

Möglichkeiten der Emissionsminderung von Stickoxiden und anderen ozonbildenden Spurengasen

Studie A.5.4

A. Obermeier, A. Voß

**Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)
Universität Stuttgart**

Inhaltsverzeichnis

- 0 Zusammenfassung**
- 1 Einleitung**
- 2 Abgrenzung des Themengebietes**
 - 2.1 Emittierte Stoffe**
 - 2.2 Emittenten**
 - 2.3 Bearbeitungsumfang**
- 3 Derzeitige Emissionen von NO_x, CO und NMVOC bzw. VOC in der Bundesrepublik Deutschland**
- 4 N₂O-Emissionen bei Feuerungen und NO_x-Minderungstechnologien**
- 5 Möglichkeiten zur Minderung von energiebedingten NO_x-, CO- und NMVOC-Emissionen aus stationären Quellen**
 - 5.1 Möglichkeiten zur Minderung von NO_x-Emissionen aus öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken**
 - 5.1.1 Primärmaßnahmen**
 - 5.1.1.1 Rauchgasrezirkulation**
 - 5.1.1.2 Stufenverbrennung**
 - 5.1.1.3 NO_x-arme Brenner**
 - 5.1.1.4 Kombinierte Primärmaßnahmen**
 - 5.1.2 Sekundärmaßnahmen**
 - 5.1.2.1 SCR-Verfahren**
 - 5.1.2.2 SNCR-Verfahren**
 - 5.2 Möglichkeiten zur Minderung von NO_x-Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen**
 - 5.2.1 Primärmaßnahmen**

- 5.2.2 Sekundärmaßnahmen
 - 5.2.2.1 SCR-Verfahren
 - 5.2.2.2 Harnstoff-Lanze-Verfahren
 - 5.2.2.3 NOxOUT-Verfahren
 - 5.2.2.4 Aktivkoks-Verfahren
- 5.2.3 NOx-Minderung bei Prozeßfeuerungen
- 5.3 Möglichkeiten zur Minderung von CO- und NMVOC-Emissionen aus Feuerungsanlagen von Kleinverbrauchern und Haushalten
 - 5.3.1 Ölfeuerungen
 - 5.3.1.1 Emissionsminderung bei Leistungsregelung
 - 5.3.1.2 Einsatz von Vergasungsbrennern
 - 5.3.1.3 Katalytische Verbrennung
 - 5.3.2 Gasfeuerungen
 - 5.3.3 Kohlefeuerungen
 - 5.3.3.1 Emissionsminderung durch Verwendung emissionsarmer Kohlesorten
 - 5.3.3.2 Verbrennungsluft-Führung
 - 5.3.3.3 Leistungsregelung
 - 5.3.3.4 Sekundärmaßnahmen
 - 5.3.4 Feuerungsanlagen für Holz und andere biogene Brennstoffe
 - 5.3.4.1 Konstruktion der Brennkammer
 - 5.3.4.2 Emissionsminderung bei Leistungsregelung
- 5.4 Möglichkeiten zur Minderung von NMVOC-Emissionen aus Raffinerieprozeßen
- 5.5 Möglichkeiten zur Minderung von NMVOC-Emissionen aus der Kraftstoff-Verteilung
 - 5.5.1 Lagertanks in Raffinerien und Zwischenlagern
 - 5.5.2 Befüllung von Transportmitteln in Raffinerien und Zwischenlagern
 - 5.5.2.1 Gaspendingung
 - 5.5.2.2 Rückgewinnung von Kraftstoffdämpfen
 - 5.5.2.2.1 Absorption
 - 5.5.2.2.2 Adsorption
 - 5.5.2.2.3 Kondensation
 - 5.5.2.2.4 Sonstige Rückgewinnungsverfahren

- 5.5.2.3 **Verbrennung**
- 5.5.3 **NMVOC-Emissionsminderung im Tankstellenbereich**
 - 5.5.3.1 **Befüllung von Tankstellentanks**
 - 5.5.3.2 **Kraftfahrzeugbetankung**
 - 5.5.3.2.1 **Tankstellenseitige Maßnahmen**
 - 5.5.3.2.2 **Fahrzeugseitige Maßnahmen**

- 6 Technisches Minderungspotential und Minderungskosten für ausgewählte Maßnahmen zur Minderung von NO_x-, CO- und NMVOC-Emissionen**
 - 6.1 **Feuerungsanlagen**
 - 6.1.1 **NO_x-Minderung in öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken**
 - 6.1.2 **NO_x-Minderung in genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen der Industrie**
 - 6.1.3 **NMVOC- und CO-Minderung bei nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen in Haushalten und von Kleinverbrauchern**
 - 6.2 **NMVOC-Minderung bei Raffinerieprozessen**
 - 6.3 **NMVOC-Minderung bei der Lagerung und dem Umschlag von Benzin**

- 7 Veränderung der Immissionskonzentration von Ozon bei Ausschöpfung des technischen Potentials zur Emissionsminderung der Vorläufersubstanzen**

- 8 Schlußbetrachtung und Ausblick**

Literatur

0 Zusammenfassung

Troposphärisches Ozon trägt nach heutiger Einschätzung zu ca. 8 % zum gegenwärtigen Treibhauseffekt bei. Im Rahmen des Studienkomplexes A.5.4 sollen im wesentlichen Möglichkeiten erörtert und untersucht werden, anhand derer die Emissionen von NO_x und anderen ozonbildenden Spurengasen, d.h. CO und NMVOC (flüchtige organische Verbindungen ohne Methan), gemindert werden können. Für ausgewählte Minderungsmaßnahmen sollen technische Minderungspotentiale und Minderungskosten abgeschätzt werden. Zudem soll in qualitativer Form kurz darauf eingegangen werden, inwieweit bei der Ausschöpfung der angegebenen Minderungspotentiale eine Veränderung der Immissionssituation von troposphärischem Ozon zu erwarten ist.

Desweiteren wird der Frage nachgegangen, ob bzw. in welchem Umfang klimarelevante N₂O-Emissionen durch stationäre Feuerungs- und DeNO_x-Anlagen freigesetzt werden.

Auftragsgemäß werden ausschließlich stationäre Emissionsquellen berücksichtigt, die dem Bereich der Bereitstellung bzw. Nutzung fossiler Energieträger zuzuordnen sind. Dies sind im einzelnen:

- Feuerungsanlagen in den Sektoren
 - öffentliche Kraft- und Fernheizwerke
 - Industrie
 - Kleinverbraucher
 - Haushalte
- Anlagen zur Mineralölverarbeitung in Raffinerien (ohne Feuerungsanlagen)
- Lagerung und Umschlag von Ottokraftstoffen

Bezogen auf das Jahr 1986 werden durch diese Quellen ca. 39 % der gesamten NO_x-Emissionen, ca. 14 % der gesamten CO-Emissionen und etwa 11 % der gesamten VOC-Emissionen (der NMVOC-Anteil ist hier nicht herausgerechnet) in der Bundesrepublik Deutschland verursacht /UBA, 1989/.

Es werden Minderungsmaßnahmen für diejenigen Emittentenbereiche betrachtet, die im Jahr 1987 einen Anteil von mehr als 10 % an den jeweiligen energiebedingten Schadstoffemissionen stationärer Quellen aufweisen. Den dazu durchgeführten Berechnungen liegen die im Studienschwerpunkt A.1.1 erarbeiteten Emissionsfaktoren und Energieverbrauchsdaten zugrunde. Im einzelnen werden diskutiert:

- Maßnahmen zur NO_x-Minderung für Feuerungsanlagen der öffentlichen Kraft- und Fernheizwerke und der Industrie, die 1987 mit ca. 780 kt einen Anteil von insgesamt 85 % an den energiebedingten NO_x-Emissionen stationärer Quellen aufweisen,
- Maßnahmen zur NMVOC- und CO-Minderung für Feuerungsanlagen von Kleinverbrauchern bzw. Haushalten, die 1987 mit 56 kt bzw. 1150 kt zu 27 bzw. 89 % an den energiebedingten NMVOC- bzw. CO-Emissionen stationärer Quellen beteiligt sind,
- Maßnahmen zur NMVOC-Minderung bei Prozessen zur Mineralölverarbeitung sowie bei der Lagerung und dem Umschlag von Ottokraftstoffen, die 1987 mit insgesamt 130 kt einen Anteil von ca. 63 % an den energiebedingten NMVOC-Emissionen stationärer Quellen aufweisen.

Zunächst werden für die angesprochenen Bereiche ausgewählte Emissionsminderungsmaßnahmen dargestellt und erläutert. Anschließend werden für diese Maßnahmen die technisch möglichen Minderungspotentiale ermittelt, die sich für die Emissionsniveaus in den Bezugsjahren 1987 und 2005 ergeben. Die in diesem Zusammenhang für das Jahr 2005 ausgewiesenen Emissionen werden mit den Emissionsfaktoren von 1987 ermittelt. Es wird also unterstellt, daß - ausgehend von der Situation in 1987 - keine Minderungsmaßnahmen durchgeführt werden. Die Emissionsangaben für 2005 sind deshalb ausschließlich als Bezugswerte zu interpretieren. Weiterhin sollen die Kosten, die sich bei Ausschöpfung des technischen Potentials der diskutierten Minderungsmaßnahmen ergeben, grob abgeschätzt werden.

Zur Minderung der NO_x-Emissionen aus Feuerungsanlagen stehen verschiedene Primärmaßnahmen wie z.B.

- NO_x-arme Brenner
- Stufenverbrennung
- Rauchgasrückführung
- ACOM-Verfahren
- kombinierte Maßnahmen

zur Verfügung, mit denen je nach Anwendungsfall maximale Minderungsgrade zwischen 30 und 70 % erreicht werden können.

Daneben können, alleine oder in Kombination mit Primärmaßnahmen, verschiedene Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Minderung wie z.B.

- SCR-Verfahren (Selective Catalytic Reduction)
- SNCR-Verfahren (Selective Non-Catalytic Reduction)
- NO_xOUT-Verfahren
- Aktivkoksverfahren

eingesetzt werden, die zwischen 45 und ca. 85 % des NO_x im Rauchgas reduzieren.

Das höchste technische Minderungspotential von Einzelmaßnahmen im Bereich öffentlicher Kraft- und Fernheizwerke weist das SCR-Verfahren auf. Bezogen auf das Emissionsniveau im Jahr 1987 beträgt das Minderungspotential dieser Maßnahme ca. 380 kt/a. Dies entspricht einer 80 %-igen Reduzierung der NO_x-Emissionen in diesem Bereich. Die spezifischen Minderungskosten weisen je nach Feuerungswärmeleistung, Auslastung und Brennstofftyp eine hohe Bandbreite auf. Die Gesamtkosten für diese Maßnahme werden für das ausgewiesene Minderungspotential auf ca. 2.2 Mrd. DM geschätzt.

Im Bereich der Feuerungsanlagen der Industrie beinhaltet das SCR-Verfahren ebenfalls das höchste technische Minderungspotential. Wie bei den anderen Minderungsmaßnahmen in diesem Bereich wird davon ausgegangen, daß diese Maßnahme - zumindest gegenwärtig - nicht bei Prozeßfeuerungen eingesetzt werden kann. Mit ca. 110 kt/a, bezogen auf die Emissionen in 1987, ist das grob abgeschätzte technische Minderungspotential deshalb vergleichsweise gering. Dies entspricht einer NO_x-Minderung von ca. 36 % in diesem Bereich. Die spezifischen Minderungskosten bewegen sich je nach Anlagenart, Feuerungswärmeleistung und Auslastung ebenfalls in einem sehr weiten Bereich. Die Gesamtkosten werden bei Ausschöpfung des hier angegebenen technischen Minderungspotentials für 1987 auf etwa 990 Mio. DM/a geschätzt.

Die gesetzlich festgelegten NO_x-Emissionsgrenzwerte für genehmigungsbedürftige Feuerungsanlagen können in der Regel nur eingehalten werden, wenn entsprechende Minderungsmaßnahmen durchgeführt werden. In manchen Feuerungsanlagen wurden Minderungsmaßnahmen inzwischen bereits verwirklicht, für zahlreiche weitere Anlagen werden sie derzeit vorbereitet. Zur Einhaltung der derzeitigen Emissionsgrenzwerte ist allerdings nicht in jedem Fall diejenige technisch realisierbare Maßnahme bzw. Maßnahmenkombination erforderlich, welche den höchsten Minderungsgrad aufweist.

Bezüglich der NMVOC- und CO-Emissionen von kleineren Feuerungsanlagen von Kleinverbrauchern und Haushalten ist festzuhalten, daß gegenwärtig noch keine weitreichende Konzepte zur Emissionsminderung zur Verfügung stehen. Es können lediglich Hinweise gegeben werden, wie durch ein geändertes Nutzerverhalten in gewissem Umfang Emissionsminderungen zu erzielen sind. Erst die Entwicklung geeigneter, umfassend durchführbarer Maßnahmen, insbesondere konstruktionsseitiger Verbesserungen bei Feststofffeuerungen, kann hier zu einer deutlichen Verbesserung der Emissionssituation führen.

