

Zeitschrift: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik : VPK = Mensuration, photogrammétrie, génie rural

Herausgeber: Schweizerischer Verein für Vermessung und Kulturtechnik (SVVK) = Société suisse des mensurations et améliorations foncières (SSMAF)

Band: 86 (1988)

Heft: 12

Artikel: Stickoxidminderung bei der Kehrlichtverbrennung

Autor: Haltiner, E.W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-233800>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

vers cours de formation pour les utilisateurs de leurs équipements, parmi lesquels on retrouve bon nombre de PME de l'industrie. Il est clair que l'apparition de ce que l'on appelle la micro-informatique a accéléré notablement le bouleversement des structures dans la plupart des entreprises. On ne peut plus concevoir une automatisation quelconque sans l'apport de l'informati-

que. C'est pourquoi la compétitivité dépend aujourd'hui dans une large mesure de la capacité des PME et des très petites entreprises à se doter, non seulement des équipements adéquats, mais également de collaborateurs bien formés aux tâches nécessitant la mise en œuvre de technologies de pointe. Ce n'est qu'à ce prix qu'elles obtiendront leur ticket d'entrée (et de prospérité) dans ce que l'on

appelle déjà l'«univers de la civilisation numérique».

Adresse de l'auteur:
A. Kanel
La Revue Polytechnique
26, Ch. de la Caroline
CH-1213 Petit-Lancy

Stickoxidminderung bei der Kehrlichtverbrennung

E.W. Haltiner

Zur Bewältigung der Kehrlicht- und Sonderabfallwäme wird heute die Verbrennung in entsprechenden Kehrlichtverbrennungsanlagen (KVA) oder Fernheizwerken als durchaus taugliches Verfahren angesehen. Der Schadstoffausstoss über die Hochkamine dieser Verbrennungsanlagen sorgt allerdings für einen Wermuthstropfen in der sonst positiven Beurteilung. Die Minderung dieser Schadstoffe muss dringend landesweit an die Hand genommen werden, wobei natürlich gleichzeitig auch das Problem der weiteren Entsorgung der dabei anfallenden Rückstände gelöst werden muss.

On considère aujourd'hui que l'incinération des déchets dans les usines d'incinération ou dans des centrales de chauffage à distance est la méthode la plus appropriée venir à bout de l'avalanche des déchets de toutes sortes. Les rejets toxiques des hautes cheminées de ces installations sont encore une pollution résiduelle malgré le jugement globalement positif du processus.. La diminution de ces toxiques doit être réalisée d'urgence pour tout le pays, tout en résolvant simultanément le problème de l'évacuation des résidus.

Nicht umsonst widmet die Luftreinhalteverordnung «Anlagen zum Verbrennen von Siedlungs- und Sonderabfällen» ein besonderes Kapitel und gewährt ihnen teilweise noch recht grosszügige Emissionsgrenzwerte. Aus dem Beispiel der KVA-Anlage in Hinwil (Zürcher Oberland) – die im übrigen keineswegs schlechter arbeitet als irgendeine andere Kehrlichtverbrennungsanlage in der Schweiz – ergibt sich ein erheblicher Schadstoffauswurf, der über den erlaubten Werten der Luftreinhalteverordnung liegt. Die LRV lässt im Abgasstrom beispielsweise 5 mg/m³ Blei und Zink zu. Hochgerechnet bei einem Abgasvolumen von 100 000 m³/Stunde und einer Betriebszeit von 6000 Stunden im Jahr ergäbe dies einen maximal erlaubten Aus-

wurf von etwa 3 Tonnen pro Jahr statt der tatsächlichen etwa 13 Tonnen. Kehrlichtverbrennungsanlagen sind heute im Sinne der LRV ohne Ausnahme «Dreckschleudern». Rudolf Walder, Direktor des

