

Emissionsbezogene Energiekennzahlen von Abgasreinigungsverfahren bei der Abfallverbrennung

Der Vortrag basiert auf der
Veröffentlichung mit dem gleichlautenden Titel und
zugleich Dissertation
*Ermittlung von emissionsbezogenen Energiekennzahlen von
Abgasreinigungsverfahren bei der Abfallverbrennung*
an der Technischen Hochschule Dresden, Fakultät Maschinenwesen, 2011

TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2012

Dr.-Ing. Rudi Karpf
ete.a Ingenieurgesellschaft mbH, Lich

Regensburger Fachtagung
*Thermische Abfallverwertung und Metallrückgewinnung mit energieoptimierter
Anlagentechnik, wirtschaftlicher Abgasreinigung und umweltverträglicher
Reststoffverwertung*
Regensburg, 19./20. Juni 2012

Kurzfassung

Die Sicherstellung der zukünftigen Energieversorgung auf Basis ressourcen- und umweltschonender Energieerzeugung bzw. Energiewandlung gewinnt eine immer größere Bedeutung. Vor diesem Hintergrund findet im Bereich der Abfallbehandlung ein Umdenken statt, sodass Abfall nicht länger nur als Reststoff zur Beseitigung, sondern vielmehr als Brennstoff zur Energienutzung erkannt wird.

Das führte dazu, dass insbesondere an Industriestandorten, die Abfall als Brennstoff einsetzen, die Energieversorgung noch vor bzw. gleichwertig gegenüber der Abfallbehandlung gestellt wird. Dadurch konnten in der Vergangenheit immer häufiger fossile Primärenergieträger wie Erdgas, Heizöl oder Kohle durch den „Ersatzbrennstoff (EBS)“ Abfall bzw. Abfallfraktionen substituiert werden.

Da Abfall in seiner Zusammensetzung sehr inhomogen ist und einer entsprechend hohen Schwankungsbreite – sowohl in den Einzelfraktionen als auch zeitlich – unterliegt, ist bei der Verbrennung mit einer ebenso schwankenden Abgaszusammensetzung zu rechnen.

Neben anderen politischen Aspekten war dieser Tatbestand sicherlich ein großes Anliegen des Gesetzgebers die Emissionsgrenzwerte von Abfallverbrennungsanlagen gegenüber den herkömmlichen fossilbefeuerten Verbrennungsanlagen im Umfang der zu überwachenden Stoffe zu erhöhen sowie im Emissionsniveau zu verschärfen.

So kam es in den letzten 30 Jahren zu einer umfangreichen Entwicklung in der Festlegung von Emissionsgrenzwerten. Angefangen mit der erstmaligen Technischen Anleitung (TA) Luft von 1974 gefolgt von der TA Luft 1986 bis hin zu der Verabschiedung einer eigenen Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) zur Abfallverbrennung in der 17. BImSchV vom 23. November 1990 (BGBl. I S. 2545, S. 2832) [1]. Mit den am 31. Januar 2009 in Kraft getretenen Artikeln 1 und 2 der Verordnung vom 27. Januar 2009 (BGBl. I S.129) [2] – zur Absicherung der Qualitätsanforderungen in der 13. und 17. BImSchV – werden die Anforderungen an Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen in der 13. BImSchV und an Anlagen zur Verbrennung und Mitverbrennung von Abfällen in der 17. BImSchV durch langfristige Mittelwerte für die Massenkonzentrationen der Emissionen von Stickstoffoxiden ergänzt und bilden somit die aktuellste Grenzwertverschärfung.

Diese fortandauernden Emissionswertreduzierungen hatten zur Folge, dass ein Großteil der bestehenden Abfallverbrennungsanlagen ihre Abgasreinigungsanlagen immer wieder anpassen bzw. erweitern mussten. Das führte zu den, teils heute noch existierenden, mehrstufigen und sehr komplexen Anlagen. Ein weiterer Grund für die mehrstufigen Anlagen war in den 90-iger Jahren die Forderung der Wertstoffgewinnung aus den in der

Abgasreinigung anfallenden Reststoffe, wie man es aus dem Kraftwerksbereich mit der Herstellung von Gips bei der Rauchgasentschwefelung kannte.

