

## Berechnungsmodelle für die NO<sub>x</sub>-Bildung

**Citation for published version (APA):**

van Koppen, C. W. J., & Paauw, T. T. A. (1981). Berechnungsmodelle für die NO<sub>x</sub>-Bildung. *Gas-Waerme International*, 30(1), 24-27.

**Document status and date:**

Gepubliceerd: 01/01/1981

**Document Version:**

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

**Please check the document version of this publication:**

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

**General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

**Take down policy**

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

## Résumé

L'émission d'oxyde azoté de flammes de diffusion turbulentes industrielles est due à un grand nombre de conditions physiques mais aussi chimiques.

Parmi les facteurs chimiques, il convient de citer, d'une part, une série de mécanismes cinétiques qui se déroulent dans la phase gazeuse et qui sont responsables de la formation et de la réduction homogène du monoxyde d'azote; et d'autre part, un certain nombre de réactions hétérogènes entre gaz et solide qui se déroulent à la surface des particules solides (telles que noir de fumée, houille ou particules de coke) et qui contribuent, pour une part non négligeable, à la réduction de molécules d'azote déjà formées.

Parmi les facteurs physiques, il convient de mentionner les effets de charge en couches et les fluctuations de la concentration et de la température qui sont provoquées par les phénomènes de diffusion ou par la turbulence. Ces deux sortes de facteurs physiques ont une grande influence sur le déroulement de la cinétique de la réaction et peuvent entraîner tant une augmentation qu'une diminution de l'émission d'oxyde azoté.

Dans le présent exposé, l'auteur étudie tout spécialement les facteurs chimiques; et à savoir, la cinétique de la phase gazeuse dans une première partie et la cinétique hétérogène dans une deuxième partie. La troisième partie est consacrée aux effets qu'il faut attendre des facteurs physiques.

## Berechnungsmodelle für die NO<sub>x</sub>-Bildung

### Mathematical models for computing the formation of nitrogen oxides

### Modèles de calcul pour la formation de NO<sub>x</sub>

Von C. W. J. van Koppen und Th. T. A. Paauw<sup>1)</sup>

Wenn man sich fragt, wie wohl die NO<sub>x</sub>-Bildung berechnet werden kann – im Hintergrund mit der Frage, wie sie zu minimieren ist – dann führen einfache Überlegungen zu dem Schluß, daß wissenschaftlich gesehen dazu die zugehörigen chemischen Reaktionen, die örtliche Stoffzusammensetzung, die Temperatur und die Verweilzeit in jedem Volumenelement des Verbrennungsraumes und zu jedem Zeitpunkt bekannt sein müssen. Nur für stationäre laminare Strömungsverhältnisse in einfachen Feuerungen könnte man aber hoffen, diese Größen tatsächlich auch – mit Hilfe eines Großrechners – bestimmen zu können. In der Praxis liegen laminare Strömungen in Verbrennungsräumen aber nur ausnahmsweise vor, so daß man irgendwie das Problem der Berechnung der turbulenten Strömungsfelder lösen muß. Das impliziert nicht nur, daß mit Mittelwerten und Schwankungen um die Mittelwerte von Geschwindigkeit, Temperatur und Zusammensetzung gerechnet werden muß, sondern auch, daß Ansätze zu wählen sind, um die turbulenten Austauschprozesse wenigstens annähernd bestimmen zu können. Ebenso muß der Einfluß der Turbulenz auf den Verlauf der Verbrennung, das heißt vor allem auf die Art und Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Flammenfront mit in Betracht gezogen werden. Dazu wäre sofort zu bemerken, daß alle diese Ansätze für jede neue Situation neu experimentell überprüft werden müssen, weil die Zuverlässigkeit von Extrapolationen in diesem Bereich sehr gering ist.