Verschiedene Maßnahmen zur NMVOC-Minderung in den Bereichen Raffinerieprozesse und Benzinverteilung können dagegen als Stand der Technik angesehen werden. Im Raffineriesektor ist durch eine optimale Anlagenwartung und durch die Abdeckung von Ölabscheidern eine Emissionsminderung von ca. 12 kt/a bzw. 55 %, bezogen auf das Jahr 1987, zu erreichen, wobei durch die Gutschrift des Wertes der zurückgewonnenen Kohlenwasserstoffe unter den zugrunde gelegten Annahmen teilweise auch eine geringe Kostenersparnis mit der Durchführung dieser Maßnahmen verbunden ist.

Bei der Lagerung und Verteilung von Ottokraftstoffen können unter anderem folgende Maßnahmen zur Emissionsminderung beitragen:

- Sekundäre Randabdichtungen in Schwimmdachtanks
- Anschluß von Festdachtanks an Gassammelleitungen und Dämpferückgewinnungsanlagen
- Gaspendingung und/oder Dämpferückgewinnung bzw. -verbrennung bei sämtlichen Umschlagvorgängen in der Benzinverteilungskette vom Raffinerieabsatz bis hin zur Kraftfahrzeugbetankung an Straßentankstellen.

In verschiedenen Emittentenbereichen sind diese Minderungsmaßnahmen nach den Bestimmungen der TA Luft künftig erforderlich, zum Teil auch schon eingeführt.

Bei Durchführung der genannten Maßnahmen, wobei eine möglichst weitgehende Dämpferückgewinnung gegenüber der thermischen oder katalytischen Verbrennung bevorzugt berücksichtigt wird, kann, bezogen auf das Emissionsniveau im Jahr 1987, eine Minderung der NMVOC-Emissionen um nahezu 100 kt/a bzw. 92 % in diesem Sektor erzielt werden. Die Minderungskosten belaufen sich, bei Gutschrift des Wertes der

zurückgewonnenen Produkte, grob abgeschätzt auf eine Größenordnung von ca. 250 Mio. DM/a.

In Tabelle 0.1 sind die wesentlichen Ergebnisse für ausgewählte Minderungsmaßnahmen nochmals zusammengefaßt.

Die Frage, inwieweit durch die Ausschöpfung des technischen Minderungspotentials der in dieser Studie diskutierten NO_x-, CO- und NMVOC-Minderungsmaßnahmen eine Änderung der Immissionssituation von troposphärischem Ozon zu erwarten ist, kann hier sicherlich nicht hinreichend beantwortet werden. Die Komplexität der luftchemischen Umsetzungen, die unter anderem zur Bildung von Ozon in der Troposphäre führen, erfordert insbesondere eine differenzierte Analyse der räumlichen und zeitlichen Verteilung sowie der genauen Zusammensetzung der Emissionen. Es sei aber darauf hingewiesen, daß eine vergleichsweise einseitige bzw. vorwiegende Minderung der jährlichen NO_x-Gesamtemissionen, die bei Durchführung der hier vorgeschlagenen Maßnahmen für die betrachteten Quellen resultiert, unter bestimmten Umständen zu einer zeit- und gebietsweise erhöhten Ozonbildung führen könnte.

Die Bedeutung von klimarelevanten N₂O-Emissionen aus Feuerungs- und DeNO_x-Anlagen läßt sich zum gegenwärtigen Zeitpunkt ebenfalls nicht zweifelsfrei klären. Auf der Basis der bisher vorliegenden Meßdaten und Informationen werden die Emissionen dieser Quellen in der Bundesrepublik für das 1987 auf ca. 68 000 t geschätzt. Gemessen an den natürlichen und sonstigen anthropogenen N₂O-Emissionen, für die in der Literatur allerdings nur grob geschätzte, weltweite Daten vorliegen, scheinen die N₂O-Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen, auch unter Berücksichtigung von NO_x-Vermeidungstechniken, eher von untergeordneter Bedeutung zu sein.

Tabelle 0.1

**Auswirkungen ausgewählter Minderungsmaßnahmen auf die Emissionen
ozonbildender Spurengase
Bezugsjahre 1987¹⁾ und 2005²⁾**

Maßnahmen	Minderungspotential in kt/a		Minderung der energiebedingten Emissionen stat. Quellen in %		Minderungskosten in Mio. DM	
	1987	2005	1987	2005	1987	2005
NOx-Minderung:						
SCR in Öff. Kraft- und Fernheizwerken	382	537	42	50	2200	3100
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
SCR in Industrie- feuerungen	110	114	12	11	990	1030
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Gesamt	492	651	54	61	3190	4130
NMVOC-Minderung:						
Anlagenwartung und Ab- deckung des Ölabschei- ders in Raffinerien	12	10	6	7	-0.4	-1.7
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Minderung von Tankla- geremissionen und Gas- pendelung bzw. Dämpfe- rückgewinnung bei Ben- zinumschlag	99	51	49	36	248	110
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Gesamt	111	61	55	43	248	108

¹⁾ Die Angaben beziehen sich auf die Emissionssituation im Jahr 1987.

²⁾ Die Angaben beziehen sich auf das Emissionsniveau, das sich im Jahr 2005 ergeben würde, wenn - ausgehend von der Emissionssituation in 1987 - keine Minderungsmaßnahmen durchgeführt würden.

1 Einleitung

Nach jüngsten Einschätzungen trägt troposphärisches Ozon zu etwa 8 % zum Treibhauseffekt in den achtziger Jahren dieses Jahrhunderts bei /ENQUETE-KOMMISSION, 1988/. Das spezifische Treibhauspotential (THP) eines Ozon-Moleküls in der Troposphäre ist dabei etwa 2000 mal größer als dies für ein CO₂-Molekül der Fall ist. Die derzeitige Konzentration in der Troposphäre wird mit 10 bis 30 ppb angegeben (geschätzter Mittelwert ca. 20 ppb). Aufgrund der kurzen Lebensdauer von Ozonmolekülen sind die troposphärischen Ozonkonzentrationen sehr starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. In Perioden photochemischen Smogs können regional 200 ppb überschritten werden. Die bodennahe Ozonkonzentration weist einen ausgeprägten Tages- und Jahresgang auf. In den mittleren Breiten der Nordhemisphäre treten in den Mittagsstunden während der Sommermonate die höchsten Konzentrationen auf. Die jährliche Zunahme von troposphärischem Ozon wird mit ungefähr 0.5 % angegeben.

Verursacht werden diese hohen Ozon-Konzentrationen in der Troposphäre nicht zuletzt durch die Freisetzung von sogenannten "Vorläufersubstanzen", u.a. auch aus anthropogenen Quellen. Zu diesen Vorläufersubstanzen zählen insbesondere Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO) und eine Vielzahl an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC). Wesentliches Thema des Studienschwerpunktes A.5.4 ist die Diskussion von Möglichkeiten, mit denen die energiebedingten, anthropogenen Emissionen dieser Spurengase in der Bundesrepublik Deutschland gemindert werden können.

Es ist darauf hinzuweisen, daß in bestimmten Emittentenbereichen, z. B. den Großfeuerungsanlagen, aufgrund von gesetzlich festgelegten Emissionsgrenzwerten verschiedene Maßnahmen zur Emissionsminderung inzwischen bereits verwirklicht sind, bzw. in absehbarer Zeit durchgeführt werden. Allerdings ist davon auszugehen, daß aus wirtschaftlichen Gründen das gesamte technisch mögliche Minderungspotential noch nicht ausgeschöpft wird.

Nach den bisherigen Einschätzungen trägt das N₂O bei einer mittleren Konzentration von 310 ppb zu ca. 4 % zum derzeitigen Treibhauseffekt bei. In /ENQUETE-KOMMISSION, 1988/ wird ein spezifischer THP-Wert von 150 angegeben. Der jährliche Konzentrationsanstieg wird mit 0.2 bis 0.3 % abgeschätzt. Hier soll der Frage nachgegangen werden, inwieweit bei der Energienutzung N₂O-Emissionen auftreten, und welche Größenordnung sie nach dem gegenwärtigen Wissensstand haben.

2 Abgrenzung des Themengebietes

2.1 Emittierte Stoffe

Bei den hier zu betrachtenden Spurengasen handelt es sich im wesentlichen um Verbindungen, die, werden sie aus natürlichen oder anthropogenen Quellen freigesetzt, in der Troposphäre unter Bildung von Ozon reagieren. Dazu gehören Stickoxide (im wesentlichen NO und NO₂, abgekürzt NO_x), flüchtige organische Verbindungen (VOC) sowie Kohlenmonoxid (CO).

Nicht betrachtet wird bei den flüchtigen organischen Verbindungen das Methan. Es trägt zwar ebenfalls zur Ozonbildung in der Troposphäre bei, die Klimarelevanz dieses Moleküls ist nach dem heutigen Kenntnisstand aber in erster Linie in seiner Fähigkeit zur Absorption von Strahlung im IR-Spektrum zu sehen. Aus diesem Grund wird das Methan an anderer Stelle behandelt. Zur Vermeidung von Fehlinterpretationen werden die übrigen flüchtigen organischen Verbindungen mit NMVOC bezeichnet (NM = Nichtmethanverbindungen).

Zusätzlich diskutiert wird bei den Stickoxiden das Distickstoffmonoxid (N₂O). N₂O ist unter den Bedingungen in der Troposphäre zwar äußerst stabil und trägt dort nicht zur Ozonbildung bei. Aufgrund der Absorption von IR-Strahlung sowie des Abbaus in der Stratosphäre unter Bildung von ozonzerstörenden NO_x-Radikalen beeinflussen diese Moleküle dennoch die klimatischen Verhältnisse.

2.2 Emittenten

Für die genannten Spurenstoffe werden nur stationäre Emissionsquellen berücksichtigt, welche der direkten Nutzung fossiler Energieträger bzw. der Bereitstellung dieser Energieträger zuzuordnen sind. Mobile Quellen, insbesondere Abgasemissionen des Straßenverkehrs, werden nicht im Rahmen dieses Forschungsschwerpunktes, sondern im Studienkomplex A.1 untersucht.

2.3 Bearbeitungsumfang

Für die erwähnten Ozon-Vorläufersubstanzen soll zunächst die Emissionssituation in der Bundesrepublik Deutschland dargestellt werden.

Für die maßgeblichen Quellen aus dem eingangs abgegrenzten Emittentenbereich sollen daraufhin Maßnahmen zur Emissionsminderung diskutiert werden. Die in vielen Fällen denkbare Substitution von Energieträgern, die mit vergleichsweise hohen spezifischen Emissionen behaftet sind, wird dabei auftragsgemäß ausgeklammert.

Soweit genügend Informationen zur Verfügung stehen, werden außerdem das technisch realisierbare Minderungspotential und die Minderungskosten für ausgewählte Maßnahmen in der Bundesrepublik Deutschland abgeschätzt. Ausgegangen wird dabei zum einen von der Emissionssituation im Jahr 1987, und zum anderen von dem Emissionsniveau, das sich im Jahr 2005 ergeben würde, wenn - ausgehend von der Emissionssituation in 1987 - keine Maßnahmen zur Emissionsminderung durchgeführt würden.

Schließlich soll, zumindest in grober qualitativer Form, diskutiert werden, inwieweit durch mögliche Emissionsminderungen von Vorläufersubstanzen eine Veränderung der troposphärischen Ozonkonzentrationen in der Bundesrepublik Deutschland zu erwarten ist.

Daneben wird der Frage nachgegangen, ob bestimmte Feuerungsanlagen und NO_x-Minderungstechnologien nennenswerte N₂O-Emissionen verursachen.

3 Derzeitige Emissionen von NO_x, CO und NMVOC bzw. VOC in der Bundesrepublik Deutschland

Die Emissionssituation für die Spurenstoffe NO_x, CO und VOC in der Bundesrepublik Deutschland für das Jahr 1986 ist in Tabelle 3.1 wiedergegeben /UBA, 1989/. Die VOC-Emissionen umfassen dabei sowohl Methan als auch NMVOC.