Sicherlich durch wirtschaftliche Interessen geleitet, wurden simultan wirkende Verfahren wie die Trocken- und konditionierte Trockensorptionssysteme so weiterentwickelt, dass selbst unter der Maxime der Kosten- und Energieeinsparung die geltenden Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV mühelos unterschritten werden können.

Trotz der bereits sehr niedrigen Emissionsgrenzwerte wird die politische Akzeptanz der Abfallverbrennung immer wieder in Zweifel gezogen und letztendlich nur in möglichen weiteren Reduzierungen der Emissionsgrenzwerte einen tolerierbaren Fortbestand in Aussicht gestellt. Befürworter und Betreiber von Abfallverbrennungsanlagen halten dem entgegen, dass zur Reduzierung der noch wenigen Milligramms der entsprechenden Schadstoffe ein überproportionaler apparativer und energetischer Mehraufwand steht.

Gegenstand dieser Arbeit ist es genau diese Diskrepanz bzw. Abhängigkeit zwischen erzielbaren Emissionsminderungen zu den emissionsführenden Energieaufwendungen der dafür notwendigen Abgasreinigungstechnologien aufzuzeigen.

Des Weiteren werden Korrelationen zwischen den notwendigen Energieaufwendungen für Abgasreinigungsverfahren im Verbund mit der Abfallverbrennung und den dabei zu erzielenden Abscheideleistungen und erreichbaren Emissionswerten ermittelt.

Die Ergebnisse sollen Impulse und Anregungen für künftige Entscheidungen bei der Festsetzung von Emissionswerten und bei der Auswahl von Abgasreinigungsverfahren geben. Auch bei der Auswahl der sogenannten „Besten verfügbaren Technik“ für die thermische Abfallbehandlung, im Rahmen der wiederkehrenden Validierung zur Erstellung der BREF-Dokumente (Sevilla-Prozess), können die Resultate zur Objektivierung beitragen. Um die verschiedenen Abgasreinigungssysteme vergleichen zu können, erfolgte die Ermittlung der Energieaufwendungen in Form des Kumulierten Energieaufwand (KEA), sowohl für die Herstellung und den Betrieb der Anlagen als auch für die Energie, die zur Entsorgung der Anlagen nach 20 Jahren notwendig ist.

Eine ausführliche Literaturrecherche zeigte, dass in den 1990er Jahren im Rahmen einer Untersuchung bereits der Kumulierte Energieaufwand der thermischen Abfallbehandlung gegenüber der Abfalldeponierung ermittelt worden ist. Des Weiteren wurden in einer Studie zum Energieaufwand bei der Abgasreinigung hinter Abfallverbrennungsanlagen der zum Betrieb theoretische erforderliche Energieaufwand und die dadurch entstehenden Emissionen für drei Referenzanlagen bewertet und verglichen. Eine ganzheitliche energetische Bewertung der Abgasreinigung durch die Ermittlung des gesamten

Primärenergieaufwands bei unterschiedlichen Emissionsniveaus und Abscheidegraden, so wie dies in der vorliegenden Arbeit erfolgte, wurde noch nicht vorgenommen.

Um die Leistungsfähigkeit der Abgasreinigungsverfahren hinter Abfallverbrennungsanlagen im Vergleich zu anderen Feststoffverbrennungsanlagen zu verdeutlichen, wurden die relevanten Verordnungen und deren Emissionsgrenzwerte für unterschiedliche Brennstoffe sowie das derzeitige Emissionsniveau der in Deutschland in Betrieb befindlichen Abfallverbrennungsanlagen diskutiert.