Bei der Verbrennung von festen oder flüssigen Brennstoffen müssen, ergänzend zu den schon erwähnten Effekten, auch noch Zweiphasenphänomene durchgerechnet werden. Für einzelne Partikel oder Tröpfchen stellt dies kein unüberwindbares Problem dar; aber die Wechselwirkungen zwischen Teilchenschwärmen und Gasströmung und der Einfluß von Vergasung bzw. Verdampfung sind Phänomene, deren Erforschung noch zum größten Teil dem Experiment unterworfen ist. Zum Ziel der Luftreinhaltung möchte der Konstrukteur einer neuen Verbrennungsanlage unter anderem vorausberechnen können, wie hoch die NO<sub>x</sub>-Bildung unter den verschiedenen

möglichen Betriebsverhältnissen sein wird. Es ist aber klar, daß der mit der Erfassung aller obenerwähnten Einflüsse verbundene Aufwand in fast allen Fällen viel zu groß ist, um derartige Berechnungen tatsächlich durchführen zu können, auch weil häufig die dafür notwendige Zeit fehlt. Wenn es in Laboratorien auch jetzt möglich ist, für gut kontrollierte und reichlich durchgemessene Flammen eine gute Übereinstimmung zwischen Meßdaten und Berechnungsergebnissen zu erhalten, so darf daraus nicht geschlossen werden, daß damit bereits für den praxisorientierten Ingenieur das erwünschte Berechnungsinstrumentarium geschaffen ist. Vielmehr braucht er im Anfang einer Entwicklung einige allgemeine Anhaltspunkte, wie stark sich beispielsweise eine Verkleinerung des Feuerungsvolumens oder eine Änderung der Leistung auf die NO<sub>x</sub>-Bildung auswirken wird. Erst wenn sich herausstellt, daß ein Überschreiten der Emissionsnormen zu befürchten ist, oder bei der Detailkonstruktion der Brennkammer, wird er sich vielleicht mehr für die Feinheiten der grundlegenden Laboruntersuchungen interessieren.

Bei jeder Modellierung der NO<sub>x</sub>-Bildung müssen die folgenden, teils schon erwähnten fünf Punkte berücksichtigt werden:

1. Es gibt drei Mechanismen für die Stickstoffmonoxid-Bildung:
  - Den Zeldovič-Mechanismus, bei dem das Aufspalten von Stickstoffmolekülen durch Sauerstoffatome die führende chemische Reaktion ist.
  - Die „prompte“ Stickstoffmonoxid-Bildung, bei der Kohlenwasserstofffragmente (CH, CH<sub>2</sub>) die Stickstoffmoleküle der Verbrennungsluft angreifen und so Stickstoffatome freisetzen. Bei Wasserstoff- und Kohlenmonoxidflammen fehlen die Kohlenwasserstoffbruchstücke; daher tritt die prompte Stickstoffmonoxidbildung nicht auf.
  - Die „Brennstoff-Stickstoffmonoxid-Bildung“, bei welcher der Angriff von Sauerstoff-, Wasserstoff- und Hydroxylradikalen auf Stickstoff enthaltende Brennstoffmolekülefragmente atomaren Stickstoff freisetzt.
2. Well es in allen denkbaren Stickstoffmonoxid-Bildungsschritten die verschiedenartigen Radikale sind, welche die Bildung einleiten, müssen die Konzentrationen der Radikale

<sup>1)</sup> Professor Ir. C. W. J. van Koppen und Ir. Th. T. A. Paauw, Technische Universität Delft, Niederlande.

gut bekannt sein. Dazu muß der Ablauf der Verbrennung möglichst genau beschrieben werden, und gewählte Näherungen müssen die Radikalkonzentrationen unbeeinträchtigt lassen. Ob die oft verwendeten Gleichgewichtszusammensetzungen diese Bedingung erfüllen, ist zweifelhaft.

- Die schöne laminare Flammenfront, wie man sie vom Kerzenlicht zu Weihnachten kennt, kommt in industriellen Feuerungen nicht vor. Die Flammenfront wird von der Turbulenz zumindest stark gefaltet; meistens wird sie in der hochturbulenten Hauptverbrennungszone von Scherkräften in viele kleine Elemente zerrissen. Statt einer Front entsteht so eine Wolke aus zahlreichen kleinen Verbrennungsgebieten, deren Abmessungen und Lebensdauer jenen der turbulenten Wirbel ähnlich sind.
- Wegen des gerade angegebenen Einflusses der Turbulenz auf den Verbrennungsablauf reichen mittlere Strömungsgeschwindigkeiten nicht zur Charakterisierung des Strömungsfeldes aus. Auch Intensität und Längenmaßstab der Turbulenz müssen mit in die Berechnung eingehen.

Mehrere Universitätslaboratorien verfügen heutzutage über Berechnungsmodelle, in denen auch die Entwicklung der Turbulenz enthalten ist.