Tabelle 3.1

Anthropogene Emissionen von NO_x, CO und VOC in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1986 in kt/a /UBA, 1989/

Sektor	NO _x	CO	VOC ¹⁾
GESAMT	2965	8915	2460
Energieverbrauch	2940	7865	1400
Kraft- und Fernheizwerke	730	45	13
Übriger Umwandlungsbereich	60	30	3
Verarbeitendes Gewerbe	210	260	20
Kleinverbraucher	50	140	12
Haushalte	90	810	75
Kraftstoff-Verteilung			100
Verkehr	1800	6580	1175
- Abgase PKW	1050	6150	730
- Tankatmung PKW			260
- Abgase LKW	500	150	110
- sonst. Verkehr	250	280	75
Prozesse	25	1050	1060
Herst. v. Nahrungsmitteln			15
Chemische Industrie			30
Raffinerien			35
Herst. v. sonst. Produkten	25	1050	30
Lösemittelanwendung			950

¹⁾ einschließlich Methan

Wie aus der Tabelle zu ersehen ist, kommt dem Kraftfahrzeugverkehr bei der Freisetzung aller drei Schadstoffe die grösste Bedeutung zu. Als weitere wichtige VOC-Quelle ist die

Anwendung von Lösemitteln bzw. lösemittelhaltigen Produkten zu nennen. Darüber hinaus werden größere Mengen an NO_x in den Rauchgasen von Kraft- und Fernheizwerken freigesetzt.

Um einen Eindruck über die Bedeutung der in dieser Studie zur Diskussion stehenden Emittentenbereiche zu vermitteln, sind die oben aufgeführten Zahlenwerte in Tabelle 3.2 in aggregierter Form nochmals dargestellt.

Tabelle 3.2

**NO_x-, CO- und VOC-Emissionen verschiedener Emittentenbereiche in der
Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1986 /UBA, 1989/**

Emittentenbereich	VOC ¹⁾		CO		NO _x	
	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%
1 Gesamtemission	2460	100	8915	100	2965	100
2 Stationäre u. mobile Quellen						
2a Energienutzung allgemein	1435	59	7865	88	2940	99
2b nur Verbrennung	1040	42	7865	88	2940	99
3 Stationäre Quellen						
3a Energienutzung allgemein	260	11	1285	14	1140	39
3b nur Verbrennung	125	5	1285	14	1140	39

¹⁾ einschließlich Methan

In Zeile 1 sind die Gesamtemissionen der jeweiligen Schadstoffe aus allen anthropogenen Quellen aufgeführt.

In Zeile 2a sind die Emissionen zusammengestellt, die durch die Energienutzung allgemein in stationären und mobilen Quellen verursacht werden. Dabei sind sowohl Emissionen aus Verbrennungsprozessen als auch Emissionen, die bei der Bereitstellung bzw. Handhabung der Energieträger entstehen, berücksichtigt. Zur letzten Gruppe zählen dabei die Verdunstung von Kraftstoff bei dessen Lagerung und Umschlag (vom Raffinerieabsatz bis hin zur Fahrzeugbetankung an den Straßentankstellen), die Verdunstung von Kraftstoff aus den Tanks und kraftstoffführenden Leitungen von Kraftfahr-

zeugen sowie die Prozeßemissionen in Raffinerien. Im Gegensatz dazu sind in Zeile 2b allein die Emissionen aus Verbrennungsprozessen bei stationären und mobilen Quellen berücksichtigt.

In ähnlicher Aufschlüsselung sind in den Zeilen 3a und 3b ausschließlich die energiebedingten Emissionen stationärer Quellen aufgeführt.

In Zeile 3a sind somit diejenigen Quellen enthalten, die in diesem Studienschwerpunkt zu diskutieren sind. Bezogen auf das Jahr 1986 handelt es sich bei den VOC-Emissionen um ca. 11 %, bei den CO-Emissionen um ca. 14 % und bei den NO_x-Emissionen um ca. 39 % der jeweiligen Gesamtemissionen.

4 N₂O-Emissionen bei Feuerungen und NO_x-Minderungstechnologien

Zu den Hauptquellen des N₂O zählen nach heutiger Einschätzung natürliche Prozesse in Böden, wobei Nitrate und Ammoniak durch denitrifizierende bzw. nitrifizierende Bakterien teilweise umgewandelt werden. Als wesentliche anthropogene Quellen werden die Kultivierung natürlicher Böden und die Einbringung von mineralischen Stickstoffdüngern in landwirtschaftlich genutzte Böden angesehen. Tabelle 4.1 gibt eine Abschätzung der weltweiten N₂O-Emissionen aus natürlichen und anthropogenen Quellen sowie der N₂O-Senken wieder /WUEBBLES ET AL., 1988/. Nach dieser Abschätzung spielt auch die Verbrennung fossiler Energieträger eine nicht unerhebliche Rolle. Neuere Abschätzungen gehen aber davon aus, daß aus der Verbrennung fossiler Energieträger weltweit lediglich etwa 3-4 Mio. t N₂O/a freigesetzt werden /EPA, 1989/. Literaturangaben über die N₂O-Emissionen in der Bundesrepublik Deutschland stehen nicht zur Verfügung.

Tabelle 4.1

Abschätzung des globalen N₂O-Kreislaufes /WUEBBLES ET AL., 1988/

Quelle bzw. Senke	Mio. t/a	%
Natürliche Quellen	12 - 40	-55
Natürliche Böden	9 - 31	-42
Ozeane und Meeresarme	3 - 9	-13
Anthropogene Quellen	16 - 28	-45
Verbrennung fossiler Energieträger	9 - 16	-26
Kultivierung natürlicher Böden	3 - 6	- 9
Düngung von Böden	2 - 3	- 5
Verbrennung von Biomasse	2 - 3	- 5
Summe der Quellen	28 - 69	100
Wesentliche Senken	24 - 42	
Photolyse in der Stratosphäre und Reaktion mit Sauerstoff	24 - 42	

Im folgenden soll der Frage nachgegangen werden, ob bzw. in welchem Umfang N_2O -Spurengase aus stationären Feuerungsanlagen freigesetzt werden. Darüber hinaus gilt es nach Möglichkeit zu klären, inwieweit derartige Emissionen aus Feuerungsanlagen durch primäre und sekundäre NO_x -Minderungstechnologien beeinflusst werden.

Erste Untersuchungen, die an Versuchsfeuerungen und Großfeuerungsanlagen in den USA durchgeführt wurden, deuteten darauf hin, daß bis zu 30 % der NO_x -Emissionen als N_2O freigesetzt werden /EPA, 1987/. An einzelnen Anlagen wurden dabei N_2O -Konzentrationen bis zu 200 ppm ermittelt. In Zusammenfassung der bis dahin in den USA zur Verfügung stehenden Meßergebnisse, die in Abb. 4.1 unter anderem dargestellt sind, wurde die Vermutung aufgestellt, daß eine lineare Korrelation zwischen N_2O -Emission und der gesamten NO_x -Emission besteht.

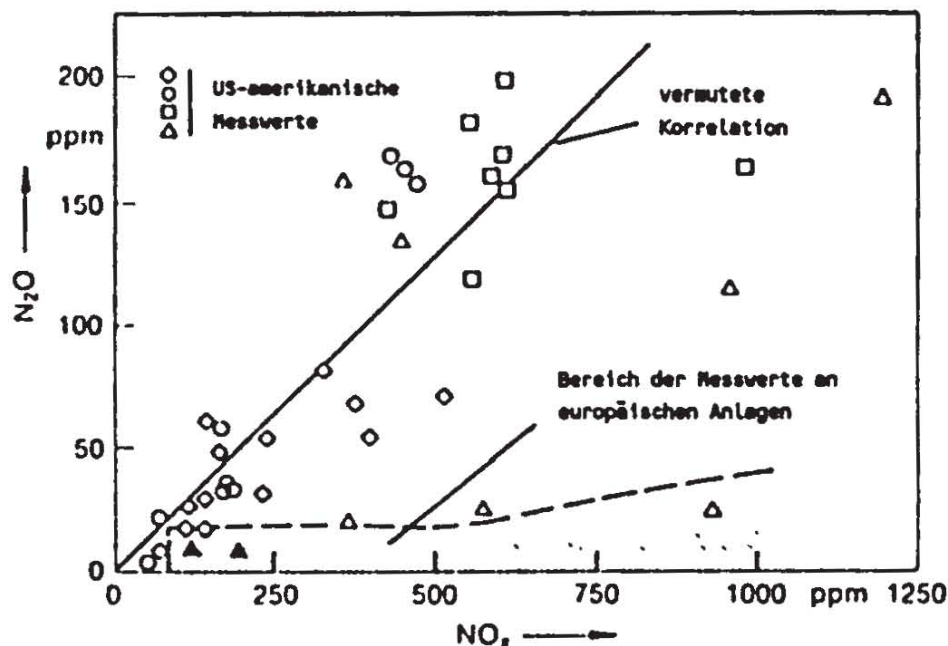


Abb. 4.1: N_2O -Emissionen als Anteil des NO_x , Betriebsmessungen und Messungen an Versuchs- und Großfeuerungsanlagen in den USA /EPA, 1987/, ergänzt durch Ergebnisse europäischer Anlagen /JACOBS ET AL., 1988/

Das Auftreten derart hoher N_2O -Emissionen aus Feuerungsanlagen kann durch neuere europäische Meßdaten nicht bestätigt werden. Dies wird ebenfalls in Abb. 4.1 verdeutlicht /JACOBS ET AL., 1988/. Bei öl- und gasbefeuerten, halbtechnischen Verbrennungsan-

lagen betragen die N_2O -Emissionen ca. 5 ppm. N_2O -Meßwerte für Braunkohlenfeuerungen lagen mit 2 - 10 ppm in derselben Größenordnung. Bei Steinkohlenfeuerungen wurden vereinzelt Höchstwerte bis maximal 40 ppm registriert. Noch höhere Einzelwerte ergaben sich lediglich bei Wirbelschichtfeuerungen, die bei den erwähnten Untersuchungen in den USA offensichtlich nicht betrachtet wurden.

In /JACOBS ET AL., 1988/ wird die Vermutung geäußert, daß die gravierenden Abweichungen zwischen den Meßergebnissen aus den USA und Europa in erster Linie auf unterschiedliche Probenahme- und Analysetechniken zurückzuführen sind. Während in den USA Rauchgasproben aus Feuerungen zunächst gesammelt und erst danach analysiert wurden, basieren die europäischen Konzentrationsangaben auf Direktmessungen in den Rauchgasen.

Weitergehende Untersuchungen in den USA haben inzwischen gezeigt, daß die zunächst veröffentlichten hohen N_2O -Werte vor allem auf Nachreaktionen von Stickoxiden in den Sammelbehältern in Anwesenheit von SO_2 und Wasser im Probegas zurückzuführen sind /LINAK ET AL., 1988/ /MUZIO ET AL., 1988/. Direktmessungen, die an Feuerungsanlagen mit unterschiedlichsten Feuerungswärmeleistungen (29 kW - 790 MW) und Energieträgern (Kohle, Öl und Gas) durchgeführt wurden, ergaben durchweg N_2O -Konzentrationen von weniger als 10 ppm. In vielen Fällen lagen die Meßwerte mit deutlich weniger als 5 ppm sogar im Bereich der Nachweisgrenze der Analysen. Wirbelschichtfeuerungen wurden allerdings nicht untersucht.

Wie in /LINAK ET AL., 1988/ weiter ausgeführt wird, erhöhen sich zwar die N_2O -Emissionen von Feuerungsanlagen, die mit primären Maßnahmen zur NO_x -Minderung wie z.B. Stufung der Verbrennungsluft oder Abgasrückführung ausgestattet sind, um einen meßbaren Betrag. Weitreichende Konsequenzen ergeben sich durch diese minimale Erhöhung jedoch kaum.

Beim Einsatz sekundärer Maßnahmen zur NO_x -Minderung, insbesondere von SCR-Anlagen, treten nach /JACOBS ET AL., 1988/ keine höheren, eher sogar niedrigere N_2O -Konzentrationen in den Rauchgasen auf, als dies bei Feuerungsanlagen ohne NO_x -Minderungsmaßnahmen der Fall ist.

Die exakte Ermittlung der von stationären Feuerungsanlagen in der Bundesrepublik ausgehenden N_2O -Emissionen ist auf der Basis der bisher verfügbaren Daten kaum möglich. In /EPA, 1989/ werden neuere US-amerikanische N_2O -Emissionsfaktoren zitiert,

die je nach Feuerungstyp und Brennstoffart zwischen 2 und 14 kg/TJ Brennstoffeinsatz bzw. ca 2.5 und 20 ppm variieren. Für Wirbelschichtfeuerungen werden 14 kg/TJ angegeben. Geht man in einer sehr groben Abschätzung von den hier erwähnten Emissionsfaktoren aus, wobei festzustellen ist, daß diese nicht in dem für die Berechnung der anderen Schadstoffemissionen zugrundegelegten Detaillierungsgrad zur Verfügung stehen, so liegen die N₂O-Emissionen aus stationären Feuerungen in der Bundesrepublik Deutschland in der Größenordnung von 68 000 t/a. Bezogen auf die in /EPA, 1989/ abgeschätzten globalen N₂O-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger in Höhe von 3-4 Mio. t/a entspricht dies einem Anteil von 1.7-2.3 %.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß nach den jüngsten Einschätzungen den N₂O-Emissionen aus stationären Feuerungsanlagen im Vergleich zu den N₂O-Freisetzungen aus anderen anthropogenen bzw. aus natürlichen Quellen keine wesentliche Bedeutung zukommt. Dies gilt auch für Feuerungsanlagen, die mit NO_x-mindernden Maßnahmen ausgestattet sind.