Als Ansatz zur energetischen Bewertung der einzelnen Abgasreinigungsverfahren mit Hilfe des KEA wurde zunächst versucht, für jede Abgasreinigungskomponente, wie z. B. Elektro- oder Gewebefilter, Abgaswäscher, usw. den Kumulierten Energieaufwand zu ermitteln und entsprechend dem jeweiligen Verfahrensaufbau zu addieren. Dabei hat sich gezeigt, dass dies nur für die Energieaufwendungen der Herstellung (KEA_H) und Entsorgung (KEA_E) realisierbar ist, da die Beeinflussung der Prozessbedingungen der einzelnen Verfahrensstufen untereinander zu groß bzw. unzulässig ist. Aus diesem Grund wurden sechs bereits in der Praxis der Abfallverbrennung umgesetzte Abgasreinigungsvarianten ausgewählt, die unterschiedlich hohe Schadstoffbelastungen beherrschen und mit denen verschiedene Emissionsniveaus sichergestellt werden können (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1 Verfahrensvarianten im Überblick

Variante	Verfahrensaufbau bzw. Verfahrensstufen
V1	SNCR-Anlage – konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat
V2	konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat – SCR-Anlage
V3	SNCR-Anlage – Konditionierte Trockensorption mit Kalkhydrat – einstufiger Wäscher
V4	Trockensorption mit Natriumhydrogencarbonat – SCR-Anlage – Wärmeübertrager – Trockensorption mit Kalkhydrat
V5	SNCR-Anlage – Sprühtrockner – Gewebefilter – zweistufiger Wäscher
V6	Sprühtrockner – Gewebefilter – zweistufiger Wäscher – SCR-Anlage

Als Unterscheidungsmerkmal dienten die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte nach der 17. BImSchV bzw. der Hälfte dieser Grenzwerte sowie die Unterschreitung von 100 mg/m^3 bzw. 70 mg/m^3 für die Abgaskonzentration der Stickstoffoxide (vgl. Abb. 1).

Zur Einhaltung der Stickoxidkonzentrationen wurde das SNCR-Verfahren ($< 100 \text{ mg/m}^3$) und das SCR-Verfahren ($< 70 \text{ mg/m}^3$) berücksichtigt.

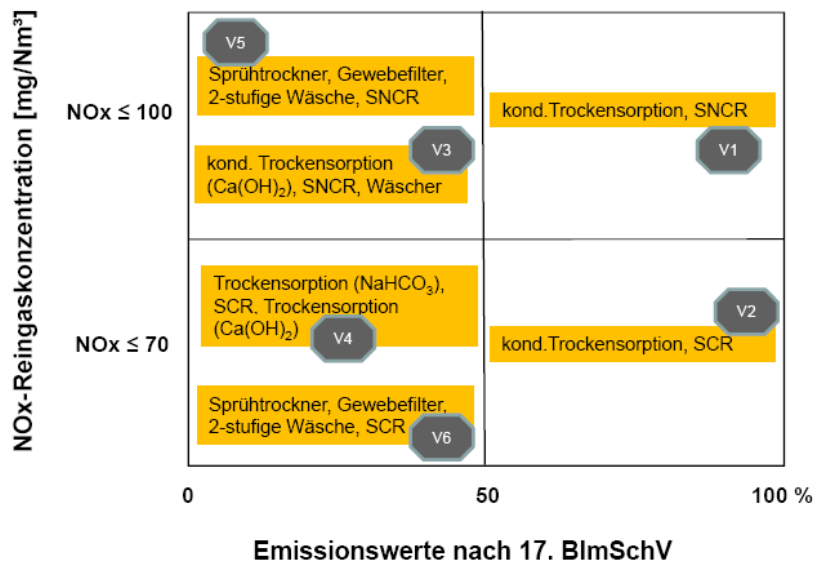


Abb.: 1 Verfahrensmatrix für unterschiedliche Emissionswerte [3]

Für die Verfahrensvarianten (V1 und V3), die eine Abgaskühlung zur Einstellung der erforderlichen Prozessbedingungen benötigen, wurde zur üblichen Verdampfungskühlung alternativ eine rekuperative Abgaskühlung mit Energieauskopplung berücksichtigt (V1' und V3'). Bei Verwendung von nassen Verfahren, die zur Sicherstellung eines abwasserfreien Betriebes die Energie des Abgases zur Eindampfung der Abwässer erfordern, ist das nicht möglich.

