die mich in meiner persönlichen Entwicklung vorangebracht und zur Promotion bestärkt haben.

KURZFASSUNG

Um Abgase zu reinigen, die mit Staubpartikeln und flüchtigen organischen Verbindungen belastet sind, werden überwiegend Filter zur Entstaubung sowie thermische Oxidationsverfahren zur Umwandlung der flüchtigen Schadstoffe in gasförmige Produkte, wie Wasser und Kohlenstoffdioxid, eingesetzt. Bislang ist am Markt kein System verfügbar, das eine Kombination der beiden etablierten Verfahrensschritte in einem Aggregat ermöglicht. Ein kompakteres aber ebenso effektives, quasieinstufiges Reinigungssystem kann den Aufwand für die mehrstufige Abgasreinigung reduzieren, indem ein Teil der Investitions- und Betriebskosten eingespart und der erforderliche Platzbedarf verringert wird. Gerade für kleine mittelständische Unternehmen kann eine solche Lösung wirtschaftlich vorteilhaft sein.

Die vorliegende Arbeit befasst sich deshalb mit der Entwicklung und Erprobung eines alternativen Abgasreinigungsverfahrens, das die beiden Verfahrensschritte in einem Aggregat zusammenfasst. Als Grundlage dazu dient das Funktionsprinzip des regenerativen Schüttschichtwärmeübertragers mit radialer Durchströmung: Dieser wurde bereits als thermische Nachverbrennungsanlage für staubarme Abgase eingesetzt und zudem in modifizierter Bauweise als Schüttschichtfilter zur Partikelabscheidung genutzt.

Für das neue Verfahren wurden geeignete Schüttgutmaterialien untersucht und dabei diejenigen Parameter experimentell bestimmt, welche die Funktionalität des Gesamtsystems erheblich beeinflussen: Dies betrifft die Stoffwerte der Materialien als auch die in eigens konzipierten Versuchsanlagen ermittelten Kenngrößen, wie die charakteristischen Korngrößeneigenschaften sowie den Lückenanteil, den mechanischen Druck, den Druckverlust und das Staubrückhaltevermögen des Schüttungsbetts.

Zur Auslegung des neuen Verfahrensprinzips wurde in einem Berechnungsprogramm für die numerische Strömungssimulation ein instationär quasizweidimensionales Berechnungsmodell erstellt. Bisher wurde ein instationär eindimensionales Modell verwendet, bei dem die zeitlichen Veränderungen der Temperaturen im Schüttungsbett über die radiale Ortskoordinate ermittelt wurden. Mit dem erweiterten Rechenverfahren kann das Schüttungsbett – definiert als ein parallel durchströmtes Leitungssystem – axial in horizontalen Schichten dargestellt werden, wodurch sich die thermo- und fluiddynamischen Prozesse der instationären Bett durchströmung höhenabhängig beschreiben lassen. Das neue Modell ist nur annähernd in den Ortskoordinaten zweidimensional, da der Energie- und Stoffaustausch zwischen den einzelnen horizontalen Schichten nicht berücksichtigt wird. Bei genügend dünnen Schichten weichen die mittleren Druckverhältnisse der Schichten so geringfügig voneinander ab, dass kaum ein Queraustausch von

Massenströmen auftritt. Gegenüber komplexeren Simulationsmethoden bietet diese Vereinfachung den Vorteil, dass mit relativ geringem Berechnungsaufwand eine näherungsweise Systemauslegung für die praktische Anwendung nutzbar ist.

Um die Eignung des neuen Verfahrens erstmalig testen zu können, wurde eine Technikumsanlage für Abgasvolumenströme bis zu $2.000 \text{ m}^3_{\text{i.N.}}/\text{h}$ entwickelt, aufgebaut und erprobt. Ihre Besonderheit liegt in der Anordnung des radialen Schüttungsbetts: Es ist vertikal in zwei Regeneratorhälften geteilt, sodass die Heiz- und die Kühlphasen für die regenerative Wärmerückgewinnung in einer Anlage gleichzeitig realisiert werden können. Weiterhin ermöglicht eine speziell ausgebildete Bodengeometrie das einfache Abziehen des mit abgeschiedenem Staub beladenen Schüttguts.

Die Versuchskampagnen dienten dazu, die grundsätzliche Leistungsfähigkeit des Systems zu prüfen, gegebenenfalls Optimierungen an der Anlage vorzunehmen und die gemessenen Werte mit den Daten des neu erstellten Berechnungsmodells abzugleichen. Zur Simulation realer Abgase wurde Umgebungsluft angesaugt und in diese wurden Modellstaub bzw. als flüchtige Schadstoffe Ethanol und Propanol oder als gasförmiger Schadstoff Methan dosiert. Dabei wurden relativ hohe Konzentrationen erzeugt, um innerhalb des zeitlich eingeschränkten Technikumsbetriebs eine aussagekräftige Reinigungstendenz der Anlage ableiten zu können.