Die Autoren bezweifeln vor allem wegen des notwendigen Rechenaufwandes noch die Anwendbarkeit dieser Modelle in der Praxis. Auch sind die Feuerungsformen in der Praxis wohl meist erheblich verwickelter als im Laboratorium. Außerdem ist die Darstellung von Turbulenzen in Drehströmungsfeldern noch kaum experimentell untermauert worden.

- Schließlich muß die Wärmeabgabe der Feuerung ziemlich genau modelliert werden, weil die Temperatur einen erheblichen Einfluß auf die unterschiedlichen Reaktionen haben kann.

Für die Hauptverbrennungszone ist die Strahlungswärmeübertragung im allgemeinen am wichtigsten. Bei der Nachverbrennung spielt oft auch der konvektive Wärmeaustausch zwischen Gas und Wand eine große Rolle. Wenn Mittelwerte der Temperatur verwendet werden, darf nicht vergessen werden, daß Reaktionsgeschwindigkeiten nicht linear proportional zur Temperatur sind. Die Bestimmung der richtigen mittleren Temperatur wäre dieser Tatsache anzupassen.

Über die numerischen Schwierigkeiten, die bei der Berechnung auftreten können, soll nur kurz berichtet werden, weil sie so zahlreich sind, daß sie den Rahmen dieses Beitrages sprengen würden. Eine interessante Übersicht der numerischen Details gibt Caretto [1].

Es soll hier ein Weg besprochen werden, der in Delft verfolgt wurde, um in allgemeinem Sinne zu einigen Schlüssen über die Tendenz der NO<sub>x</sub>-Bildung in Feuerungen zu kommen.

Bei der Besprechung des im Verbrennungslaboratorium der Technischen Universität Delft gegangenen Weges werden jedoch die anderen Möglichkeiten der Modellierung im Labor und in der Praxis nicht außer Betracht bleiben.

Tafel 1: Verbrennungsdichte verschiedener Verbrennungsprozesse (nach [2])  
 Table 1: Combustion density of various combustion processes (after [2])  
 Tableau 1: Densité de combustion de différents processus de combustion (suivant [2])

Verbrennungsprozeß	Verbrennungsdichte kW/m <sup>3</sup>
Reaktionszone der laminaren Vormischflamme . . . . .	3 · 10 <sup>6</sup>
Reaktionszone der laminaren Diffusionsflamme . . . . .	2 · 10 <sup>6</sup>
Homogener Reaktor im Ausblasepunkt (experimentell) . . . . .	3 · 10 <sup>6</sup>
Homogener Reaktor im Ausblasepunkt (numerisch) . . . . .	7 · 10 <sup>6</sup>

Der erste Schritt auf diesem Weg war der Befund, daß die Verbrennungsverhältnisse in der Reaktionszone der laminaren Flammenfront sowohl bei Vormischflammen als bei Diffusionsflammen den Verhältnissen in einem homogenen, perfekt gemischten Reaktor im Ausblasepunkt (oder Löschpunkt) sehr ähnlich sind. Die Tafeln 1 und 2 zeigen, wie sowohl die Verbrennungsdichte als auch die Zusammensetzungen in den unterschiedlichen Fällen wenigstens der Größenordnung nach übereinstimmen. Die Berechnungen bezüglich des Reaktors im Löschpunkt wurden an der Universität Delft mit einem 33 Reaktionen enthaltenden System durchgeführt [2].

Der Löschpunkt wurde durch ein schrittweises Verringern der Verweilzeit im Reaktor – bis noch gerade eine stabile Verbrennung auftrat – bestimmt. Bei gegebenen Einströmbedingungen sind in einem derartigen Reaktor die Verweilzeit, die Zusammensetzungen des Gemisches und die Temperatur eindeutig bestimmt.

Wie schon erwähnt, findet die Hauptverbrennung in einer Flamme entweder in einer Front oder in kleinen, der Turbulenz unterworfenen Gebieten statt. In diesen Gebieten wird die Verbrennung aber immer wieder von neuen Scherkräftstößen unterbrochen. Das heißt, daß hier die Verbrennung fortwährend einem Löschprozeß unterworfen ist, ungefähr so wie er im homogenen Reaktor im Löschpunkt auftritt. Beide Verbrennungsarten können deshalb numerisch als eine Verbrennung in einem solchen Reaktor angenähert werden.

