

**„Bestimmung der jährlichen Emissionen durch die gesamtheitliche Betrachtung
von Kleinf Feuerungsanlagen“**

Der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften
der Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

vorgelegte Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

von

Dipl.-Ing. Dirk Rilling

aus Heilbronn

Berichte aus der Verbrennungstechnik

Band 8

Dirk Rilling

**Bestimmung der jährlichen Emissionen
durch die gesamtheitliche Betrachtung
von Kleinfeuerungsanlagen**

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag
Aachen 2000

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Rilling, Dirk:

Bestimmung der jährlichen Emissionen durch die gesamtheitliche
Betrachtung von Kleinfeuerungsanlagen / Dirk Rilling.

- Als Ms. gedr. - Aachen : Shaker, 2000

(Berichte aus der Verbrennungstechnik ; Bd. 8)

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1999

ISBN3-8265-7114-2

Copyright Shaker Verlag 2000

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

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISBN 3-8265-7114-2

ISSN 1430-9629

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Industrieofenbau und Wärmetechnik, Lehr- und Forschungsgebiet für Energie- und Stofftransport, der RWTH Aachen.

Dem Leiter des Lehr- und Forschungsgebietes, Herrn Professor Dr.-Ing. H. Köhne gilt mein besonderer Dank für die interessante Aufgabenstellung, für seine stete Diskussionsbereitschaft, für Anregungen und seine Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit.

Herrn Professor Dr.-Ing. U. Epple danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Korreferates.

Allen Mitarbeitern des Lehr- und Forschungsgebietes möchte ich für die mir entgegen gebrachte Unterstützung und konstruktive Zusammenarbeit meinen herzlichen Dank aussprechen. Dies gilt vor allem für den Zeitraum, in dem meine Gesundheit es mir nicht ermöglichte, dem Tagesgeschäft des Lehr- und Forschungsgebietes beizuwohnen.

Dies ist der sichtbare Ort meines Dankes.

Aachen, im Juni 1999

Dirk Rilling

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	6
1 Einleitung	8
2 Aufgabenstellung	10
3 Grundlagen und Stand der Technik	11
3.1 Grundlagen des Wärmeschutzes	11
3.2 Schadstoffbildung bei der Verbrennung	13
3.2.1 Schadstoffe aus unvollständiger Verbrennung	13
3.2.2 Schwefeloxide	13
3.2.3 Stickstoffoxide	14
3.3 Treibhausgase	16
3.3.1 Kohlendioxid	17
3.3.2 Methan	18
3.3.3 Distickstoffoxid	19
3.3.4 Fluorchlorkohlenwasserstoffe und Ozon	19
3.3.5 Andere Stoffe mit Treibhauswirkung	19
3.3.6 Der Treibhauseffekt	20
3.4 Modelle zur Erfassung jährlicher Emissionen	21
3.5 Luftreinhaltemaßnahmen	22
3.6 Gebäudesimulation	24
4 Versuchsaufbau	28
4.1 Untersuchte Heizungskessel	28
4.1.1 Konventioneller Dreizugkessel	28
4.1.2 Dreizugkessel mit Nachschaltheizfläche	29
4.1.3 Gaswandtherme	29
4.1.4 Atmosphärischer Gaskessel	29
4.2 Untersuchte Brennerkonzepte	31
4.2.1 Brenner für Erdgas	31
4.2.2 Brenner für Heizöl EL	32
4.3 Abgasanalytik	35
5 Die Erfassung instationärer Emissionen	36
5.1 Die Erfassung instationärer Schadstoffemissionen	36
5.2 Emissionsmesszyklus	36
5.3 Betrachtungen zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse	39