5 Möglichkeiten zur Minderung von energiebedingten NO_x-, CO- und NMVOC-Emissionen aus stationären Quellen

Die zeitlichen Rahmenbedingungen dieses Studienprogramms lassen eine lückenlose Darstellung und Analyse aller derzeit möglichen Maßnahmen zur Minderung von energiebedingten NO_x-, CO- und NMVOC-Emissionen aus stationären Quellen nicht zu. Es ist deshalb eine Auswahl zu treffen, welche die wesentlichen Emissionsquellen umfaßt. In Tabelle 5.1 sind die zur Auswahl stehenden Emittentenbereiche aufgeführt. Die für die Jahre 1987 und 2005 abgeschätzten Emissionen basieren auf den in /GEIGER ET AL., 1989/ bzw. /PROGNOS, 1987/ angegebenen Energieverbrauchsdaten sowie auf den in /ÖKO-INSTITUT, 1989/ zusammengestellten (direkten) Emissionsfaktoren für das Basisjahr 1987.

Bei den für das Jahr 2005 ausgewiesenen Emissionsdaten wird also unterstellt, daß ausgehend von der Situation in 1987 keine weiteren Minderungsmaßnahmen durchgeführt werden, d.h. die Emissionsfaktoren für 1987 weiterhin gültig sind. Es ist an dieser Stelle ausdrücklich darauf hinzuweisen, daß seit 1987 in bestimmten Emittentenbereichen Maßnahmen zur Emissionsminderung bereits verwirklicht wurden, bzw. in absehbarer Zeit durchgeführt werden. Die in Tabelle 5.1 für das Jahr 2005 angegebenen Emissionen stellen also lediglich Bezugswerte dar, anhand deren die technischen Potentiale ausgewählter Emissionsminderungsmaßnahmen aufgezeigt werden sollen.

Abweichungen zwischen den in Tabelle 5.1 für die einzelnen Emittentenbereiche ausgewiesenen Emissionen im Bezugsjahr 1987 und den Angaben in den Tabellen 3.1 und 3.2 für das Jahr 1986 sind nicht nur auf den fortschreitenden Stand der Emissionsminderung, sondern auch auf die zum Teil unterschiedliche Abgrenzung der Emittentenbereiche zurückzuführen.

Zieht man für die genannten Schadstoffe diejenigen Emissionsquellen in Betracht, die 1987 mit mehr als 10 % an den energiebedingten Gesamtemissionen stationärer Quellen beteiligt sind, ergibt sich folgende Auswahl:

- Maßnahmen zur NO_x-Minderung werden für öffentliche Kraft- und Fernheizwerke sowie für industrielle Feuerungsanlagen diskutiert. Diese Quellen verursachen im Bezugsjahr 1987 ca. 85 % der energiebedingten Gesamtemissionen stationärer Quellen.

- Maßnahmen zur CO-Minderung werden für Feuerungsanlagen in Haushalten diskutiert. Da die Feuerungsanlagen von Kleinverbrauchern vielfach den Haushaltsfeuerungen gleichen, wird der Kleinverbraucherbereich in die Betrachtungen einbezogen. Insgesamt tragen diese Quellen im Jahr 1987 zu etwa 89 % zu den energiebedingten Gesamtemissionen stationärer Quellen bei.
- Maßnahmen zur NMVOC-Minderung werden ebenfalls für Feuerungsanlagen in Haushalten und von Kleinverbrauchern sowie zusätzlich für Raffinerieprozesse und für die Verteilung von Kraftstoffen diskutiert. Damit werden ca. 91 % der energiebedingten NMVOC-Gesamtemissionen stationärer Quellen im Jahr 1987 berücksichtigt.

Für die genannten Bereiche sollen in den nächsten Abschnitten Möglichkeiten zur Emissionsminderung dargestellt werden. Auch hier kann nicht auf alle verfügbaren Verfahren bzw. Verfahrensmodifikationen eingegangen, und damit kein Anspruch auf Vollständigkeit erhoben werden. In diesem Zusammenhang sei u.a. auf /WUI, 1986/ /SCHROD ET AL., 1986/ /WEBER ET AL., 1985/ /Kolar, 1986/ /KREMER, 1986/ verwiesen.

Die getroffene Auswahl besagt nicht, daß für die übrigen Emittentenbereiche keine Emissionsminderungsmaßnahmen verfügbar sind. Insbesondere die NO_x-Emissionen von Haushaltsfeuerungen, die zu etwa 10 % an den Gesamtemissionen beteiligt sind, können durch verschiedene Maßnahmen gemindert werden. In Anbetracht des zeitlichen Rahmens der Studie muß auf eine explizite Darstellung weiterer Maßnahmen allerdings verzichtet werden.

Tabelle 5.1

**Energiebedingte Emissionen von NO_x, CO und NMVOC
in der Bundesrepublik Deutschland
Bezugsjahre 1987¹⁾ und 2005²⁾**

Emittentenbereich	NO _x				CO				NMVOC			
	1987		2005		1987		2005		1987		2005	
	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%	kt/a	%
Feuerungen:												
Öff. Kraft- und Fernheizwerke	475	52	667	62	41	3	61	7	5	2	7	5
Industrie	304	33	316	30	97	8	101	11	14	7	15	11
Kleinverbraucher	42	5	24	2	130	10	94	10	6	3	5	4
Haushalte	91	10	67	6	1020	79	665	72	50	24	41	29
Raffinerie-Prozesse									22	11	18	13
Benzinverteilung									108	53	56	39
Gesamt	912	100	1074	100	1288	100	921	100	205	100	142	100

¹⁾ Die Angaben beziehen sich auf die Emissionssituation im Jahr 1987.

²⁾ Die Angaben beziehen sich auf das Emissionsniveau, das sich im Jahr 2005 ergeben würde, wenn - ausgehend von der Emissionssituation in 1987 - keine Minderungsmaßnahmen durchgeführt würden.

5.1 Möglichkeiten zur Minderung von NO_x-Emissionen aus öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken

Maßnahmen zur Minderung von NO_x-Emissionen, aber auch von Emissionen anderer Luftschadstoffe, lassen sich grundsätzlich in zwei Kategorien einteilen. Zum einen sind

dies Primärmaßnahmen, welche die Entstehung von Schadstoffen bei der Verbrennung vermeiden. Zum anderen sind dies Sekundärmaßnahmen, welche auf eine Verringerung von Schadstoffen im Rauchgas abzielen.

Die hier zu diskutierenden, mit fossilen Energieträgern befeuerten öffentlichen Kraft- und Fernheizwerke haben in der Regel eine Feuerungswärmeleistung größer 50 MW_n (bzw. 100 MW_n), und unterliegen somit den Bestimmungen der Großfeuerungsanlagen-Verordnung /GFAVO, 1983/ /UMK, 1984/, in welcher die künftig einzuhaltenden Grenzwerte für Neu- und Altanlagen festgelegt sind. Im Bezugsjahr 1987 halten bereits einige Großfeuerungsanlagen die geforderten NO_x-Grenzwerte ein /VDEW, 1988/. Für zahlreiche weitere Großfeuerungsanlagen werden Einrichtungen zur Stickoxidminderung derzeit gebaut bzw. befinden sich in der Planung.

5.1.1 Primärmaßnahmen

Die NO_x-Bildung läßt sich im wesentlichen durch folgende feuerungstechnischen Maßnahmen reduzieren:

- Reduzierung der Flammentemperatur bzw. -temperaturspitzen
- Reduzierung des Luftüberschusses in der Verbrennungszone
- Reduzierung der Verweilzeit des Brennstoff/Luft-Gemisches im Bereich hoher Temperaturen

5.1.1.1 Rauchgasrezirkulation

Die Rückführung eines bestimmten Anteils der Rauchgase in die Verbrennungszone bewirkt einerseits eine Verringerung der Sauerstoffkonzentration und andererseits die Reduzierung der Flammentemperatur. Nach /WUI, 1986/ beträgt der Minderungsgrad dieser Maßnahme bei Steinkohlefeuerungen bis zu 25 %, bei Schwerölfeuerungen bis zu 30 % und bei Gasfeuerungen maximal 33 %.

5.1.1.2 Stufenverbrennung

Bei der mehrstufigen Verbrennung werden die einzelnen Brenner mit unterschiedlichen Brennstoff/Luft-Verhältnissen betrieben.

In der zweistufigen Verbrennung wird die untere Brennerreihe unterstöchiometrisch gefahren. Der Gesamtluftbedarf für den vollständigen Ausbrand wird in der oberen Brennerreihe durch eine erhöhte Luftzufuhr gewährleistet. Der Minderungsgrad dieser Maßnahme wird in /WUI, 1986/ mit bis zu 40 % bei Steinkohlefeuerungen, bis zu 30 % bei Schwerölfeuerungen und maximal 35 % bei Gasfeuerungen angegeben.

Bei der dreistufigen Verbrennung werden die mittlere Brennerreihe unterstöchiometrisch, und die beiden anderen Brennerreihen überstöchiometrisch betrieben. Hierdurch können noch höhere NO_x-Minderungsgrade erzielt werden.

5.1.1.3 NO_x-arme Brenner

NO_x-arme Brenner verringern die NO_x-Entstehung in den einzelnen Brennerflammen nach den gleichen Prinzipien, wie sie in Kap. 5.1.1 bereits erwähnt wurden. Bei der mehrstufigen Anordnung von NO_x-armen Brennern werden bei Steinkohle- und Gasfeuerungen bis zu 50 %, und bei Schwerölfeuerungen bis zu 60 % weniger NO_x freigesetzt /WUI, 1986/. Bei einstufiger Anordnung kann die NO_x-Minderung je nach eingesetzter Brennstoffart zwischen 30 und 50 % betragen.

5.1.1.4 Kombinierte Primärmaßnahmen

Durch Kombination der hier aufgeführten feuerungstechnischen Minderungsmaßnahmen können nach /WUI, 1986/ die NO_x-Emissionen bei der Verbrennung fossiler Energieträger je nach den Rahmenbedingungen um bis zu 70 % gemindert werden.

5.1.2 Sekundärmaßnahmen

Wie eingangs in Kapitel 5.1 erwähnt, werden in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 1987 schon einige Großfeuerungsanlagen mit Sekundärmaßnahmen zur NO_x-Minderung

betrieben. Zahlreiche weitere DeNO_x-Anlagen befinden sich im Bau bzw. in der Planung /VDEW, 1988/. Von mehreren, grundsätzlich verfügbaren Technologien hat sich, zumindest bei Steinkohlenfeuerungen, bisher das SCR-Verfahren weitgehend durchgesetzt.

5.1.2.1 SCR-Verfahren

Das Verfahrensprinzip beruht auf der Reduktion von NO_x mit Ammoniak (NH₃) unter Bildung von molekularem Stickstoff und Wasser nach folgenden Reaktionsgleichungen:



Die Reduktion erfolgt bei Temperaturen zwischen 320 und 450 °C an Metallkatalysatoren (Ti, Fe, V, u.a.). Je m³ Katalysatorvolumen (Trägermaterial eingerechnet) können nach /WUI 1986/ bis zu 40 000 m³ an Rauchgasen in einer Stunde gereinigt werden. Ammoniak wird in einem NH₃/NO_x-Molverhältnis zwischen 0,4 und 1 in den Rauchgasstrom eingedüst.

Bei der Anordnung der Entstickungsanlage im Rauchgasstrang sind drei Schaltungsvarianten üblich. Dies sind:

- die "High-Dust" Entstickungsvariante (die DeNO_x-Anlage befindet sich direkt hinter dem Kessel)
- die "Low-Dust" Entstickungsvariante (E-Filter liegt zwischen Kessel und DeNO_x-Anlage)
- die "Reingas" Entstickungsvariante (DeNO_x-Anlage liegt hinter der Rauchgasentschwefelungsanlage am "kalten Ende" des Rauchgasstrangs, vor DeNO_x-Anlage erfolgt Wiederaufheizung der Rauchgase)

Der erreichbare NO_x-Minderungsgrad beträgt für SCR-Anlagen ca. 85 %.

5.1.2.2 SNCR-Verfahren

Bei der selektiven, nicht katalytischen Reduktion wird Ammoniak nach der Ausbrandzone in den Rauchgasstrom eingedüst und in Gegenwart von Sauerstoff bei Temperaturen zwischen 800 und 1000 °C mit Stickoxiden umgesetzt. Die selektive Umsetzung von NO_x ist nur in diesem Temperaturbereich gewährleistet, sodaß Temperaturschwankungen, z.B. durch Laständerungen verursacht, den Minderungsgrad beeinflussen können. In /WUI, 1986/ wird der Minderungsgrad mit bis zu 50 % angegeben. Außerdem ist, im Vergleich zum SCR-Verfahren, mit einem höheren NH₃-Schlupf zu rechnen.