Während der ersten Versuchsreihen traten örtliche Fehlströmungen auf und bei den An- und Abfahrvorgängen verursachten thermische Spannungen eine Instabilität der Anlagenkonstruktion an den Stellen, wo zugleich hohe Temperaturen und hohe mechanische Drücke vorhanden waren. Die Anlage wurde daher baulich partiell verbessert.

Die gemessenen Daten konnten mit dem neuen Berechnungsmodell gut simuliert werden. Bei den Versuchen mit flüchtigen Schadstoffen zeigte sich allerdings, dass die im Modell unberücksichtigten thermochemischen Einflüsse zu einer leichten bis teilweise starken Differenz zwischen den gemessenen und den berechneten Temperaturen führten. Als Wärmerückgewinnungsgrade wurden Werte zwischen 88 % bis 95 % erreicht. Sie sollten künftig durch eine optimierte Betriebsweise weiter verbessert werden. Obwohl in den Vorversuchen bis zu 99,6 % des Modellstaubs abgeschieden wurde, sanken bei der Technikumsanlage die Staubabscheideraten des unregenerierten Schüttungsbetts von anfangs 98 % auf Werte zwischen 94,7 und 89,5 %. Dies lag vor allem an den Staubablagerungen, die beim Umschalten der Strömungsrichtung an den Ventilen mitgerissen oder aufgrund ungünstiger Strömungsverhältnisse wieder aus dem Schüttungsbett getragen wurden. Die flüchtigen Schadstoffe konnten jeweils zu etwa 90 % thermisch umgesetzt werden, wobei zu Beginn der Versuchskampagnen die Abscheideeffizienz beispielsweise für Methan bei 99,5 % und die für Ethanol bei 98 % lag. Ursächlich für die auftretenden Abweichungen war ein Schadstoffschlupf durch Kurzschlussströmungen.

Anhand der bisherigen Erkenntnisse ist das neue Verfahren grundsätzlich für die Abgasreinigung geeignet. Jedoch sind für die Funktionalität der Anlagentechnik noch Optimierungen und weitergehende Untersuchungen vorzunehmen, damit effektivere Abscheideraten und eine höhere konstruktive Beständigkeit erreicht werden können. Anschließend ist das optimierte System im industriellen Probetrieb unter realen Bedingungen und über einen längeren Zeitraum zu testen.

ABSTRACT

In order to clean exhaust gases that are contaminated with dust particles and volatile organic compounds, filters are mainly used for dedusting and thermal oxidation processes for converting the volatile pollutants into gaseous products such as water and carbon dioxide. So far, no system is available on the market that allows a combination of the two established process steps in one unit. A more compact but equally effective, quasi-one-stage purification system can reduce the effort required for multi-stage exhaust gas cleaning by saving some of the investment and operating costs and reducing the required space. Especially for small medium-sized companies such a solution can be economically advantageous.

Therefore the present thesis deals with the development and testing of an alternative exhaust gas cleaning process that combines the two process steps in one unit. The functional principle of the regenerative packed bed heat exchanger with radial flow serves as the basis for this: It has already been used as a thermal post-combustion system for low-dust exhaust gases and also used in a modified design as a packed bed filter for particle separation.

Suitable bulk materials were examined for the new process and those parameters were experimentally determined that significantly influence the functionality of the overall system: This concerns the materials characteristics as well as the parameters determined in specially designed test facilities, such as the characteristic grain size properties as well as the voids fraction, the mechanical pressure, the pressure loss and the dust retention capacity of the packed bed.

To design the new process principle, a transient quasi-two-dimensional calculation model was created in a calculation program for numerical flow simulation. Until now, a transient one-dimensional model was used, in which the temporal changes of the temperatures in the packed bed were determined via the radial spatial coordinate. With the extended calculation method, the packed bed – defined as a pipe system with parallel flow – can be represented axially in horizontal layers, whereby the thermo and fluid dynamic processes of the transient bed flow can be described as a function of height. The new model is only approximately two-dimensional in the spatial coordinates, as the energy and mass transfer between the individual horizontal layers is not taken into account. With sufficiently thin layers, the mean pressure ratios of the layers deviate so slightly from each other that hardly any cross-exchange of mass flows occurs. Compared to more complex simulation methods, this simplification offers the advantage that an approximate system design can be used for practical applications with relatively low calculation effort.

In order to be able to test the suitability of the new process for the first time, a pilot plant for exhaust gas flowrates of up to $2,000 \text{ m}^3_{\text{i.N.}}/\text{h}$ was designed, installed and tested. Its special feature is the arrangement of the radial packed bed: it is divided vertically into two regenerator halves so that the heating and cooling phases for regenerative heat recovery can be realized simultaneously in one plant. Furthermore, a specially designed bottom geometry enables easy removal of the bulk material loaded with separated dust.