6	Das Programm zur Heizanlagen simulation HASim	42
6.1	Modellaufbau	42
6.2	Energiebilanz	44
6.3	Eingabedaten, Ausgabedaten	45
7	Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen mit HASim	46
7.1	Feste Randbedingungen	46
7.1.1	Klima	46
7.1.2	Gebäude	46
7.1.3	Gebäudenutzung	46
7.2	Variable Randbedingungen	48
7.2.1	Brenner	48
7.2.2	Kessel- und Heizkreisparameter	48
7.3	Einflüsse verschiedener Parameter	51
7.3.1	Heizsystemkapazität C_{HS}	51
7.3.2	Temperaturspreizung des Kessels $\Delta\vartheta_K$	55
7.3.3	Einflüsse über den Wirkungsgrad η^*	55
7.3.4	Einflüsse durch die Betriebsweise	59
7.3.5	Einflüsse durch den Warmwasserbedarf	61
7.3.6	Einflüsse durch die elektrische Aufnahmeleistung	64
7.4	Gegenüberstellung aller Einflüsse	65
7.4.1	Normierte Darstellung einzelner Einflüsse	65
7.4.2	Betrachtung von Extrempunkten der Anlagentechnik	66
7.4.3	Abschließende Bewertung	70
8	Zusammenfassung	72
	Literaturverzeichnis	75
A	Formelzeichen	81
B	Anhang	85
B.1	Modellhaus	85
B.1.1	Skizze	85
B.1.2	Beschreibung des Wandaufbaus	86
B.2	Berechnung des Luftverhältnisses λ	86
B.3	Umrechnungsfaktoren ppm \rightarrow mg/kWh	87
B.4	Eingesetzte Brennstoffe	87
B.4.1	Heizöl EL	87
B.4.2	Erdgas H	87
B.5	Umrechnung von ppm auf verschiedene Sauerstoffgehalte	87
B.6	Verwendete Regressionsmodelle	88

Tabellenverzeichnis

1.1	Entwicklung der Schadstoffemissionen in den alten (AL) und neuen (NL) Bundesländern nach [N.91b]	8
3.1	Entstehungsmechanismen für Stickstoffmonoxid in Verbrennungsprozessen [Kol90] BN – am Brennstoff gebundener Stickstoff, OX – Oxidator	15
3.2	Emissionsgrenzwerte zur Vergabe des Umweltzeichens <i>Blauer Engel</i> [N.97d], [N.97c]	23
3.3	Vergleich eines dynamischen Verfahrens mit einem statischen Rechenvorgang nach [Gre94]	25
4.1	Verwendete Messverfahren zur Abgasanalytik [Fis91], [Fis95], [Fis97]	35
7.1	Während der Untersuchung eingesetzte Brennertypen DAS – Düsenabschaltsystem	48
7.2	Wasserinhalt verschiedener Heizkreise nach [Cer97]	49
7.3	Einflüsse auf die Laufzeitverteilung und die jährliche Gesamtlaufzeit \uparrow – steigt, \downarrow – fällt	51
7.4	Richtwerte für den Entwurf eines Brauchwasserbedarfsprofils nach [N.94b]	62
7.5	Emissionen aus der Brauchwasseraufbereitung bei $V_P = 10 \text{ dm}^3$ und $V_P = 500 \text{ dm}^3$, P_B gemäß Tabelle 7.1, $\vartheta_{P,\text{soll}} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\vartheta_K = 10 \text{ K}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 1, 2$	64
7.6	Emissionen bei Erzeugung von elektrischem Strom nach [N.97a] und [N.93d]	65
7.7	Elektrische Aufnahmeleistung P_{el} der untersuchten Brenner	65
7.8	Jährliche Emissionen aus der elektrischen Aufnahmeleistung einer Umwälzpumpe mit $P_{el} = 74 \text{ W}$ und der elektrischen Aufnahmeleistung von Brennern für eine Heizsystemkapazität $C_{HS} = 1580, 2 \text{ kJ/K}$, $\Delta\vartheta_K = 15 \text{ K}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, Emissionsumrechnung nach [N.97a] und [N.93d]	65
7.9	Einflüsse der Heizsystemkapazität C_{HS} . $\Delta\vartheta_K = 15 \text{ K}$, $\vartheta_A = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $C_{HS,\text{max}} = 1716 \text{ kJ/K}$. Werte gemittelt für Brenner 1a–2b (HEL) und Brenner 3–5 (Erdgas H), Angaben der maximalen und minimalen Werte einzelner Brenner	66
7.10	Einflüsse der Temperaturspreizung des Kessels $\Delta\vartheta_K$. $C_{HS} = 1580, 2 \text{ kJ/K}$, $\vartheta_A = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\vartheta_{K,\text{max}} = 15 \text{ K}$. Werte gemittelt für Brenner 1a–2b (HEL) und Brenner 3–5 (Erdgas H), Angaben der maximalen und minimalen Werte einzelner Brenner	66
7.11	Gegenüberstellung aller emittierten Schadstoffe, für die in Kapitel 7.4 untersuchten Fälle. Oberer Tabellenteil: $C_{HS} = 309 \text{ kJ/K}$, $V_P = 10 \text{ dm}^3$, P_B gemäß Tabelle 7.1, $\Delta\vartheta_K = 5 \text{ K}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$. Unterer Tabellenteil: $C_{HS} = 1718 \text{ kJ/K}$, $V_P = 150 \text{ dm}^3$, P_B gemäß Tabelle 7.1, $\Delta\vartheta_K = 15 \text{ K}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$. CO_2 in kg/a, alle übrigen Angaben in g/a *: Elektrische Aufnahmeleistung ohne Berücksichtigung der Umwälzpumpe des Heizkisses	68