5.2 Möglichkeiten zur Minderung von NO_x-Emissionen aus industriellen Feuerungsanlagen

Der überwiegende Teil der in der Industrie genutzten fossilen Energieträger wird in genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen verbrannt, die entweder den Bestimmungen der TA Luft (1 MW_n bis 50 MW_n bzw. 100 MW_n) oder der Großfeuerungsanlagenverordnung (größer 50 MW_n bzw. 100 MW_n) unterliegen.

Die Primär- und Sekundärmaßnahmen, welche im vorangegangenen Kapitel 5.1 für öffentliche Kraft- und Fernheizwerke beschrieben wurden, eignen sich vielfach auch für industrielle Feuerungsanlagen. Einschränkend ist jedoch anzumerken, daß bei Prozeßfeuerungen, die in der Industrie weit verbreitet sind, nur sehr bedingt Minderungsmaßnahmen durchgeführt werden können. Hierzu sei auf Kapitel 5.2.3 verwiesen.

5.2.1 Primärmaßnahmen

Unter der zuvor genannten Einschränkung können die in Kapitel 5.1.1 dargestellten Primärmaßnahmen vielfach auch in industriellen Feuerungsanlagen eingesetzt werden. Eine weitere Ausnahme stellen zusätzlich Rostfeuerungen für Festbrennstoffe dar, die in der Industrie breite Anwendung finden. Hier sind die diskutierten Primärmaßnahmen ebenfalls nur bedingt durchführbar.

Darüber hinaus kann bei Kohle- und Ölfeuerungen unter ca. 20 MW_n das ACOM-Verfahren zur NO_x-Minderung eingesetzt werden /BOYSEN ET AL. in Vorb./, wobei die Verbrennungsluft vor dem Eintritt in den Brenner durch einen Elektrolyten geleitet wird.

Nach den vorliegenden Informationen kann durch diese Maßnahme eine Verringerung der NO_x-Konzentration im Rauchgas um ungefähr 35 % erreicht werden.

Allgemein wird davon ausgegangen, daß Feuerungsanlagen, die in den Geltungsbereich der TA Luft fallen, die geforderten NO_x-Grenzwerte in der Regel allein durch den Einsatz von Primärmaßnahmen erfüllen.

5.2.2 Sekundärmaßnahmen

Neben den dargestellten Primärmaßnahmen kommen für Industriefeuerungen ebenfalls eine Reihe von Sekundärmaßnahmen in Frage. Allerdings sind auch hier die Prozeßfeuerungen in der Regel ausgenommen.

5.2.2.1 SCR-Verfahren

Im Grundsatz kann das SCR-Verfahren, welches sich bei Großfeuerungsanlagen in öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken in der Bundesrepublik Deutschland offenbar durchsetzt, auch für Anlagen der industriellen Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt werden.

5.2.2.2 Harnstoff-Lanze-Verfahren

Das Harnstoff-Lanze-Verfahren arbeitet nach dem Prinzip der selektiven nicht-katalytischen Reduktion (SNCR). Als NO_x-reduzierendes Agens wird Harnstoff in den Rauchgasstrom eingedüst. Nach /BOYSEN ET AL., in Vorb./ ist dieses Verfahren bisher nur an Feuerungen für schweres Heizöl im Leistungsbereich zwischen 5 und 20 MW_e erprobt. Die Grenzwerte der TA Luft können mit diesem Verfahren um ca. 20 % unterschritten werden.

5.2.2.3 NO_xOUT-Verfahren

Dieses Verfahren ist ebenfalls den SNCR-Verfahren zuzuordnen. Auch hier wird Harnstoff zur Reduktion von NO_x eingedüst. Das NO_xOUT-Verfahren eignet sich für alle

fossilen Brennstoffe. Es kann bei Feuerungsanlagen im Leistungsbereich von mehr als 60 bis 70 MW_e eingesetzt werden. Der erreichbare NO_x-Minderungsgrad liegt in der Größenordnung von 50 %.

5.2.2.4 Aktivkoksverfahren

Beim Aktivkoks-Verfahren wird, wie beim SCR-Verfahren, Ammoniak als Reduktionsmittel eingesetzt. Die Reduktion von NO_x erfolgt an Aktivkoks-Katalysatoren. Das Minderungsverfahren kann für alle Kesselfeuerungen mit einer Leistung von 1 bis 100 MW eingesetzt werden, wobei der erreichbare NO_x-Minderungsgrad bis zu 80 % beträgt /BOYSEN ET AL., in Vorb./.

5.2.3 NO_x-Emissionsminderung bei Prozeßfeuerungen

Bei Prozeßfeuerungen treten in der Regel Rahmenbedingungen auf, die den Einsatz der hier beschriebenen NO_x-Minderungsmaßnahmen nicht ohne weiteres zulassen. Beispielhaft sei an dieser Stelle die Zementherstellung angeführt. Zum Brennen des Klinkers sind in den Zementöfen hohe Temperaturen erforderlich, wodurch auch hohe spezifische NO_x-Emissionen verursacht werden. Bedingt durch die hohen Temperaturen und den hohen Staubgehalt in den Rauchgasen kann z.B. das SCR-Verfahren wegen einer möglichen Katalysatorschädigung nicht eingesetzt werden. Ob andere Verfahren - unter Umständen in modifizierter Form - geeignet sind, wird gegenwärtig untersucht.

5.3 Möglichkeiten zur Minderung von CO- und NMVOC-Emissionen aus Feuerungsanlagen von Kleinverbrauchern und Haushalten

Feuerungsanlagen, die von Kleinverbrauchern und in Haushalten betrieben werden, weisen oftmals eine vergleichsweise niedrige Feuerungswärmeleistung auf. Bei den Konstruktionsmerkmalen von Feuerungsanlagen in diesem Leistungsbereich stehen vor allem einfache Bauweise, Handhabung und Wartung im Vordergrund. Die spezifischen Emissionen an CO und NMVOC, also Produkten der unvollständigen Verbrennung, sind bei diesen Anlagen im allgemeinen deutlich höher als z.B. bei Großfeuerungsanlagen.

Darüber hinaus können Primärmaßnahmen zur NO_x-Minderung, die in den letzten Jahren zunehmend auch in diesem Leistungsbereich eingesetzt werden, unter Umständen zu einer weiteren Erhöhung der CO- und NMVOC-Emissionen führen.

In den nachfolgenden Ausführungen werden die Feuerungsanlagen von Kleinverbrauchern und Haushalten lediglich grob differenziert. Es ist darauf hinzuweisen, daß der maßgebliche Anteil an den CO- und VOC-Emissionen aus der Nutzung fester Brennstoffe, insbesondere Kohle und Holz, entstammt.

5.3.1 Ölfeuerungen

Die gebräuchlichsten Ölbrenner lassen sich folgendermaßen einteilen und charakterisieren /IVD, 1988/:

- Verdampfungsbrenner (Leistungsbereich ca. 7 - 50 kW_n; haben in den letzten Jahren an Bedeutung verloren, Altanlagen sind aber immer noch weit verbreitet)
- Zerstäuberbrenner (vor allem Druckzerstäuber mit gelber Flamme weit verbreitet; Leistungsbereich ca. 11 - 1000 kW_n)
- Vergasungsbrenner (auch Blaubrenner genannt, haben in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen)

5.3.1.1 Emissionsminderung bei Leistungsregelung

Hohe Emissionen an CO und NMVOC treten insbesondere bei instationären Verbrennungsprozessen (An- und Abschaltvorgänge) sowie bei Teillastbetrieb auf.

Eine hohe Zahl an An- und Abschaltvorgängen erfolgt bei einstufig ausgeführten Anlagen, bei denen Öl- und Luftmenge nicht variiert werden können. Die Anpassung an den aktuellen Wärmebedarf erfolgt durch An- bzw. Abschalten der Feuerungsanlagen mit unterschiedlich langen Phasen des Dauerbetriebs. Während eines Jahres sind mehrere 10 000 Schaltzyklen für eine Anlage durchaus üblich. Nach Schätzungen in /IVD, 1988/ werden ungefähr 50 % der CO- und NMVOC-Emissionen bei diesen Schaltvorgängen verursacht.

Durch eine bessere Anpassung der Nennwärmeleistung dieser Anlagen an den tatsächlichen Wärmebedarf (die meisten Feuerungsanlagen sind nach /IVD, 1988/ stark überdimensioniert) könnte eine bessere Auslastung und damit eine deutliche Verringerung der emissionsrelevanten Schaltzyklen erreicht werden.

Eine Verlängerung der Dauerbetriebsphasen kann außerdem in vielen Fällen durch den Einsatz von entsprechend dimensionierten Puffer-Wärmespeichern erzielt werden.

Bei zweistufig ausgeführten Feuerungsanlagen können beim Umschalten von Klein- auf Großlast und umgekehrt ebenfalls CO- und NMVOC-Emissionsspitzen durch kurzzeitigen Luftmangelbetrieb auftreten. Durch optimale Anpassung der Klein- und Großlastbereiche an die vorwiegend abgefragte Leistung kann die Zahl der Umschaltvorgänge minimiert werden.

Stufenlos regelbare Ölfeuerungen weisen bei Teillastbetrieb im allgemeinen ebenfalls höhere spezifische CO- und VOC- bzw. NMVOC-Emissionen als bei Vollastbetrieb auf. Wie Tabelle 5.2 am Beispiel eines Ölverdampferbrenners zeigt, können die Unterschiede bis zu zwei Zehnerpotenzen betragen.

Tabelle 5.2

**Emissionen eines Ölverdampferbrenners in verschiedenen
Lastbereichen in kg/TJ /IVD, 1988/**

Lastbereich	CO	VOC
schwach	110	12
mittel	53	1
voll	<0.3	2

Durch konstruktive Maßnahmen, wie z.B. bei Ölzerstäuberbrennern die Anpassung der Stauscheibenposition an die momentane Last, kann dem entgegengewirkt werden.

5.3.1.2 Einsatz von Vergasungsbrennern

Erfolgt die Verbrennung fossiler Energieträger unter Luftmangel, d.h. ist nicht ausreichend Sauerstoff vorhanden, treten erhöhte Emissionen von Produkten der unvollständigen Verbrennung auf. Im allgemeinen werden Feuerungsanlagen dieser Größenordnung zwar mit einem mehr oder minder großen Luftüberschuß gefahren, bei schlechter Brennereinstellung und/oder ungenügender Wartung kann jedoch zumindest partieller Luftmangel auftreten.

Ölbrenner, die nach dem Vergasungsprinzip arbeiten (Blaubrenner), setzen selbst im Luftmangelbereich nur relativ geringe Kohlenwasserstoff-Emissionen frei. Lediglich die CO-Emissionen nehmen zu. Generell kann mit diesen Vergasungsbrennern der Luftüberschuß reduziert, und damit der feuerungstechnische Wirkungsgrad gesteigert werden. Möglich ist dies durch die verbesserte Durchmischung von Brennstoff und Verbrennungsluft. Angeboten werden diese Brenner bisher allerdings nur für einen begrenzten Leistungsbereich.

5.3.1.3 Katalytische Verbrennung

Grundsätzlich ist auch die katalytische Verbrennung als schadstoffarme Feuerungstechnologie denkbar. Die Verbrennung findet hier auf katalytisch wirkenden Festkörperoberflächen statt. Diese Technologie kommt bislang vor allem im Bereich der Abgas- bzw. Abluftreinigung zum Einsatz. Für eine breite Nutzung als Feuerungstechnologie ist weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit erforderlich.

5.3.2 Gasfeuerungen

Die wesentlichen Möglichkeiten zur Minderung von CO- und NMVOC-Emissionen bei Ölfeuerungen (Minderung bei Leistungsregelung und Teillastbetrieb, katalytische Verbrennung) lassen sich vielfach auch auf Gasfeuerungen übertragen.

Bei modulierenden atmosphärischen Gasbrennern nimmt der Luftüberschuß im Teillastbereich in der Regel deutlich zu /IVD, 1988/. Werden die Flammen dabei stark abgekühlt, können erhöhte Emissionen von CO und NMVOC auftreten. Durch die

Installation einer Regeleinrichtung kann der Luftüberschuß im gesamten Lastbereich konstant gehalten werden.

5.3.3 Kohlefeuerungen

Stein- und Braunkohlen werden im Haushalts- und Kleinverbraucherbereich vornehmlich in Durchbrandöfen und Universal-Dauerbrennern verfeuert. Der Anteil der Durchbrandöfen am Gesamtbestand ist dabei am größten.