Das Volumen der Hauptverbrennungszone ist fast ohne Ausnahme viel kleiner als das Volumen einer Brennkammer oder einer Feuerung. Es liegt deshalb nahe, die Verbrennung in zwei Stufen zu modellieren, wobei die erste Stufe ein relativ kleiner homogener Reaktor im Löschpunkt ist und die zweite ein relativ großer Reaktor, der entweder als Kolbenstromreaktor oder als perfekt gemischter homogener Reaktor dargestellt werden kann. Es läßt sich zeigen, daß die Nachverbrennung in den beiden letzten Fällen nicht sehr unterschiedlich abläuft.

Das Verbrennungsverhältnis der zwei Stufen, oder besser das Verweilzeitverhältnis kann in dimensionsloser Form als eine Damköhlerzahl gedeutet werden.

Einleuchtend für Praktiker ist in dieser Darstellung vielleicht, daß für hochbelastete Gasturbinenbrennkammern das Volumen der ersten Stufe rund ein Zehntel des Brennkammervolu-

Tafel 2: Vergleich zwischen verschiedenen Mischungskomponenten in der Flammenfront einer laminaren Diffusionsflamme und beim PSR-Modell im Löschpunkt (Methan-Sauerstoff,  $\phi = 0,2$ ,  $P = 0,05$  bar) (nach [2])

Table 2: Comparison between different constituents in the flame front of a laminar diffusion flame and at the point of extinction in the PSR model (methane-oxygen,  $\phi = 0,2$ ,  $P = 0,05$  bar) (after [2])

Tableau 2: Comparaison entre différents composants de mélange dans le front d'une flamme laminaire de diffusion et dans un modèle PSR au point d'extinction (méthane-oxygène,  $\phi = 0,2$ ,  $P = 0,05$  bar) (suivant [2])

Komponente . . . . .	CO	CH <sub>2</sub> O	CH <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	CHO
X <sub>i</sub> , experimentell . . . . .	4,4 · 10 <sup>-2</sup>	1,2 · 10 <sup>-3</sup>	1,2 · 10 <sup>-2</sup>	9 · 10 <sup>-3</sup>	3,1 · 10 <sup>-2</sup>	1 · 10 <sup>-5</sup>
X <sub>i</sub> , rechnerisch . . . . .	5,8 · 10 <sup>-2</sup>	6,6 · 10 <sup>-4</sup>	5,0 · 10 <sup>-4</sup>	7,5 · 10 <sup>-3</sup>	2,5 · 10 <sup>-2</sup>	8 · 10 <sup>-6</sup>
Komponente . . . . .	H	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	O	OH	O <sub>2</sub>
X <sub>i</sub> , experimentell . . . . .	1,7 · 10 <sup>-3</sup>	5,5 · 10 <sup>-3</sup>	0,152	5,5 · 10 <sup>-3</sup>	7,5 · 10 <sup>-3</sup>	0,73
X <sub>i</sub> , rechnerisch . . . . .	1,9 · 10 <sup>-3</sup>	6,5 · 10 <sup>-3</sup>	0,155	9,1 · 10 <sup>-3</sup>	7,4 · 10 <sup>-3</sup>	0,73

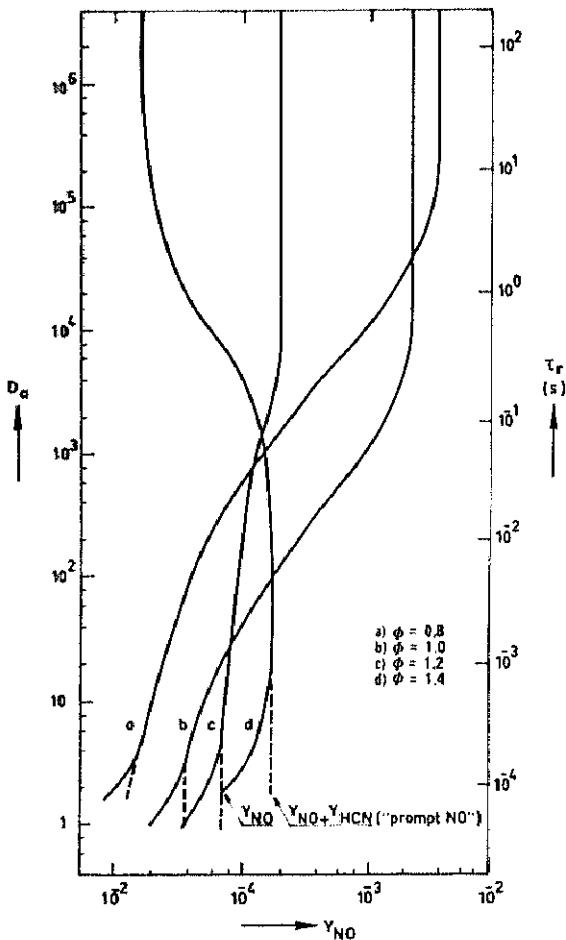


Bild 1: Stickstoffmonoxid-Massenanteil als Funktion der Damköhlerzahl für verschiedene Werte des stöchiometrischen Massenanteils eines Methan-Luft-Gemisches (PSR-PFR-Kombination,  $Th = \infty$ )