Für die Ermittlung des Kumulierten Energieaufwands zur Herstellung und Entsorgung der verschiedenen Abgasreinigungskomponenten bzw. der sechs Verfahrensvarianten (inkl. Alternativen) wurden für eine Referenzanlagengröße von 100.000 m³/h i.N.tr. anhand von Planungsunterlagen die Massen- und Energiebilanzen erstellt. Verknüpft mit den spezifischen Energieaufwendungen der einzelnen Materialien und unter Berücksichtigung der Montage-/Demontage- und Transportaufwendungen konnten die Kumulierten Energieaufwendungen KEA_H und KEA_E ermittelt werden.

Zur Bestimmung des Kumulierten Energieaufwands für den Betrieb der Anlagen (KEA_N) wurden zunächst auf die entsprechenden Abhängigkeiten der benötigten Betriebsmittel, wie z. B. Kalkhydrat, Natronlauge, Druckluft oder die allgemeinen elektrischen Verbraucher, eingegangen und anhand von Praxiserfahrungen Berechnungsansätze zur Massen- und Energiebilanz abgeleitet. Es erfolgte für jede Variante die Bilanzierung von 10 Lastfällen als Wertepaar von unterschiedlichen HCl- und SO₂-Konzentrationen, die den Betrieb von Hausmüll- bis hin zu Ersatzbrennstoff (EBS)-Verbrennungsanlagen charakterisieren. Aus der Gegenüberstellung der einzelnen Kumulierten Energieaufwendungen geht hervor, dass der KEA_H und KEA_E im Vergleich zum KEA_N mit einem Anteil von < 1 % nahezu

vernachlässigt werden kann. Für den zunächst betrachteten Lastfall ($1.300 \text{ mg/m}^3 \text{ HCl}$ u. $500 \text{ mg/m}^3 \text{ SO}_2$), der repräsentativ für Hausmüllverbrennungsanlagen steht, ist das zweistufige Verfahren (V4), bestehend aus zwei Trockensorptionsstufen, SCR-Anlage zur Entstickung, selbst gegenüber den einstufigen Verfahren aufgrund der Energieauskopplung die energetisch günstigste Variante. Bei höheren Schadgaskonzentrationen verschiebt sich der KEA-Gesamt zu Gunsten des einstufigen energieoptimierten Verfahren (V1'), bestehend aus einer SNCR-Anlage, konditionierten Trockensorption mit Kalkhydrat und kombinierter Abgaskühlung (Wärmeübertrager und Verdampfungskühlung). Die Ursache hierfür liegt in dem dann erhöhten Additivverbrauch von Natriumhydrogencarbonat und den hieraus resultierenden Energieaufwendungen bei Variante V4. Da die hohen Schadgaskonzentrationen ($> 2.200 \text{ mg/m}^3 \text{ HCl}$ u. $> 1.100 \text{ mg/m}^3 \text{ SO}_2$) für die einstufigen Verfahren nur als Spitzenlast tolerierbar sind, ist das betrachtete zweistufige energieoptimierte Verfahren V3', bestehend aus einer SNCR, Trockensorptionsstufe mit Kalkhydrat und rekuperativer Abgaskühlung sowie nachgeschaltetem Natronlauge-Wäscher die unter Berücksichtigung der Betriebssicherheit und Energieeffizienz zu favorisierende Variante.

Auf Basis der ermittelten Energieaufwendungen wurden zur Bewertung der betrachteten Abgasreinigungsverfahren emissionsbezogene Energiekennzahlen und energieäquivalente Emissionsfaktoren definiert und bestimmt.