Umrechnungstabelle NO – NO ₂ bei 3% O ₂ :	
1 ppm NO	= 1,34 mg NO/m ³
1 ppm NO	= 2,05 ppm NO ₂ /m ³
1 mg NO/m ³	= 1,53 mg NO ₂ /m ³
1 mg NO ₂ /m ³	= 1 mg NO ₂ /kWh
1 mg NO ₂ /m ³	= 0,49 ppm NO ₂
1 mg NO ₂ /m ³	= 0,278 kg NO ₂ /TJ
1 mg NO ₂ /m ³	= 11,86 mg NO ₂ /kg Öl
NO _x = Summe der Stickstoff-Sauerstoff-Verbindung	
In Feuerungsanlagen: etwa 95% Stickstoffmonoxid NO etwa 5% Stickstoffmonoxid NO ₂	
Wegen des sehr hohen NO-Anteils ist es bei Emissionsmessungen zulässig, nur diesen Anteil zu messen und in NO ₂ umzurechnen.	

Abfuhrwesens der Stadt Zürich, gibt zu: «Die städtischen Kehrlichtverbrennungsanlagen verursachen heute rund einen Viertel der feuerungsbedingten Stickoxid-Emissionen der ganzen Stadt.» Die Rauchgasreinigung von Schadstoffen bei KVAs ist eine zwingende Notwendigkeit, über die leider zu lange wegen des Baukostenverteilers zwischen den Ver-

Primärmassnahmen	Zielsetzungen: Verminderung von		
	O ₂ -Angebot	Temperatur	Verweilzeit
– Abfallvorbehandlung und Homogenisierung		×	
– Reduktion des Luftüberschusses	×		
– Umverteilung von Luft und Luftführung	×	×	
– Reduktion der Luftvorwärmung		×	
– Brennerkonstruktion	×	×	×
– Ausgestaltung des Feuerraumes	×	×	×

Erschienen in «Schweizerische Technische Zeitschrift» Nr. 6, März 1988.

Schadstoffemission einer Kehrlichtverbrennungsanlage

am Beispiel Kehrlichtverwertung Zürcher Oberland: Totale Kehrlichtmenge 1987 etwa 113 000 t (aus 39 Gemeinden)

Schadstoffausstoss:

538 t	Chlorwasserstoffe
49 t	Staub
146 t	Schwefeldioxid
1,1 t	Fluorwasserstoffe
13,3 t	Schwermetalle (Blei, Zink, Cadmium)
etwa 250 t	Stickoxide (Hochrechnung Autor)

tragsgemeinden gestritten wird. Die Notwendigkeit und Effizienz solcher dringender Investitionen ist unbestritten. Allerdings beansprucht der technische Anteil hinter dem Verbrennungssofen, welcher Elektrofilter, Rauchgasreinigung und Entstickungsanlage umfasst, schon bald mehr als ein Drittel der Baukosten, wie uns Amadeo Vaccani von der W+E Umwelttechnik Zürich auf Anfrage bestätigt. Solche Reinigungsstufen schlagen natürlich auch auf die Betriebskosten durch. Dr. M. Form von der Lurgi GmbH Frankfurt, auf die Kosten der Rauchgasreinigung und Entstickung angesprochen, gibt eher zögernd zu, dass in Deutschland bei thermischen Kraftwerken durch Rauchgasentstickung der Preis des erzeugten Stromes mit 10 bis 20 Prozent (oder 1 bis 2 Rp./kWh) zusätzlich belastet wird. Ein Schweizer Beispiel: die bereits erwähnte Kehrlichtverbrennungsanlage Zürcher Oberland rechnet mit zusätzlichen Kosten von etwa Fr. 33.— pro Einwohner für eine Schadstoffabfilterung von gegen 95 Prozent. Zu hoffen wäre allerdings, dass parallel zum Bau zukünftiger Rauchgasreinigungsanlagen in der ganzen Schweiz der operettenhaft anmutende und amateur-mässig organisierte «Filterstaubtourismus» quer durch Europa eine sachkundige und professionelle Lösung finden würde.