7.12 Emissionen der untersuchten Brenner an beiden Extrempunkten $Q_{\text{HS,min}} = 1830$ kJ und $Q_{\text{HS,max}} = 35516$ kJ, bezogen auf die jeweiligen Maximalwert der Emission, in Abhängigkeit vom Verhältnis $\kappa = Q_{\text{HS}}/Q_{\text{HS,max}}$	69
B.1 Stoffdaten von Heizöl EL nach DIN 51603 und derzeitiger Ausfall	88
B.2 Stoffwerte von Erdgas H	89
B.3 Wichtige Bezugssauerstoffgehalte	89
B.4 Umrechnungsfaktoren von gemessenem Sauerstoffgehalt auf 3 % Restsauerstoff im Abgas	89

Abbildungsverzeichnis

3.1	Vereinfachtes Reaktionsschema der Brennstoff-NO-Bildung [TK88]	15
3.2	Die Anteile der wichtigsten Treibhausgase an der Zunahme des Treibhauseffektes seit Beginn der Industriellen Revolution bis 1990 [Hou97]	17
3.3	Szenarien der CO ₂ -Emissionen aus der Energiegewinnung für das nächste Jahrhundert [Hou97]. Tg - 10 ⁹ g, C - Kohlenstoff	18
3.4	Schaubild zur Verdeutlichung des Treibhauseffektes	20
3.5	Energieflußbild des Modellraums	26
4.1	Prinzipieller Aufbau des konventionellen Dreizugkessels	28
4.2	Prinzipieller Aufbau des Dreizugkessels mit Nachschaltheizfläche	29
4.3	Prinzipieller Aufbau der Gas-Wandtherme	30
4.4	Prinzipskizze eines Heizkessels mit atmosphärischem Brenner	30
4.5	Mischkopf eines stauscheibenstabilisierten Brenners für Erdgas	32
4.6	Mischeinrichtung des Gas-Oberflächenbrenners	33
4.7	Mischkopf eines flammenrohrstabilisierten Brenners	33
4.8	Prinzipskizze der zweistufig betriebenen Ölpumpe <i>System Puls</i>	34
5.1	CO-Verlauf bei einem Brennerstart	37
5.2	Volumenstrom nach Abschalten des Brenners	38
5.3	Startpeaks nach zehn Minuten Stillstandszeit	40
5.4	Reproduzierbarkeit der Bestimmung der jährlichen Emissionen (Mittel-, Maximal- und Minimalwerte) in Abhängigkeit der Heizsystemkapazität C _{HS}	41
6.1	Überblick zum System Wärmeerzeuger	42
6.2	Verwendetes mathematisches Modell eines Heizungssystems	43
6.3	Das Struktogramm für das Programm HASim	44
7.1	Wärmebedarf des für diese Arbeit untersuchten Gebäudes. Typ: EFH freistehend, Baujahr 1972 in der Rheinischen Tiefebene	47
7.2	Heizsystemkapazität-Temperaturspreizung-Nomogramm	49
7.3	Einflüsse auf die jährlichen Emissionen	51
7.4	Jährliche Emissionen in Abhängigkeit der Heizsystemkapazität für die Brenner 1a, 1b, 2a und 2b (Heizölbrenner), P _B gemäß Tabelle 7.1, $\vartheta_{K,soll} = 70\text{ °C}$, $\Delta\vartheta_K = 15\text{ K}$, $\vartheta_A = 150\text{ °C}$, $\lambda = 1, 2$, $\xi_{N,Brenn} = 143\text{ mg/kg}$	52
7.5	Jährliche Emissionen in Abhängigkeit der Heizsystemkapazität für die Brenner 3, 4 und 5 (Erdgasbrenner), P _B gemäß Tabelle 7.1, $\vartheta_{K,soll} = 70\text{ °C}$, $\Delta\vartheta_K = 15\text{ K}$, $\vartheta_A = 150\text{ °C}$, $\lambda = 1, 2$	52