Fig. 1: Percentage of nitrogen monoxide as a function of Damköhler number for various values of the stoichiometric proportion of a methane/air mixture (PSR-PFR combination,  $Th = \infty$ )

Fig. 1: Pourcentage massique d'oxyde nitrique comme fonction de l'indice de Damköhler pour différentes valeurs de la part massique stoechiométrique d'un mélange de méthane et d'air (combinaison PSR-PFR,  $Th = \infty$ )

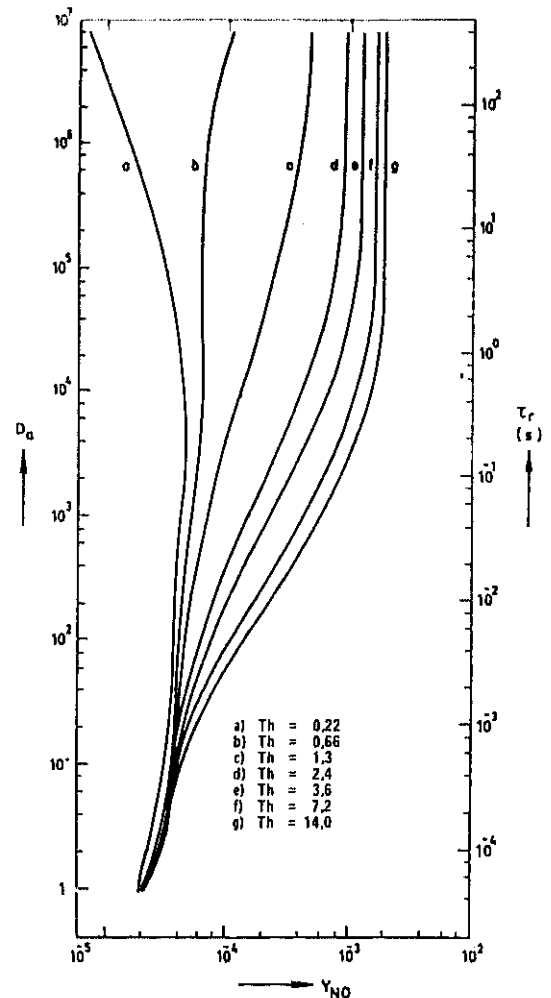


Bild 2: Stickstoffmonoxid-Konzentration als Funktion der Damköhlerzahl für verschiedene Werte der Thringzahl eines stöchiometrischen Methan-Luft-Gemisches (PSR-PSR-Kombination)

Fig. 2: Nitrogen monoxide concentration as a function of the Damköhler number for various values of the Thring number of a stoichiometric methane/air mixture (PSR-PSR combination)

Fig. 2: Concentration de monoxyde d'azote (oxyde nitrique) comme fonction de l'indice de Damköhler pour différentes valeurs de l'indice de Thring d'un mélange stoechiométrique de méthane et d'air

mens beträgt, die korrespondierende Damköhlerzahl also ungefähr zehn ist. Für Großfeuerungen in Kraftwerken reicht die Damköhlerzahl bis zu zehntausend und höher.

Der Hauptvorteil dieser Zweistufenmodellierung ist, daß sie es gestattet, Globalberechnungen über die NO<sub>x</sub>-Bildung unter Beibehaltung der Radikalkonzentration zu machen, mit einer guten Chance, wenigstens die Tendenzen richtig abschätzen zu können. Als Beispiel zeigt Bild 1 die auf diese Weise berechneten Stickstoffmonoxid-Massenanteile in einer Erdgasfeuerung, abhängig von der Mischungsstärke  $\phi$  und der Damköhlerzahl, das heißt – praktisch gesehen – das Volumen der Feuerungen oder die Gesamtverweilzeit der Gase in der Feuerung.