Einen Problemkreis rund um die KVA-Kamine, der bis heute oft schamhaft verschwiegen wurde, stellt die Stickoxidemission in der Grösse von Hunderten von Tonnen dar. Dazu Dr. Rudolf Müller anlässlich einer Fachtagung über Minderung von Stickoxidemissionen aus KVAs bei Elektrowatt Ingenieurunternehmen: «Stickoxide haben als Primärschadstoffe zunächst eine direkt schädigende Wirkung auf Menschen, Tiere und Pflanzen. Zusammen mit Kohlenwasserstoffen (Lösungsmittel) und Sonnenlicht als Reaktionspartner bilden Stickoxide hauptsächlich Ozon».

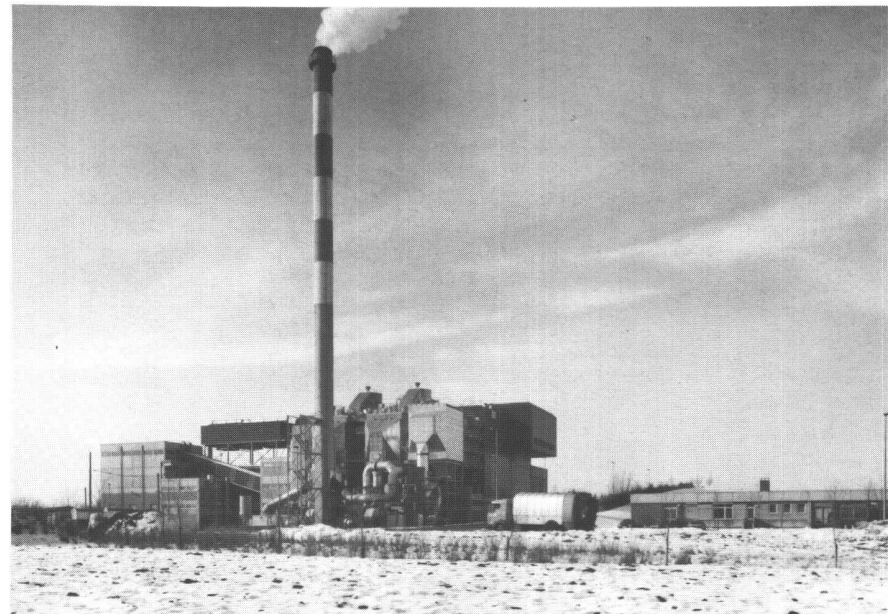


Abb. 1: Die mit einer Rauchgasreinigungsanlage ausgerüstete Müllverbrennungsanlage Ingolstadt.