Beim Durchbrandofen wird die Verbrennungsluft von unten durch den Rost in den Brennraum geführt. Die heißen Rauchgase werden durch den Füllschacht geführt. Dabei wird nach einer gewissen Zeit die gesamte Brennstoffmenge in Glut versetzt. Zuvor werden jedoch CO- und NMVOC-haltige Entgasungsprodukte freigesetzt.

Ein besserer Ausbrand der entstehenden Schwelgase wird durch die Luftführung in Universal-Dauerbrennern erreicht. Während der Verbrennung erfolgt dabei auch eine gleichmäßigere Wärmeabgabe.

Die CO- und NMVOC-Emissionen werden im wesentlichen durch die Brennstoff-Zusammensetzung, die Verbrennungsluftführung und -menge sowie durch den gefahrenen Lastbereich beeinflusst. Zur Vermeidung erhöhter Emissionen sind diese Parameter möglichst optimal einzustellen.

5.3.3.1 Emissionsminderung durch Verwendung emissionsarmer Kohlesorten

Kohlesorten mit hohem Kohlenstoffgehalt und niedrigen Gehalten an flüchtigen Bestandteilen setzen nach der Aufgabe auf die Grundglut vergleichsweise geringe Mengen an Entgasungsprodukten frei. Durch den ausschließlichen Einsatz derartiger Kohlesorten (z.B. Anthrazit-Nußkohlen, Koks) in Anlagen mit kleiner Feuerungswärmeleistung können insbesondere die NMVOC-Emissionen, aber auch die CO-Emissionen gemindert werden.

Gleichfalls beeinflusst werden die hier angesprochenen Emissionen durch die Brennstoffgröße bzw. die spezifische Oberfläche des Brennstoffes. Bei geringer Stückgröße des Brennstoff, d.h. bei hoher spezifischer Oberfläche, verlängert sich die Schwelphase und

damit auch der Zeitraum hoher CO- und NMVOC-Emissionen unter Umständen merklich /IVD, 1988/.

5.3.3.2 Verbrennungsluft-Führung

Feststofffeuerungen mit niedriger Feuerungswärmeleistung sind oftmals nicht mit einem Gebläse ausgestattet, sodaß die Höhe des Schornsteinzuges für die Verbrennungsluftzufuhr von entscheidender Bedeutung ist. Weicht der Schornsteinzug wesentlich von den Auslegungsdaten des Herstellers ab, führt dies zu einer Erhöhung der CO- und NMVOC-Emissionen. Bei zu niedrigem Zug wird zu wenig Verbrennungsluft in den Feuerraum gefördert, d.h. die Verbrennung ist unvollständig. Ist der Schornsteinzug dagegen zu hoch, wird der Feuerraum durch den hohen Luftüberschuß zu stark abgekühlt und die Verweilzeit der Schwelgase und Entgasungsprodukte nimmt ab. Unvollständiger Ausbrand ist die Folge. Wird die Verbrennungsluftzufuhr durch ein Gebläse unterstützt, ist eine ausreichende Verbrennungsluftzufuhr gewährleistet.

5.3.3.3 Leistungsregelung

Wie in den vorstehenden Kapiteln 5.3.1 und 5.3.2 bei Öl- und Gasfeuerungen bereits erwähnt, treten bei Schwachlast erhöhte CO- und NMVOC-Emissionen auf. Wird bei hoher Nennwärmeleistung der Feststofffeuerung nur ein niedriger Wärmebedarf abgefragt, muß der Betreiber entweder in kurzen Zeitabständen geringe Brennstoffmengen nachlegen, oder die Verbrennungsluftmenge entsprechend stark drosseln. Beide Vorgehensweisen führen jedoch zu erhöhten CO- und NMVOC-Emissionen. Deshalb können auch bei Feststofffeuerungen die Emissionen von Produkten der unvollständigen Verbrennung durch eine bessere Anpassung der oftmals überdimensionierten Nennwärmeleistung an den tatsächlichen Wärmebedarf vermindert werden /IVD, 1988/.

Es ist aber auch darauf zu achten, daß keine zu hohe Heizleistung, z.B. über der Nennwärmeleistung der Anlage, abgefragt wird. Dies kann zumindest zu örtlichem Luftmangel, und damit ebenfalls zu erhöhten CO- und NMVOC-Emissionen führen.

5.3.3.4 Sekundärmaßnahmen

In Verbindung mit vorgeschalteten Staubabscheidern ist bei Feststofffeuerungen grundsätzlich auch der Einsatz von Sekundärmaßnahmen, insbesondere Oxidationskatalysatoren, zur Minderung der hohen spezifischen CO- und NMVOC-Emissionen möglich /IVD, 1988/. Da die Funktionstüchtigkeit solcher Anlagen allerdings nur bei einem hohen Aufwand für Überwachung und Wartung durch Fachpersonal zu gewährleisten ist, dürfte der Einsatz von Sekundärmaßnahmen in der Regel nur bei größeren Feuerungsanlagen sinnvoll sein.

5.3.4 Feuerungsanlagen für Holz und andere biogene Brennstoffe

Eine möglichst schadstoffarme Verbrennung von Holz und anderen biogenen Brennstoffen stellt bei dem niedrigen Heizwert und dem hohen Gehalt an Wasser und sonstigen flüchtigen Bestandteilen bestimmte Anforderungen an die Konstruktionsmerkmale der Feuerungsanlagen /IVD, 1988/.

5.3.4.1 Konstruktion der Brennkammer

Zum einen sollte die Brennkammer für die auftretenden großvolumigen Flammen ausreichend dimensioniert, für das Erreichen möglichst hoher Temperaturen wärmeisoliert und vom Bereich der Wärmeabfuhr räumlich getrennt sein. Nur dann kann ein weitgehender Ausbrand der Pyrolysegase gewährleistet werden.

Zum anderen wird der Ausbrand der Entgasungsprodukte durch die Aufgabe von vorgewärmter Sekundärluft im Bereich der Nachverbrennungszone wirkungsvoll unterstützt. Entsprechende Einbauten wie z.B. Verengungen und Umlenkungen erhöhen nach /IVD, 1988/ zusätzlich die Turbulenz und verbessern die Verteilung der Sekundärluft.

5.3.4.2 Emissionsminderung bei Leistungsregelung

Bezüglich der bei den anderen Feuerungsarten bereits mehrfach angesprochenen Leistungsregulierung wird in /IVD, 1988/ darauf hingewiesen, daß bei Holzfeuerungen die Drosselung der Verbrennungsluftzufuhr in der Regel zu erhöhten CO- und

NMVOC-Emissionen führt. Wird die Heizleistung dagegen durch eine kleinere Brennstoffaufgabemenge reduziert, können zumindest bei bestimmten Anlagenbauarten niedrigere Emissionen als bei Vollast auftreten.

5.4 Möglichkeiten zur Minderung von NMVOC-Emissionen aus Raffinerieprozessen

Die Verarbeitung von Rohöl in einer Raffinerie erfolgt allein schon wegen der leichten Entflammbarkeit der Mineralölprodukte in geschlossenen Anlagen. Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen aus Sicherheits- und Entspannungseinrichtungen werden nach Möglichkeit durch Einbindung in Gassammelsysteme vermieden. Die anfallenden Gase werden entweder einem Rückgewinnungs- oder einem Fackelsystem zugeführt. Dennoch können in einer Raffinerie aus den verschiedensten Gründen Kohlenwasserstoff-Emissionen auftreten. In /CONCAWE, 1987/ werden folgende emissionsrelevante Bereiche angeführt:

- Lagerung (Rohöl und Mineralölprodukte)
- Verarbeitung
- Ölabscheider
- Verladung (Mineralölprodukte).

Emissionen und Minderungsmaßnahmen bei der Lagerung und Verladung von Mineralölen werden an dieser Stelle nicht diskutiert, da diese Quellen nicht nur in Raffinerien, sondern auch bei der anschließenden Verteilung (insbesondere von Ottokraftstoffen) anzutreffen sind. Es wird auf den nachfolgenden Abschnitt 5.5 verwiesen.

Die Rohölverarbeitung in einer Raffinerie umfaßt in der Regel eine Vielzahl von Destillations-, Umwandlungs- und Aufarbeitungsschritten. Je nach Rohölspezifikation und gewünschter Produktpalette gelangen die verschiedensten Verfahren zum Einsatz. Gemäß einer Abschätzung in /CONCAWE, 1987/ werden in einer typischen Raffinerie etwa 60 % der Kohlenwasserstoff-Emissionen bei der Rohölverarbeitung freigesetzt. Dabei wird im Verarbeitungsbereich von einem Emissionsfaktor von 0.25 kg/t durchgesetztem Rohöl ausgegangen, wobei in /ÖKO-INSTITUT, 1989/ ein CH₄-Anteil von 20 % angegeben wird. Verursacht werden diese Emissionen vor allem durch Leckagen und Undichtigkeiten bei den zahllosen Dichtungen, Ventilen und Flanschverbindungen in dem an sich geschlossenen System. Zur Gewährleistung der Betriebssicherheit und Funktions-

tüchtigkeit werden die verschiedenen Anlagenkomponenten in unterschiedlichen Zeitabständen gewartet /BIERL, 1979/.

Bei regelmäßiger, gezielter Wartung, die vor allem auch auf eine optimale Emissionsminderung abzielt, können nach /GOETHEL, 1988/ etwa 60 % der bei der Rohölverarbeitung entstehenden NMVOC-Emissionen vermieden werden.

Als weitere Emissionsquelle seien an dieser Stelle Ölabscheider genannt. In den Ölabscheidern wird Abwasser behandelt, welches bei der Rohölverarbeitung mit Mineralölen in Kontakt kommt, und dabei mit Kohlenwasserstoffen beaufschlagt wird. Nach /CONCAWE, 1987/ werden in diesen offenen Becken ca. 0.004 Gew.-% des in der Raffinerie durchgesetzten Rohöls in die Atmosphäre freigesetzt. Durch eine wirksame Abdeckung der Becken könnten rund 90 % der Emissionen vermieden werden.

5.5 Möglichkeiten zur Minderung von NMVOC-Emissionen aus der Kraftstoff-Verteilung

Bei der Lagerung und dem Umschlag von Kraftstoffen treten Verdunstungs-Emissionen auf, die in erheblichem Umfang zu den energiebedingten NMVOC-Emissionen stationärer Quellen beitragen. Die Emissionen sind fast ausschließlich auf die Verdunstung von Ottokraftstoffen zurückzuführen, welche mit durchschnittlich 400 mbar bei 20 °C einen hohen Dampfdruck aufweisen. Dagegen ist der Dampfdruck von Dieselmotorkraftstoff mit etwa 0.5 mbar bei 20 °C um Größenordnungen geringer.

Die einzelnen Vorgänge des Kraftstoff-Umschlags umfassen die Lagerung in Tanklagern und die Befüllung von Transportmitteln (Schiffe, Schienenkesselwagen, Straßentankwagen) innerhalb der Raffinerien, die Einlagerung in Zwischentanklagern und Befüllung von Straßentankwagen, die Einlagerung in Tankstellentanks und letztendlich die Betankung von Kraftfahrzeugen.

Bei allen Gliedern in dieser Verteilungskette treten Emissionen auf. Bei der Befüllung von Tanklagern bestimmter Bauart (Festdachtanks), von Transportmitteln bzw. von Kraftstofftanks der Kraftfahrzeuge sind dies vor allem Verdrängungsverluste. Dabei wird die mit Kraftstoffdämpfen beladene Luft im Tank durch das Volumen der eingefüllten Flüssigkeit verdrängt. Bei der Lagerung von Ottokraftstoffen in Tanklagern treten zudem Atmungsverluste auf, die hauptsächlich durch Temperatur- und Druckschwankungen in der Atmosphäre verursacht werden. Nach den derzeitigen Verhältnissen in der Bundes-

republik Deutschland übertreffen die Verdrängungsverluste bei Befüllungsvorgängen die Atmungsverluste bei der Kraftstofflagerung bei weitem. Nicht berücksichtigt ist dabei allerdings die "Tankatmung" bei Kraftfahrzeugen.

Die Emissionsgrenzwerte der TA Luft, die für einige der hier angesprochenen Quellen gelten, können nur eingehalten werden, wenn umfangreiche Maßnahmen zur Emissionsminderung durchgeführt werden. Insbesondere im Raffineriebereich sind entsprechende Maßnahmen zum Teil bereits verwirklicht.

5.5.1 Lagertanks in Raffinerien und Zwischenlagern

Die Lagerung von größeren Mengen an flüssigen Mineralölprodukten im Raffineriebereich und in Zwischenlagern erfolgt in der Regel in oberirdischen Tanks mit stehend zylindrischer Form, die sich vor allem in der Art der Abdeckung des Flüssigkeitsspiegels gegenüber der Atmosphäre unterscheiden. Als wesentliche Bauformen sind zu nennen:

- Festdachtanks
- Festdachtanks mit Schwimmdecke
- Schwimmdachtanks.