Man sieht, wie sich bei hoher Mischungsstärke ein relativ hoher „prompt-NO“-Pegel einstellt (Kurve d, niedrige Da-Zahl), aber bei großem Brennkammervolumen gerade für dieses reiche Gemisch ein niedriger Massenanteil ergibt, offenbar aufgrund von Sauerstoffmangel. Bei armen Gemischen ist das Verhalten gerade umgekehrt.

Wie bereits gesagt muß auch die Wärmeabgabe des Brennraumes ziemlich genau in Betracht gezogen werden. Eine Kenn-

zahl, die sich für die Charakterisierung der Wärmeabgabe gut eignet, wenn es sich um Globalbeschreibungen und Tendenzberechnungen handelt, ist die Thring- oder Konakowzahl  $Th$ . Sie drückt das Verhältnis aus zwischen der Wärmeproduktion bei vollständiger Verbrennung und dem Strahlungswärmefluß, wenn für das gesamte Brennkammervolumen adiabate Flammentemperatur angenommen werden kann. Je höher die Thringzahl ist, um so niedriger ist die Wärmeabgabe und um so weiter steigt die Brennkammertemperatur an. Für die Strahlungsberechnung selbst muß selbstverständlich auch noch das Emissionsverhältnis der Gase definiert werden. Bild 2 zeigt, wie sich beim Verbrennen von Erdgas in der erwähnten zweistufigen Berechnung auch der Einfluß der Wärmeabgabe recht instruktiv erfassen läßt.

Es muß dazu bemerkt werden, daß die niedrigste Thringzahl  $Th = 0,22$  (Kurve a) mit Temperaturen im Brennraum von rund 1200 °C und die Kurve g für eine Thringzahl von  $Th = 14$  mit Temperaturen von rund 1900 °C übereinstimmt. Der Effekt der Brennraumtemperatur zeigt sich erst bei höheren Damköhlerzahlen, wenn sich die langsame Stickstoffmonoxidbildung durchsetzen kann.

Bei niedrigen Damköhlerzahlen, die an kleinen hochbelasteten Brennkammern vorliegen, überwiegt die „prompte“ Stickstoffmonoxidbildung. Die Verhältnisse in der Flamme werden dann hauptsächlich von den Einströmbedingungen bestimmt. Die Wärmeabgabe spielt kaum noch eine Rolle.

Es kann interessant sein, diese vielleicht etwas abstrakten Betrachtungen einmal an der Praxis zu überprüfen. Bild 3 zeigt, wie sich eine große Zahl von Stickstoffmonoxid-Messungen in eine von Damköhlerzahl und Thringzahl abhängige Darstellung einfügen.

Die Messungen betreffen die Verbrennung von Erdgas bei  $\phi \approx 1$ , sowohl in Kraftwerkskesseln als auch in industriellen Wasserrohrkesseln und in kleineren zylindrischen Kesseln. Der horizontale Bereich der einzelnen Meßfälle hängt direkt mit dem Unterschied zwischen Teil- und Vollastemissionen zusammen. Fast alle Daten können in einem Band zwischen einer Thringzahl von  $Th = 0,66$  (Kurve a in Bild 3) und  $Th = 2,4$  (Kurve c in Bild 3) untergebracht werden. Diese Werte korrespondieren mit Feuerungstemperaturen zwischen 1400 °C und 1700 °C, wie sie in der Praxis bekanntlich vorkommen.

Die niedrigen Stickstoffmonoxid-Emissionen bei einigen Messungen sind möglicherweise die Folge von Hochofengas-zumischung zum Brennstoff. Mit ähnlichen Überlegungen können aber nicht alle Unterschiede zwischen den verschiedenen Anlagen erklärt werden. Eigentlich kann man sagen, daß dieses Bild sowohl die Möglichkeiten als auch die Grenzen der Globalberechnungsmodelle zeigt. Tendenzen und Größenordnungen können schnell und recht einfach berechnet werden. Kleine Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagen lassen sich auf diese Weise nicht erfassen.

Um dort weiterzukommen, muß man den interessanten, aber mühsamen Weg der Differenzverfahren unter Berücksichtigung der Turbulenzberechnung, der Transportbeschreibung usw. gehen, um wirkliches Verstehen zu erreichen.