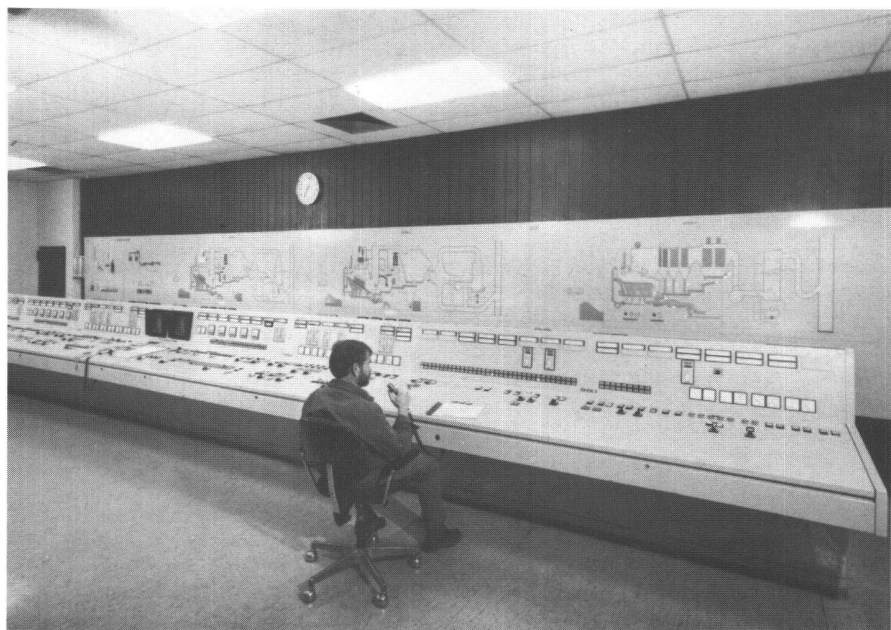


Abb. 2: Kommandozone der MVA Ingolstadt. Fotos: W+E Umwelttechnik, Zürich

Stickoxidemission, das vordringlichste Umweltproblem

Die Aufwärtsentwicklung der Emission von NO_x ist fast ungebrochen. Alfred Heller, Direktor der Elektrowatt Ingenieurunternehmung, weist darauf hin, dass zur Emissionsminderung von NO_x im Strassenverkehr (Katalysatoren), Industrie- und Gewerbef Feuerungsanlagen (durchh Lox- NO_x -Brenner und Ersatz von Heizöl S durch Heizöl EL), aber auch bei Diesellastwagen mögliche technische Wege vorgegeben sind. Es verbleiben die KVA, wo

sich die Frage nach dem Stand der Technik für DeNox-Anlagen (Entstickungsanlagen) stellt.

Wer den heute noch sehr unbefriedigenden NO_x -Immissionswerten in den Ballungsgebieten auf den Leib rücken will, muss konsequent die tatsächlichen und ins Gewicht fallenden Schadstoffquellen sanieren; nach dem Grundsatz, «nicht das politisch Machbare, sondern das technisch Notwendige und Mögliche angehen». Das heisst, nicht auf Hausfeuerungsanlagen herumreiten, die mit ihrer niedrigen NO_x -Emission, dank moderner Brenner (unabhängig ob Erdgas oder Hei-

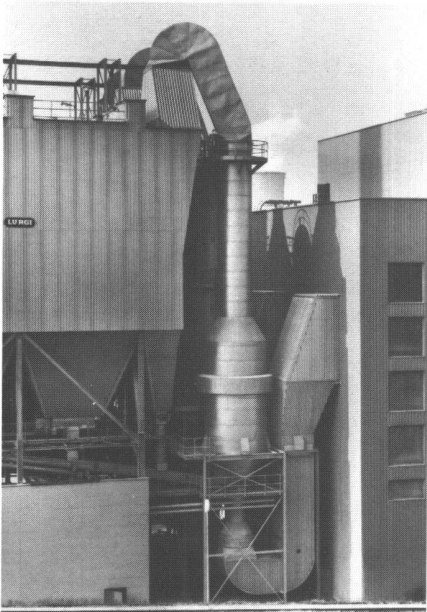


Abb. 3: Rauchgasreinigungsanlage der MVA Schwandorf mit Elektrofilter und Trockengasreaktor.

zöl EL) die LRV-Grenzwerte heute schon weit unterschreiten.

Für die Entstickung (Stickoxdiminderung) von Grossfeuerungsanlagen, wie KVAs, lassen sich viele Erfahrungen aus den thermischen Kraftwerkanlagen prinzipiell übertragen. Hier wurde eine Fülle von Verfahren entwickelt, teils grosstechnisch erprobt und deren Tauglichkeit nachgewiesen. Für die Stickoxidminderung in KVAs gibt es derzeit aber nur wenige Erfahrungen.