Während die Lagerung von Ottokraftstoffen im Raffineriebereich vorwiegend in Schwimmdachtanks (Tankgröße i.a. über 1000 m³) erfolgt, kommen bei Zwischenlagern daneben auch Festdachtanks mit Schwimmdecke (Tankgröße i.a. über 500 m³) und Festdachtanks ohne Schwimmdecke (Tankgröße i.a. über 100 m³) zum Einsatz /VDI, 1985/ /CONCAWE, 1986/ /MWV, 1989/. Anschauliche Darstellungen zu den einzelnen Bauarten finden sich z.B. in /VDI, 1985/.

Die Lagerung von kleineren Mengen an flüssigen Mineralölprodukten (100 m³) in Straßentankstellen erfolgt in der Regel in unterirdischen Tanks mit liegend zylindrischer Form.

Bei der Lagerung und dem Umschlag von leichtflüchtigen Ottokraftstoffen in Festdachtanks treten die höchsten Verluste auf. In /CONCAWE, 1986/ wird ein mittlerer VOC-Emissionsfaktor von 1.3 kg/t umgeschlagenen Benzins angegeben. Da der Methan-Anteil in den Kraftstoffdämpfen klein ist (< 5 %), entspricht dieser Wert in erster Näherung auch den spezifischen NMVOC-Emissionen.

Deutlich niedriger sind die spezifischen NMVOC-Emissionen bei der Lagerung von Ottokraftstoffen in Festdachtanks mit Schwimmdecke. Durch diese Schwimmdecke wird die von der Oberfläche des Lagergutes ausgehende Verdampfung weitgehend verhindert. Dies führt zur erheblichen Verringerung der Befüllungs-, Atmungs- und Entnahmeverluste, insbesondere bei hohen Durchsatzraten.

Durch die Verwendung von Schwimmdachtanks wird gleichfalls eine weitgehende Abdeckung der Flüssigkeitsoberfläche, und damit eine deutliche Emissionsminderung gegenüber Festdachtanks, erreicht. Allerdings ist auf eine möglichst gute Abdichtung (gegebenenfalls sekundäre Randabdichtung) zwischen dem beweglichen Schwimmdach und der Zylinderwand zu achten.

Nach der aktuellen Fassung der TA Luft sind für die Lagerung von Rohölen und Mineralölprodukten mit einem Dampfdruck von mehr als 13 mbar bei 20 °C - und darunter fallen auch Ottokraftstoffe - in raffineriefernen Mineralölvertriebslagern Festdachtanks mit Schwimmdecken, Schwimmdachtanks mit wirksamer Randabdichtung oder mindestens gleichwertige Einrichtungen zur Emissionsminderung vorzusehen. Diese Einrichtungen sind so auszulegen, daß die Emissionsrate im Vergleich zu einem Festdachtank ohne Schwimmdecke um mindestens 90 % gesenkt wird. Für Tanklager in Mineralölraffinerien wird zudem die mögliche Verwendung von Festdachtanks mit Anschluß an die Raffineriegasleitung angeführt /TA LUFT, 1986/. Für die Lagertanks von Straßentankstellen gelten die Bestimmungen der TA Luft nicht.

In Übereinstimmung mit den obigen Angaben wird in /CONCAWE, 1986/ ausgeführt, daß mit den genannten Einrichtungen bzw. Tankbauarten, verglichen mit einem Festdachtank, eine Minderung der Arbeits- und Atmungsverluste um mindestens 90 % erreicht werden kann.

5.5.2 Befüllung von Transportmitteln in Raffinerien und Zwischenlagern

NMVOC-Emissionen entstehen bei der Verladung von Ottokraftstoffen aus Lagertanks in Transportmittel (Tankschiff, Eisenbahnkesselwagen und Straßentankwagen). Dabei werden zum einen Dämpfe verdrängt, die sich gegebenenfalls noch im Transportbehälter befinden, und zum anderen entstehen zusätzliche Dämpfe durch das Versprühen und Verwirbeln des Kraftstoffes bei der Befüllung. Mittlere Emissionsfaktoren liegen nach

/VDI, 1985/ für die Befüllung von Tankschiffen und Eisenbahnkesselwagen in der Größenordnung von 0.4 kg/t umgeschlagenen Ottokraftstoffes. Für die Befüllung von Straßentankwagen wird ein Wert von 0.64 kg VOC/t angegeben. Die Konzentrationen in der Abluft betragen nach /WUNDERLICH, 1986/ 500 000 mg/m³ und mehr. Gemäß den Bestimmungen der TA Luft dürfen die Abluftkonzentrationen 150 mg/m³ jedoch nicht übersteigen, sofern der Emissionsmassenstrom über der Bagatellmengenschwelle von 3 kg/h liegt.

Zur weitgehenden Vermeidung der Verdunstungsverluste durch Versprühen bzw. Verwirbeln bietet sich die Unterspiegelbefüllung an. Die Beladung erfolgt dabei von oben durch Füllarme, die durch den Tankdom bis auf den Boden des Transportbehälters reichen. Sobald die Austrittsöffnung des Füllrohres von der Flüssigkeit überdeckt ist, wird ein Versprühen des Kraftstoffes vermieden.

Zur Verminderung der Befüllungsemissionen, die durch Verdrängung verursacht werden, sind weitergehende Maßnahmen erforderlich. Dazu gehören:

- Anlagen zur Gaspendingung
- Anlagen zur Abluftreinigung
 - Anlagen zur Kohlenwasserstoffrückgewinnung, z.B. durch
 - Adsorption
 - Absorption
 - Kondensation
- Anlagen zur Verbrennung von Kohlenwasserstoff/Luft-Gemischen.

Darüber hinaus können verschiedene dieser Maßnahmen kombiniert werden.

Bei allen genannten Verfahren muß zunächst durch eine entsprechende Abdichtung sichergestellt werden, daß keine Kraftstoffdämpfe durch den während der Befüllung geöffneten Tankdom des Transportbehälters entweichen. Bei einem geschlossenen Gasführungssystem besteht ein erhöhtes Sicherheitsrisiko, sodaß geeignete Vorkehrungen zum primären Explosions- bzw. Flammendurchschlag-Schutz zu treffen sind.

5.5.2.1 Gaspendingung

Beim Gaspendingverfahren werden die im Transportbehälter entstehenden bzw. verdrängten Kraftstoffdämpfe über eine Gaspendingleitung in den Dampfraum des Lagertanks zurückgeführt. Wie Abb. 5.1 verdeutlicht, kann eine Gaspendingleitung nur dann installiert werden, wenn die Transportmittelbefüllung von einem Festdachtank ohne Schwimmdecke aus erfolgt /WUNDERLICH, 1986/. In Festdachtanks mit Schwimmdecke sowie in Schwimm-dachtanks ist der für dieses Verfahren erforderliche Dampfraum nicht vorhanden.

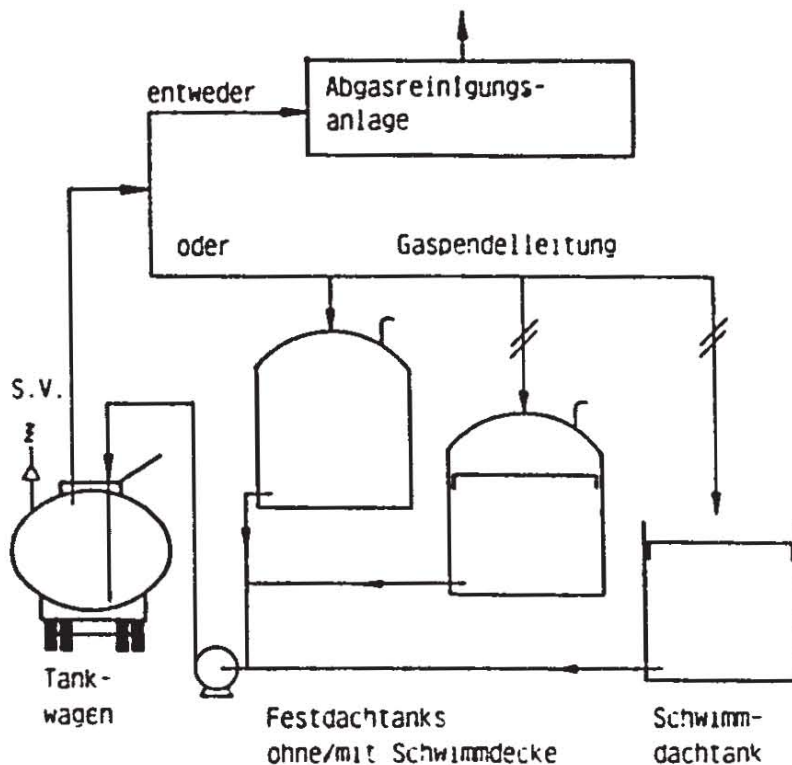


Abb. 5.1: Maßnahmen zur Emissionsminderung bei der Befüllung von Transportmitteln aus Tanklagern /WUNDERLICH, 1986/

Die NMVOC-Konzentration im Dampfraum wird durch dieses Verfahren zwar nur unwesentlich verringert, der Emissionsvolumenstrom nimmt jedoch deutlich ab. Nach /SCHWEFER ET AL., 1984/ können die Bestimmungen der TA Luft (Grenzwert zu der Zeit 300 mg/m^3) durch diese Maßnahme allein in der Regel nicht eingehalten werden.

5.5.2.2 Rückgewinnung von Kraftstoffdämpfen

Bei Anlagen zur Kraftstoff-Rückgewinnung wird die mit organischen Dämpfen beladene Abluft aus dem Transportbehälter erfaßt und einer Reinigungsanlage zugeführt. Die Abtrennung von organischen Gasen und Dämpfen aus dem Kraftstoff/Luft-Gemisch erfolgt dabei durch Absorption, Adsorption, Kondensation oder durch kombinierte Verfahren.

5.5.2.2.1 Absorption

Bei der Absorption werden die Kraftstoffdämpfe im Gegenstrom zu einem gekühlten Absorbens durch eine Kolonne geleitet. Das beladene Absorbens kann entweder direkt weiterverwertet werden (z.B. wenn als Absorbens Kraftstoff-Produkte oder -Komponenten zur Verfügung stehen), oder es muß (z.B. bei Verwendung schwerflüchtiger Kohlenwasserstoffe wie Nonan als Absorbens) in einem Zwischenschritt regeneriert werden, wobei die dabei anfallenden Kohlenwasserstoffe in einer nachfolgenden Reabsorption mit Kraftstoff bei Umgebungstemperatur erneut zurückgewonnen werden. Das Verfahrensprinzip der absorptiven Reinigung wird in Abb. 5.2 verdeutlicht /SCHMIDT, 1989/.

Der durch die Absorption erzielbare Rückgewinnungsgrad bzw. die Restemission am Austritt des Absorbers hängt insbesondere vom Dampfdruck bzw. der Anwendungstemperatur des Absorbens ab. Nach /WUNDERLICH, 1986/ wird von der Herstellerseite eine Höchstkonzentration von organischen Stoffen im Reingas in Höhe von 30 000 mg/m³ garantiert, wobei der Erwartungswert unter 2500 mg/m³ liegt. Der grundsätzliche Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Unempfindlichkeit gegenüber Schwankungen von Menge und Zusammensetzung des zu reinigenden Kraftstoff/Luft-Gemisches.

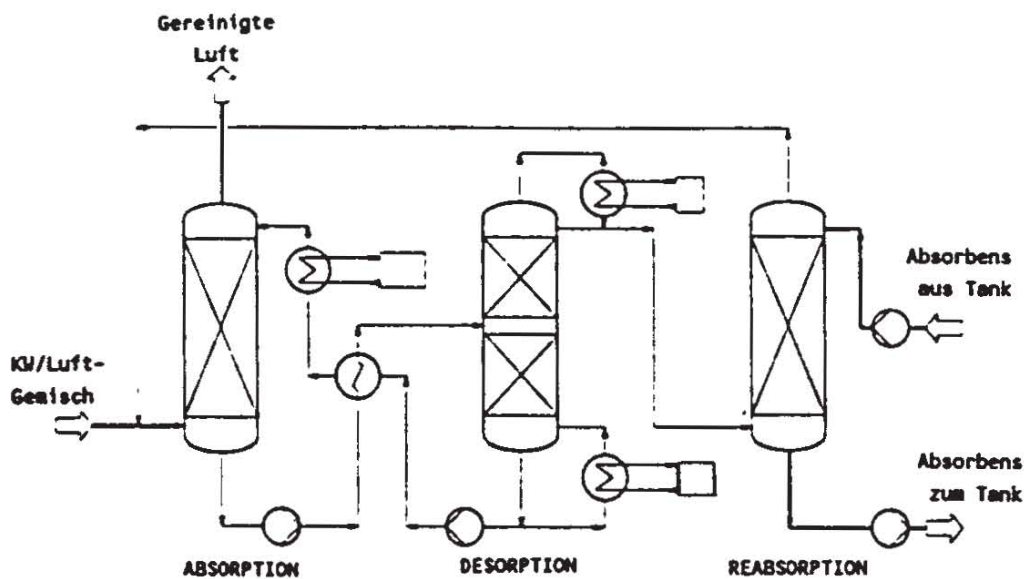


Abb. 5.2: Prinzipschema der absorptiven Reinigung /SCHMIDT, 1989/

5.5.2.2 Adsorption

Die Adsorption von Kohlenwasserstoffen aus den bei der Befüllung auftretenden Kraftstoff/Luft-Gemischen erfolgt an Aktivkohle. Um einen kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten, sind für eine Anlage in der Regel mindestens zwei Adsorber erforderlich, die wechselweise beladen bzw. regeneriert werden. Die Regenerierung kann mit Wasserdampf (wobei u.U. Abwasserprobleme auftreten) oder durch Anlegen eines Vakuums erfolgen. Nach /WUNDERLICH 1986/ können durch Adsorptionsanlagen die VOC-Konzentrationen auf der Reingassseite bis unter 2000 mg/m^3 abgesenkt werden.