7.6	Laufzeitverteilungen für den Brenner 1a bei verschiedenen Heizsystemkapazitäten $C_{HS} = 309 \text{ kJ/K}$ und $C_{HS} = 1718 \text{ kJ/K}$. $P_B = 18 \text{ kW}$, $\vartheta_{K,soll} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\vartheta_K = 15 \text{ K}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 1, 2$	53
7.7	Jährliche Emissionen des Brenners 1 mit und ohne Düsenabschaltssystem in Abhängigkeit der Heizsystemkapazität. $P_B = 18 \text{ kW}$, $\vartheta_{K,soll} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\vartheta_K = 15 \text{ K}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 1, 2$, $\xi_{N,Brenn} = 143 \text{ mg/kg}$	54
7.8	Jährliche Emissionen bei verschiedenen Heizsystemkapazitäten C_{HS} und einer Temperaturspreizung von $\Delta\vartheta_K = 5 \text{ K}$ für die Brenner 1a, 1b, 2a, 2b, P_B aus Tabelle 7.1, $\vartheta_{K,soll} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 1, 2$, $\xi_{N,Brenn} = 143 \text{ mg/kg}$	55
7.9	Jährliche Emissionen bei verschiedenen Heizsystemkapazitäten C_{HS} und Temperaturspreizung $\Delta\vartheta_K = 5 \text{ K}$ für die Brenner 3, 4, 5, P_B aus Tabelle 7.1, $\vartheta_{K,soll} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 1, 2$	56
7.10	Jährliche Emissionen in Abhängigkeit des Wirkungsgrades η^* für die Brenner 1a, 1b, 2a und 2b, P_B aus Tabelle 7.1, $C_{HS} = 1580 \text{ kJ/K}$, $\vartheta_{K,soll} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\vartheta_K = 15 \text{ K}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 1, 2$, $\xi_{N,Brenn} = 143 \text{ mg/kg}$	57
7.11	Jährliche Emissionen in Abhängigkeit des Wirkungsgrades η^* für die Brenner 3, 4 und 5, P_B aus Tabelle 7.1, $C_{HS} = 1580 \text{ kJ/K}$, $\vartheta_{K,soll} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\vartheta_K = 15 \text{ K}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 1, 2$	58
7.12	Lauf- und Stillstandszeitverteilung für die beiden Grenzen des Wirkungsgrades $\eta^* = 0,847$ und $\eta^* = 0,987$, $C_{HS} = 1580 \text{ kJ/K}$, $P_B = 18 \text{ kW}$, $\Delta\vartheta_K = 15 \text{ K}$, $\vartheta_{K,soll} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda = 1, 2$	59
7.13	Momentaner Wirkungsgrad eines Kessels bei gleitender Vorlauftemperaturregelung und verschiedenen Betriebsbereitschaftsverlusten, Brennerleistung $P_B = 18 \text{ kW}$	61
7.14	Stündlicher Bedarf an Brauchwasser für einen vierköpfigen Haushalt. Werte nach [N.94b]	63
7.15	Jährliche Emissionen aus der Brauchwassererwärmung in Abhängigkeit der Kapazität des Pufferspeichers C_P für den Brenner 4, $P_B = 27 \text{ kW}$, $\vartheta_{K,soll} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta\vartheta_K = 10 \text{ K}$, $\vartheta_A = 150 \text{ }^\circ\text{C}$	63
B.1	Skizze des freistehenden Einfamilienhauses	85