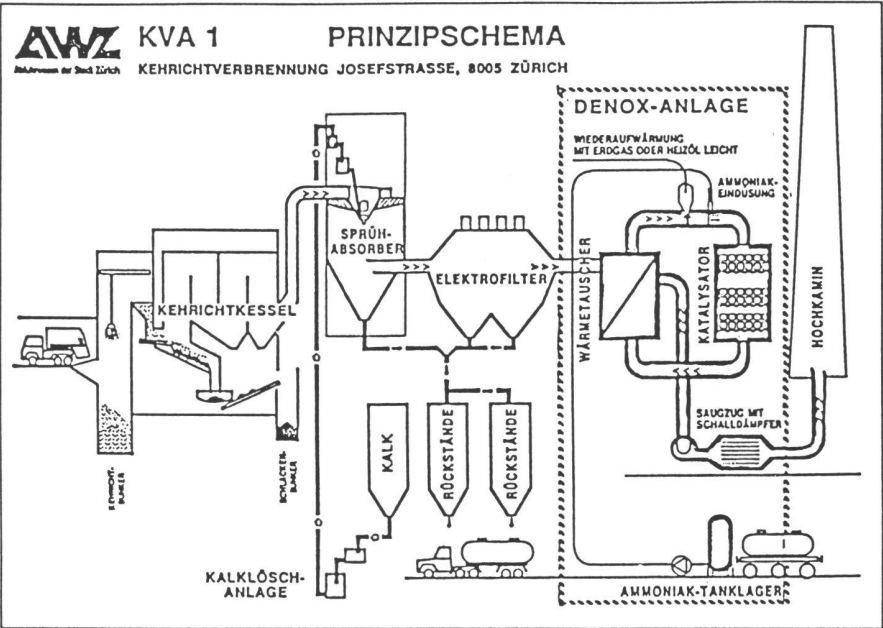
Dr. Urs Dietler (EWI Zürich) verweist auf die zwei grundsätzlich möglichen Massnahmen zur NO_x -Minderung. Die Primärmassnahmen greifen bei der Wahl des Brennstoffes und der verbrennungstechnischen Massnahmen, was bei KVAs nur sehr bedingt möglich ist. Mit Sekundärmassnahmen kann die Emission von bereits gebildeten Stickoxiden vermindert werden. So will die Stadt Zürich durch Abscheidung von etwa 240 Tonnen NO_x in jeder KVA den Stickoxidgehalt von zurzeit über 400 mg/m^3 auf etwa 70 mg/m^3 mittels einer Ammoniakendüschungs- und Katalyseanlage mindern; Investitionskosten pro KVA über 10 Mio. Franken.

Zwischen Verfahrenstechnik und Wirtschaftlichkeit

Zurzeit stehen verschiedene Entstickungsverfahren für Grossfeuerungen zur Diskussion. Wer sich damit näher befassen will, kommt allerdings ohne Auffrischung der Chemiekenntnisse nicht durch. Doch auch der Zwang zur Wirtschaftlichkeit und verfahrenstechnischen

Sekundärmassnahmen zur Stickoxidminderung

Verfahren	Reduktiv $\text{NO}_x \rightarrow \text{N}_2$	Oxidativ $\text{NO}_x \rightarrow \text{Nitrit / Nitrat}$
Trocken	Selektive nicht-katalytische Reduktion (SNCR) (Hochtemperaturreduktion) Selektive katalytische Reduktion (SCR) Aktivkoksverfahren	Elektronenstrahlverfahren (Sprühabsorptionsverfahren Simultan-Trockenabsorption)
Nass	Komplexverfahren, Eisen-EDTA-Verfahren	Nassoxidation mit NaClO_2 , usw.



Prinzipisches Schema der KVA Josefstrasse, Zürich, mit der vorgesehenen DENOX-Anlage.