The test campaigns served to check the basic performance of the system, to optimise the system if necessary and to compare the measured values with the data of the newly created calculation model. To simulate real exhaust gases, ambient air was sucked in and model dust or as volatile pollutants ethanol and propanol or as a gaseous pollutant methane were dosed into it. Relatively high concentrations were generated in order to be able to derive a meaningful cleaning tendency of the plant within the time-limited operation of the pilot plant.

During the first series of tests, localised false flows occurred and during the start-up and shut-down processes, thermal stresses caused instability of the plant structure at the points where high temperatures and high mechanical pressures were present at the same time. The plant was therefore partially improved structurally.

The measured data could be simulated well with the new calculation model. However, the tests with volatile pollutants showed that the thermochemical influences not taken into account in the model led to a slight to sometimes strong difference between measured and calculated temperatures. Values between 88 % and 95 % were achieved as heat recovery efficiencies. They should be further improved in the future through optimised operation. Although up to 99.6 % of the model dust was separated in the preliminary tests, in the pilot plant the dust separation rates of the unregenerated packed bed dropped from 98 % at the beginning to values between 94.7 % and 89.5 %. This was mainly due to the dust deposits that were carried along when the flow direction was changed at the valves or were carried out of the packed bed again due to unfavourable flow conditions. The volatile pollutants could be thermally converted to about 90 % in each case, whereby at the beginning of the test campaigns the separation efficiency for methane, for example, was 99.5 % and that for ethanol 98 %. The cause of the deviations that occurred was pollutant slip due to flow short-circuits.

Based on the findings to date, the new process is basically well-suited for exhaust gas cleaning. However, the functionality of the system technology still needs to be optimised and further studies need to be carried out so that more effective separation rates and a higher structural durability can be achieved. The optimised system must then be tested in industrial trial operation under real conditions and over a longer period of time.

INHALT

1	EINLEITUNG	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Zielstellung und Methodik.....	1
2	GRUNDLAGEN ZU THEORIE UND TECHNIK	3
2.1	Anlagen zur thermischen Nachverbrennung mit regenerativer Wärmerückgewinnung	3
2.2	Anlagen zur Staubabscheidung in Schütttschichten.....	10
2.3	Radial durchströmter regenerativer Schütttschichtwärmeübertrager	15
2.3.1	Entwicklungsgeschichte, Funktionsweise und Anwendungen	15
2.3.2	Wärmetransport	26
2.3.3	Druckverlust	34
2.3.4	Staubabscheidung	39
2.4	Andere Arbeiten und Abgrenzung der eigenen Arbeit	47
3	EXPERIMENTELLE CHARAKTERISIERUNG VON SCHÜTTGÜTERN.....	49
3.1	Materialauswahl.....	49
3.2	Materialcharakterisierung.....	52
3.2.1	Thermische Eigenschaften	52
3.2.1.1	Maximale Einsatztemperatur.....	52
3.2.1.2	Thermische Analyse	53
3.2.1.3	Spezifische Wärmekapazität.....	55
3.2.1.4	Spezifische Wärmeleitfähigkeit.....	57
3.2.1.5	Thermischer Ausdehnungskoeffizient	58
3.2.2	Volumenspezifische Eigenschaften.....	59
3.2.2.1	Korngröße	59
3.2.2.2	Dichte.....	66
3.2.2.3	Lückenanteil	70

3.3	Koordinatenabhängige Änderungen im Schüttungsbett.....	72
3.3.1	Vertikale Änderung des Lückenanteils.....	73
3.3.2	Horizontale und vertikale Druckverteilung im Schüttungsbett	80
3.4	Druckverlustverhalten – Einfluss von Rostgeometrie und Schüttungsbett ...	89
3.4.1	Vorüberlegungen.....	89
3.4.2	Versuchsanlage und Versuchsdurchführung	98
3.4.3	Ergebnisse.....	107
3.5	Staubabscheidung im radialen Schüttungsbett	116
3.5.1	Versuchsanlage und Versuchsdurchführung	116
3.5.2	Ergebnisse.....	120
4	ERSTELLUNG EINES INSTATIONÄR QUASIZWEIDIMENSIONALEN BERECHNUNGSMODELLS.....	131
4.1	Mathematische Modellierung.....	131
4.2	Numerische Lösung	144
5	ENTWICKLUNG UND ERPROBUNG EINER TECHNIKUMSANLAGE	153
5.1	Verfahrenskonzept und Anlagenaufbau	153
5.2	Peripherie, Mess- und Regeltechnik, Versuchsdurchführung	162
5.3	Erkenntnisse.....	171
5.3.1	Optimierungsmaßnahmen	171
5.3.2	Ergebnisse.....	176
6	DISKUSSION UND AUSBLICK	193
6.1	Theoretische und praktische Ergebnisse	193
6.2	Schlussfolgerungen sowie Vorschläge für die Verbesserung des Verfahrens und der Versuchsdurchführung.....	196
7	LITERATUR.....	201
	NOMENKLATUR.....	217
	ABBILDUNGEN	225
	TABELLEN	235
	ANHANG	237