#### Schrifttum

- [1] L. S. Caretto: Mathematical Modelling of Pollutant Formation. Prog. Energy Combustion Sci., Vol. 1 (1976), S. 47-71.
- [2] Paauw, Th. T. A.; D. J. Heidweiller, C. W. J. van Koppen: Die Bildung von Stickstoffoxiden bei industriellen Erdgasverbrennungsprozessen. VDI-Bericht Nr. 346, VDI-Verlag, Düsseldorf 1979, S. 55-66.
- [3] J. Doelman e.a.: Het verminderen van de NO<sub>x</sub>-uitwerp van vuurhaarden. Staatsuitgeverij, Den Haag, 1978.

#### Zusammenfassung

Berechnungsmodelle für die NO<sub>x</sub>-Bildung in turbulenten Strömungen können aufgrund der zahlreichen Einflüsse auf die Verbrennungsvorgänge nicht genau sein. Es müssen dazu Ansätze gewählt werden, mit denen die Vorgänge in den Strömungen annähernd bestimmt werden können. Die Zuverlässigkeit von Extrapolationen ist in diesem Bereich jedoch sehr gering. Die Autoren berichten von einem Forschungsvorhaben an der Universität Delft, bei dem die Tendenzen der NO<sub>x</sub>-Bildung in Feuerungen untersucht wurden.

#### Summary

Mathematical models for computing the formation of nitrogen oxide under conditions of turbulent flow cannot be accurate in

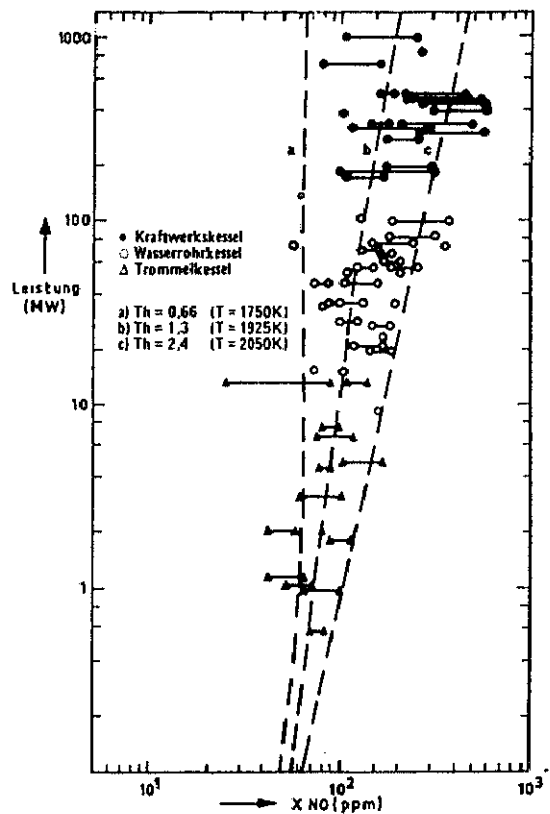


Bild 3: Vergleich zwischen den gemessenen und den errechneten Ergebnissen der Stickstoffmonoxid-Emissionen von wassergekühlten und erdgasbeheizten Kesseln (PSR-PSR-Kombination,  $\phi = 1$ ) (nach [3])

Fig. 3: Comparison between measured and computed values of nitrogen monoxide emissions from water-cooled and natural-gas-fired steam generating units (PSR-PSR combination,  $\phi = 1$ ) (after [3])

Fig. 3: Comparaison entre les résultats mesurés et calculés des émissions d'oxyde nitrique de chaudières refroidies à l'eau et chauffées au gaz naturel (combinaison PSR-PSR,  $\phi = 1$ ) (suivant [3])

view of the numerous influences acting on the combustion process. Equations therefore have to be used which permit phenomena in the streams to be approximated. Extrapolation, however, is not particularly reliable. The authors report on a research project underway at Delft University which is aimed at investigating the tendency of nitrogen oxide formation in combustion chambers.

#### Résumé

Les modèles de calcul pour la formation de NO<sub>x</sub> dans des écoulements turbulents ne peuvent pas être exacts en raison des nombreuses influences s'exerçant sur les processus de la combustion. Il convient donc de choisir des paramètres qui permettent de déterminer, de manière approchée, les phénomènes qui interviennent dans les écoulements. L'exactitude des extrapolations est toutefois très faible dans ce domaine. Les auteurs font état d'un projet de recherche à l'université de Delft qui a pour objet d'étudier les tendances de la formation de NO<sub>x</sub> dans les foyers de chauffage.