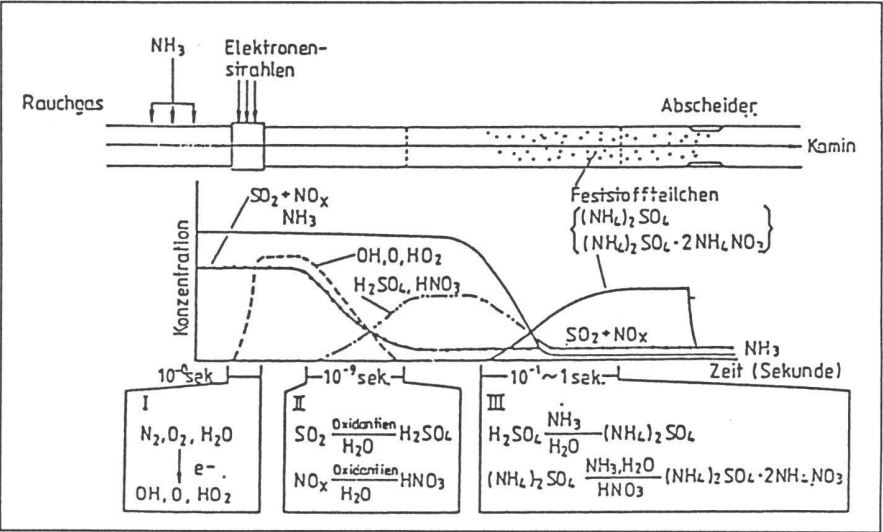


Abb. 4: Modellhafte Darstellung des Reaktionsverlaufes beim EBDS-Verfahren (EBDS = Electron Beam Dry Scrubbing).

Bildung von Stickoxiden

Stickstoffoxyd		Ort der Entstehung	Mechanismus/Reaktion	Haupteinflussgrößen
NO	thermisches	Flamme Nachreaktionszone	nach Zeldovic a) O ₂ -Überschuss $O + N_2 = NO + N$ (1) $N + O_2 = NO + O$ (2) b) Brennstoffüberschuss $N + OH = NO + H$ (3)	O-Atom-Konzentration aus der O ₂ -Dissoziation Verweilzeit, Temperatur > 1300 °C
	«promptes»	Flamme	nach Fenimore u. a. $CN + H_2 = HCN + N$ (4) $CN + H_2O = HCN + OH$ (5) $CN + N_2 = HCN + N$ (6)	O-Atom-Konzentration aus der Verbrennungsreaktion, Luftzahl
	aus Brennstoffstickstoff	Flamme	über CN-Verbindungen u. a. teilweise unbekannt	O ₂ -Konzentration (Luftzahl), Verweilzeit
NO ₂		Flamme	nach Fenimore $NO + HO_2 = NO_2 + OH$ (7)	schnelle Abschreckung der Verbrennungsreaktion (Gasturbinen)
		Rauchgaskanäle, Kamin	nach Bodenstein $2NO + O_2 = 2NO_2$ (8)	Temperatur < 650 °C, O ₂ -Konzentration, Verweilzeit
		freie Atmosphäre	$NO_2 + h \cdot \nu = NO_2 + O$ (9) $O + O_2 + M = O_3 + M$ (10) $NO + O_3 = NO_2 + O_2$ (11)	O ₂ -Konzentration Lichtintensität (Sonne) Verweilzeit, Luftverschmutzung

Bei Kehrichtverbrennungsöfen mit einem Temperaturbereich zwischen 700 und 1000 °C ist die Bildung von thermischen NO_x praktisch ohne Bedeutung

Überlegungen lassen im Moment die Auswahl auf vier NO_x-Minderungsverfahren begrenzen. Etwas laienhaft ausgedrückt, soll bei einer Entstickung das NO_x durch chemische Umwandlung in Wasserdampf und reinen Luftstickstoff aufgelöst oder an relativ ungefährliche Produkte wie Nitrate oder Sulfate gebunden werden. Die Entsorgung letzterer könnte dann wieder zu Diskussionen führen.

Eine Hauptforderung, die heute gestellt werden muss, ist diejenige, dass Verfahren, die selbst wieder Rückstände (als Sonderabfälle) entstehen lassen, von Anfang an ausgeschlossen bleiben oder aber die ungefährliche Entsorgung der Abscheideprodukte zwingend in einem Paket mitanbieten müssen.

Mit Harnstoff gegen Stickoxide

Jedes der nachstehenden Verfahren zur Stickoxidminderung hat spezifische Vorteile und auch Nachteile. Sie stellen den heute bekannten Stand der Technik dar.