Damit eine direkte Beziehung zwischen Abscheidegrad und dem dafür benötigten Energieaufwand erstellt werden kann, wurde der Quotient aus dem Kumulierten Energieaufwand und dem dazugehörigen HCl-Abscheidegrad gebildet. Bei der differenzierten Betrachtung der emissionsbezogenen Energiekennzahlen verschiebt sich die Bewertung der jeweiligen Varianten. So zeigt die Kennzahl „K-Anlagentechnik“, in der die Energieaufwendungen, die in Verbindung mit der Anlagentechnik stehen (KEA_H , KEA_E und $KEA_{N\text{-Strom}}$), dass das einstufige Verfahren (V1) mit einer kalkbasierten Trockensorption sowohl herkömmlich mit Verdampfungskühler als auch energieoptimiert mit einem Wärmeübertrager zur Abgaskühlung die günstigsten Ergebnisse aufweisen. Dagegen zeigt die Kennzahl K-Additiv, in der sich die Energieaufwendungen zur Herstellung der Additive sowie deren Verbrauch zu den jeweiligen HCl-Abscheidegraden widerspiegeln, dass die anlagentechnisch aufwendigsten Verfahren ohne Energieauskopplung die günstigsten sind. Die zweistufige Trockensorption, in der die erste Stufe mit Natriumhydrogencarbonat (V4) betrieben wird, besitzt aufgrund des hohen spezifischen Primärenergieaufwands zur Herstellung von Natriumhydrogencarbonat und dem hohen elektrischen Energiebedarf der Mühlen über den gesamten betrachteten Lastbereich die höchste Kennzahl „K-Additiv“, also die ungünstigste energetische Bewertung.

Für die Kennzahl „K-Betrieb“, in der alle Energieaufwendungen zum Betrieb der Anlage zusammengefasst sind, zeigt sich wie bereits oben genannt, dass das energieoptimierte Hybridverfahren (V3') und die Variante mit zweistufiger Trockensorption und Energieauskopplung (V4) die günstigsten Verfahren sind (vgl. Abb. 2).

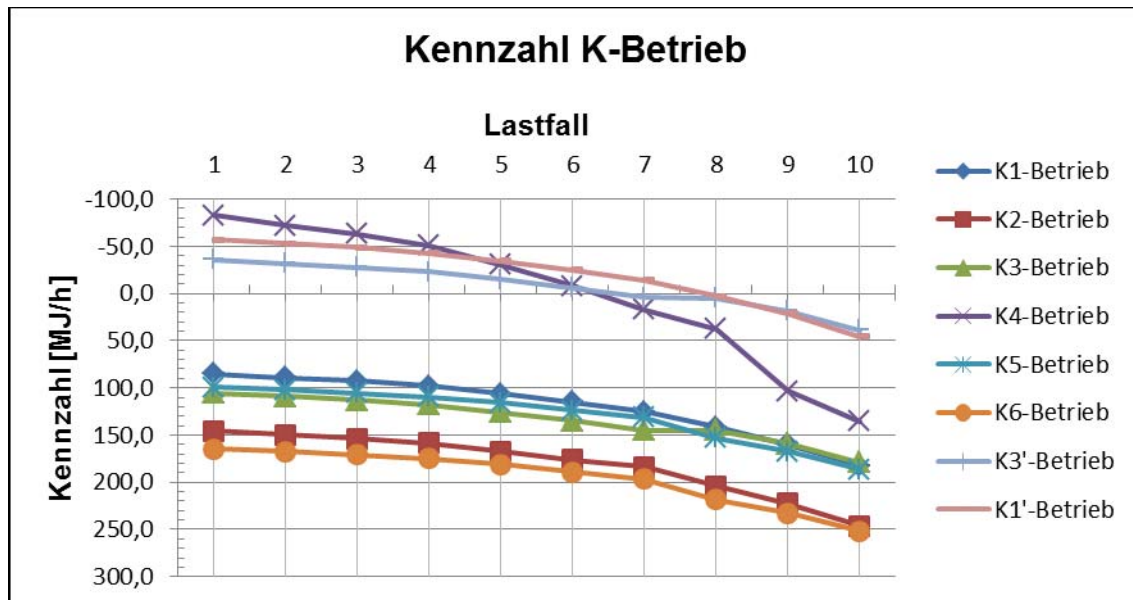


Abb.: 2 Kennzahl K-Betrieb für die jeweiligen Abgasreinigungsvarianten

Generell zeigt die Bildung der beschriebenen Kennzahlen, dass eine Energieauskopplung immer günstig und zu bevorzugen ist und – entgegen der herrschenden Einschätzung (vieler Fachleute) – dass der Primärenergieaufwand von zweistufigen Systemen nicht signifikant größer gegebenenfalls sogar kleiner als bei einstufigen Systemen ist.