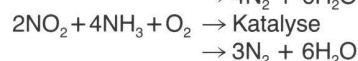
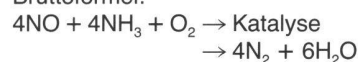
- Die nicht-katalytische, thermische NO_x-Reduzierung mit stickstoffhaltigen Reduktionsmitteln.
- Die katalytische Reduktion mit Ammoniak, Harnstoffen oder Salmiakgeist über SCR-Katalysatoren.
- Die katalytische Reduktion von NO_x über Aktivkohle.
- Die NO_x-Reduktion mit dem Elektronenstrahlverfahren.

Je nach Verfahren können natürlich neben den Stickoxiden auch andere Schadstoffe wie Schwefeldioxid usw. zurückgehalten werden. Die Beimengung von Schwermetallen, SO₂ usw., wie sie typisch für die stark schwankende Abgasqualität in der KVA ist, kann aber zu vorzeitiger Alterung oder «Vergiftung» des Katalysators führen, so dass allenfalls vorgeschaltete Reinigungsstufen notwendig sind.

Für die Praxis stehen diejenigen Verfahren im Vordergrund, wo durch Eindüsung von Ammoniak, Harnstoff oder Salmiakgeist das NO_x bei relativ eng vorgeschriebenen Temperaturen zu Wasserdampf und Stick-

stoff gespalten und unbedenklich in die Umwelt abgegeben werden kann; nach der Bruttoreaktionsgleichung.

Bruttoformel:



Legende: NH₃: Ammoniak
N₂: Stickoxid
H₂O: Wasser

Das Verfahren mit Eindüsung von Ammoniak oder Harnstoffe in den Feuerungsraum ist bei Schweröfuerungen (System Exxon, Saacke etc.) bekannt, wo der abgasseitige hohe Stickstoffoxidgehalt weitgehend gebunden werden kann und damit die Schweröfuerung mit ihren NO_x-Emissionswerten unter die LRV-Grenzwerte für NO_x gebracht werden kann.

Die in der KVA Josefstrasse Zürich in nächster Zeit zur Montage gelangende Denox-Anlage basiert denn auch auf dem Prinzip der Ammoniakendüsung und anschliessendem Katalysatoreinsatz.

Entwicklung der Stickoxid-Emissionen

1950: etwa 30 000 Tonnen pro Jahr, ganze Schweiz

1984: etwa 214 000 Tonnen pro Jahr

2000: etwa 115 000 Tonnen
gemäss Luftreinhaltekonzept des Bundes.

Anteil an Quellgruppen
(NO_x-Emissionen):

Verkehr: 74%

Industrie/Gewerbe: 22%

Haushalte: 4%

Stickoxidemissionen

in der Stadt Zürich:

Total: etwa 6000 t pro Jahr

davon Strassenverkehr:

etwa 3900 t/a

zwei Kehrrichtverbrennungsanlagen:

etwa 600 t/a

Rascher entscheiden

Dass KVAs, bezogen auf die Luftreinhalteverordnung, noch «Dreckschleudern» sind, kann kaum bestritten werden. Dies muss aber nicht sein. Die verantwortlichen Besitzer und Betreiber müssten den heutigen Stand der Technik sofort ausnützen. Mutige und rasche Entscheide bei den Zweckverbänden sind gefragt, nicht aber langwierige Diskussionen um Verfahren und Finanzschlüssel. Für all diejenigen, die sich mit der Feststellung in Sicherheit zu wiegen glauben, dass sie die LRV-Grenzwerte für NO_x-Emissionen für KVAs erfüllen (500 mg/m³), sei warnend gesagt, dass im Zusammenhang mit den Massnahmenplänen der Kantone (nach LRV Art 31) eine Verschärfung der Emissionsbegrenzung kommen muss, die LRV durch den Bundesrat gar verschärft werden kann.

In der Bundesrepublik Deutschland gelten nach der TA-Luft ab einer bestimmten An-

lagenleistung Emissionsgrenzwerte mit einer Dynamisierungsklausel. Diese verlangt, dass bei der Festlegung der Grenzwerte für Schadstoffausstoss der aktuelle Entwicklungsstand der Minderungstechnik zu berücksichtigen ist.

Die von der Elektrowatt Ingenieurunternehmung unlängst in Zürich veranstaltete internationale Fachtagung über Stickoxidentminderung in Kehrrichtverbrennungsanlagen lässt zwar noch einige praktische Anwendungsfragen offen, die Dynamisierung, sprich Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für KVA ist aber in Sicht; zu Recht.

Adresse des Verfassers:
Ernst W. Haltiner, Ing. HTL
Hohfurren 19
CH-8126 Zumikon

Lötschental *)

E. Bischof-Suter, P. Herter, H. J. Matthias, H. Schöneich

Der vorliegende Artikel ist eine gekürzte Fassung der Arbeit «Verfeinerte, mathematische Modelle für die klassische Triangulation 4. Ordnung, numerische Untersuchungen» von E. Bischof-Suter, H. J. Matthias und H. Schöneich, erschienen in der Reihe «Berichte» des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der Eidg. Techn. Hochschule Zürich [1]. Es ging darum, für ein ganzes Triangulationsoperat die quantitativen Einflüsse verfeinerter Modellannahmen auf die Neupunktkoordinaten und -Höhen zu analysieren.

Le présent article est un résumé de l'exposé «modèles mathématiques améliorés pour la triangulation classique de 4^e ordre, analyses numériques», d'E. Bischof-Suter, H. J. Matthias et H. Schöneich, paru dans la série des bulletins de l'Institut de Géodésie et Photogrammétrie de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich [1]. Le but de cet exposé était l'analyse quantitative des influences de modèles améliorés sur les coordonnées des points à déterminer d'un groupe entier de triangulation.

1. Einleitung

Als Objekt wurde das Gebirgsoperat Nr. 369 Lötschental gewählt, das eine ausgeprägte V-Talform mit 161 Punkten aufweist. Das Netz wurde anno 1925 mit einem Hildebrand Theodoliten und einem sogenannten Walliser Theodoliten gemessen.

Diese Messwerte wurden in der Folge allen Berechnungen zugrunde gelegt. Als mittlerer Fehler einer Richtung am Gesamtmittel ergaben sich damals $0,4^{cc} \leq \sigma_\alpha \leq 8,3^{cc}$ und für Höhenwinkel $2,1^{cc} \leq \sigma_\beta \leq 9,9^{cc}$.

2. Die untersuchten Modelle

Modell 1

Einzelpunkteinschaltung nach den damaligen Eidg. Instruktionen für die Triangulation 4. Ordnung. Mit diesem Modell wurde seinerzeit die Berechnung vorgenommen.

Modell 2

Ausgleichung in einem Guss für die Lage (ebene Geometrie im Projektionssystem) und die Höhe (sphärische Geometrie); je getrennt.

Modell 3

Vereinfachte räumliche Berechnung in einem Guss mit derselben Geometrie wie in den Modellen 1 und 2.

Modell 4

Wie Modell 2, aber mit Berücksichtigung von interpolierten Lotabweichungen und geoidischen Höhen [2].

3. Berechnungen

Damit für alle Modelle wirklich dieselben Messwerte zu Grunde liegen, wurden alle Daten für die drei neuen Modelle aus dem damaligen Original der Abrisse und Höhenberechnungen entnommen.

Die gewählten mittleren Fehler a priori betragen:

*) Anlass zu dieser Arbeit war der Wunsch des damaligen Direktors der L+T, dipl. Ing. E. Huber, an die Projektleitung RAV, in der Phase Vorstudie für die klassische Triangulation die Bedeutung erweiterter mathematischer Modelle zu untersuchen.