Über die Bildung von energieäquivalenten Emissionsfaktoren wurde die Aussage getroffen, in wieweit die Mehr- bzw. Minderenergieaufwendungen der einstufigen im Vergleich zu den zweistufigen Verfahren zu höheren bzw. niedrigeren Emissionswerten führen: Gespiegelt an den spezifischen Emissionen bei der Erzeugung elektrischer Energie nach dem deutschen Strommix ergibt sich über alle bilanzierten Lastfälle sowohl für HCl als auch für SO₂ eine positive Emissionsbilanz. Bei der NO_x-Bilanzierung, im Vergleich der beiden in der Praxis eingesetzten Verfahren der katalytischen und nichtkatalytischen Entstickung (SCR- und SNCR-Verfahren), zeigt sich, dass der Einsatz eines Katalysators, trotz höherer Energieaufwendungen, günstiger ist als das SNCR-Verfahren. Das liegt daran, dass der NO_x-Massenstrom, der sich aus den höheren Energieaufwendungen bei dem SCR-Verfahren ergibt (höherer Druckverlust und somit höhere elektrische Saugzugleistung, Minderstromerzeugung durch die Abgasaufheizung mit Hochdruckdampf), nur einen Bruchteil (ca. 1/6) dessen ausmacht, was durch den Einsatz des SCR-Verfahrens im

Vergleich zum SNCR-Prozess an zusätzlicher Stickoxidreduktion bei der Abfallverbrennung erreicht werden kann. Falls die Konfiguration des Abgasreinigungssystems mit SNCR-Verfahren die Reduzierung des Ammoniak-Schlupfes ($< 10 \text{ mg/m}^3$) sicherstellen kann, ist nach neuesten Entwicklungen das SNCR-Verfahren in der NO_x-Bilanz dem SCR-Verfahren jedoch nahezu gleichzusetzen.

Als Fazit der Arbeit kann festgehalten werden, dass die vorherrschende Meinung, nach der mehrstufige Abgasreinigungssysteme energetisch und somit in der Emissionsbilanz ungünstiger abschneiden als einfachere Systeme, nicht bestätigt werden kann. Im Gegensatz zu dieser Annahme konnte nachgewiesen werden, dass insbesondere solche zweistufige Verfahren, die eine Energieauskopplung zulassen, sogar Vorteile gegenüber den einstufigen Systemen besitzen.

Literatur

- [1] **Brauer, H.** *Handbuch des Umweltschutzes und der Umwelttechnik - Emissionen und ihre Wirkung* -. Berlin : Springer, 1996. ISBN 3-540-58024-7.
- [2] **BMU Bundesumweltministerium.** *17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes*. Berlin : Referat Öffentlichkeitsarbeit, 2009.
- [3] **Karpf, R.** Kumulierter Energieaufwand zur Herstellung verschiedener Abgasreinigungsanlagen. *Energie aus Abfall*, Hrsg. *Karl J. Thomé Kozmiensky und Michael Beckmann*. Neuruppin : TK Verlag Karl J. Thomé Kozmiensky, 2010. Bd. 7, S. 639-669. ISBN 978-3-935317-46-7.



Ingenieurgesellschaft für Energie- und Umweltengineering & Beratung mbH

Hofgut Kolnhausen 12

35423 Lich

☎ 06404-658164

☎ 06404-658165

✉ info@ete-a.de

Die komplette Veröffentlichung kann unter folgenden Daten bezogen werden.



Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Emissionsbezogene Energiekennzahlen
von Abgasreinigungsverfahren bei der Abfallverbrennung**
Rudi Karpf.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2012
ISBN 978-3-935317-77-1