5.5.2.3 Kondensation

Kondensationsanlagen sind vom Verfahrensprinzip her universell einsetzbar. Um zu akzeptablen Abscheidegraden zu gelangen, sind in der Regel allerdings Temperaturen in der Größenordnung von -70°C erforderlich /SCHMIDT, 1989/. Probleme bei diesem Verfahren ergeben sich insbesondere durch den kaum zu vermeidenden Feuchtigkeitsgehalt in der zu reinigenden Abluft. Der Eisbildung an den Wärmetauscherflächen kann

jedoch mit zyklischen Aufwärmphasen begegnet werden. Die erreichbaren VOC-Konzentrationen sind - je nach den Temperaturverhältnissen - mit denen der zuvor beschriebenen Verfahren vergleichbar.

5.5.2.2.4 Sonstige Rückgewinnungsverfahren

Neben den hier beschriebenen Möglichkeiten zur Dämpferückgewinnung werden derzeit noch weitere Verfahren entwickelt bzw. erprobt, die allerdings noch nicht als Stand der Technik bezeichnet werden können. Stellvertretend sei an dieser Stelle das Membranverfahren genannt. Abb. 5.3 zeigt das Prinzipschema einer solchen Pilotanlage /BEHLING ET AL., 1989/.

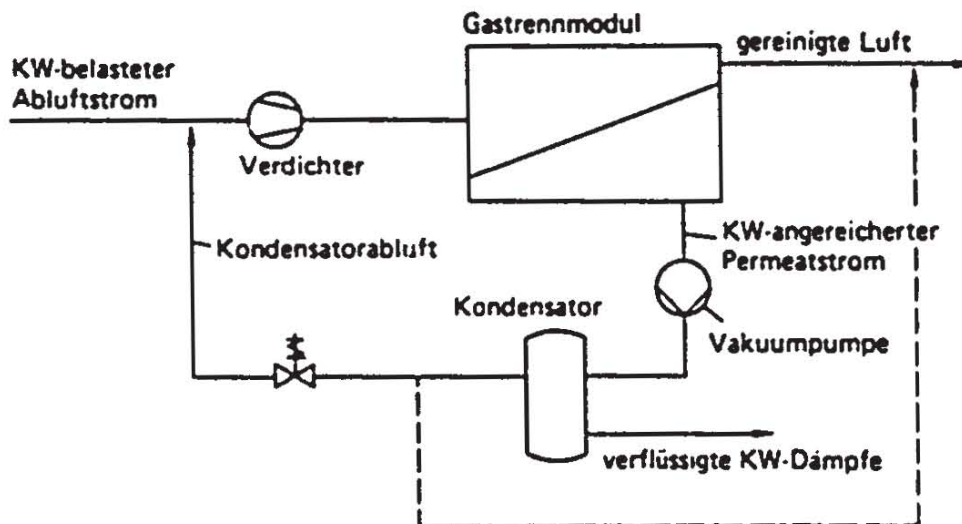


Abb. 5.3: Prinzipschema der Dämpferückgewinnung mit dem Membranverfahren /BEHLING ET AL., 1989/

Die in dem Gastrennmodul installierte Membran weist eine hohe Permeabilität für organische Dämpfe und eine niedrige Permeabilität für Sauerstoff und Stickstoff auf. Das bedeutet, daß relativ große Kohlenwasserstoffe-Moleküle die Membran passieren können, kleine Sauerstoff- und Stickstoffmoleküle dagegen zurückgehalten werden. Diese Membran funktioniert also nicht nach dem herkömmlichen Filterprinzip, vielmehr finden Lösungsvorgänge von Kohlenwasserstoff-Molekülen im Membranmaterial statt. Unter der

treibenden Kraft eines Konzentrationsgradienten diffundieren die Kohlenwasserstoff-Moleküle durch die Membran hindurch und werden auf der Niederdruckseite des Moduls desorbiert. Nach /BEHLING ET AL., 1989/ können Restgaskonzentrationen von 5000 mg/m^3 erreicht werden. Das Membranverfahren scheint sich besonders für raffinierferne Tankläger zu eignen. Notwendig ist lediglich die Stromversorgung, dagegen nicht die Versorgung mit Prozeßdampf, Druckluft, Kühlwasser bzw. die Entsorgung von Abwasser.

5.5.2.3 Verbrennung

Nach den vorliegenden Informationen kann nicht unbedingt davon ausgegangen werden, daß mit den bisher beschriebenen Verfahren der Gaspendingung bzw. der Dämpfe-Rückgewinnung die für den Kraftstoffumschlag in Raffinerien und Zwischenlagern in der TA Luft geforderten Emissionsgrenzwerte einzuhalten sind. In /WUNDERLICH, 1986/ wird darauf hingewiesen, daß dies nur durch die Nachverbrennung gewährleistet ist, wobei eine Reingaskonzentration an organischen Stoffen von weniger als 20 mg/m^3 angegeben wird. Zu unterscheiden ist zwischen der thermischen und der katalytischen Nachverbrennung. Die Nachverbrennung ist im Grundsatz zwar universell einsetzbar, beispielsweise kann eine der genannten Rückgewinnungsverfahren vorgeschaltet werden, sie birgt jedoch auch gewisse Nachteile oder Probleme in sich. So ist z.B. bei der thermischen Nachverbrennung darauf zu achten, daß durch die erforderlichen hohen Verbrennungstemperaturen keine erhöhten NO_x -Emissionen auftreten. Der Energieverbrauch liegt außerdem bei der Nachverbrennung im allgemeinen deutlich über dem der anderen Verfahren. Sinnvolle Nutzungsmöglichkeiten der entstehenden Abwärme vor Ort sind dabei nicht in jedem Fall ohne weiteres gegeben.

5.5.3 NMVOC-Emissionsminderung im Tankstellenbereich

Emissionen im Bereich von Straßentankstellen treten im wesentlichen bei der Befüllung der Tankstellentanks aus Straßentankwagen sowie bei der Betankung von Kraftfahrzeugen auf. Die Atmungsverluste während der Lagerung des Kraftstoffes in den Tankstellentanks sind vergleichsweise gering, da in der Regel unterirdische Tanks verwendet werden, und somit relativ kleine Temperaturschwankungen auftreten. Atmungsverluste werden demnach vorwiegend durch Luftdruckschwankungen verursacht.

5.5.3.1 Befüllung von Tankstellentanks

Zur Minderung der Emissionen bei der Befüllung von Tankstellentanks bieten sich prinzipiell die gleichen Möglichkeiten an, wie sie für die Befüllung von Transportmitteln in Raffinerien und Zwischenlagern in Abschnitt 5.5.2 diskutiert wurden. Die im Tankstellentank entstehenden bzw. verdrängten Kraftstoffdämpfe werden entweder mittels einer Gaspendelleitung in den Straßentankwagen zurückgeleitet (wird in den USA als "Stage I" bezeichnet), oder einer Reinigungs- bzw. Rückgewinnungseinrichtung zugeführt. Die Gaspendelung ist jedoch nur dann sinnvoll einsetzbar, wenn die Entsorgung der in den Transportbehälter rückgeführten Kraftstoffdämpfe bei dessen Wiederbeladung in der Raffinerie bzw. im Zwischenlager gewährleistet ist.

5.5.3.2 Kraftfahrzeugbetankung

Für die Minderung der Verdunstungs- bzw. Verdrängungsverluste bei der Betankung von Kraftfahrzeugen stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Auswahl. Dies sind zum einen tankstellenseitige Maßnahmen, und zu anderen fahrzeugseitige Maßnahmen.

5.5.3.2.1 Tankstellenseitige Maßnahmen

Als tankstellenseitige Maßnahme zur Emissionsminderung ist die Gaspendelung zwischen Kraftfahrzeug- und Tankstellentank (wird in den USA als "Stage II" bezeichnet) zu betrachten. Wie Abb. 5.4 verdeutlicht, wird dabei der Zwischenraum zwischen dem Tankstutzen des Kraftfahrzeuges und der Zapfpistole mit einer flexiblen Zapfpistolensmanschette abgedichtet /KOEHL ET AL., 1986/.

Eine optimale Emissionsminderung wird hier nur dann erreicht, wenn die modifizierte Zapfpistole bestimmungsgemäß gehandhabt wird. Sinnvoll kann das Verfahren auch nur dann eingesetzt werden, wenn die in den Tankstellentank zurückgeführten Kraftstoffdämpfe ihrerseits in geeigneter Form entsorgt werden. Nach /KOEHL ET AL., 1986/ kann ein Emissionsminderungsgrad von ca. 95 % erzielt werden. In der Praxis dürfte der Minderungsgrad in der Größenordnung von 80 % liegen.

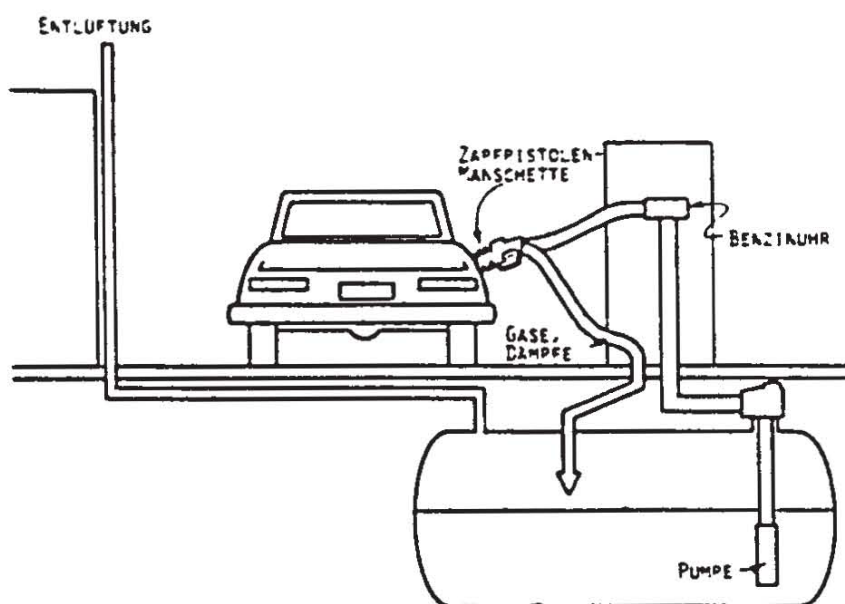


Abb. 5.4: Gaspendelung bei der Kraftfahrzeugbetankung /KOEHL ET AL., 1986/

5.5.3.2 Fahrzeugseitige Maßnahmen

Betankungsverluste können auch durch fahrzeugseitige Maßnahmen gemindert werden. Das verdrängte Kraftstoff/Luft-Gemisch wird durch einen im Fahrzeug installierten Aktivkohlebehälter geführt. Die organischen Dämpfe werden dabei an der Aktivkohle adsorbiert. Die Desorption erfolgt während des Betriebs des Fahrzeugs, indem Frischluft in umgekehrter Richtung durch den Aktivkohlebehälter geleitet und dem Motor zugeführt wird. In Abb. 5.5 wird der Aufbau dieses Verfahrens skizziert /KOEHL ET AL., 1986/.

Ein besonderer Vorteil dieses Verfahrens ist darin zu sehen, daß bei entsprechend ausgelegter Kapazität des Aktivkohlebehälters (gegebenenfalls sind geringfügige Modifikationen im Aufbau notwendig) auch die Kraftstoffverluste durch Tankatmung erheblich vermindert werden können. Es sei hier darauf hingewiesen, daß durch diese Verdunstungsverluste aus den Tanks und den kraftstoffführenden Leitungen von Kraftfahrzeugen in der Bundesrepublik gegenwärtig ca. 260 000 t/a an organischen Verbindungen freigesetzt werden /UBA, 1989/.

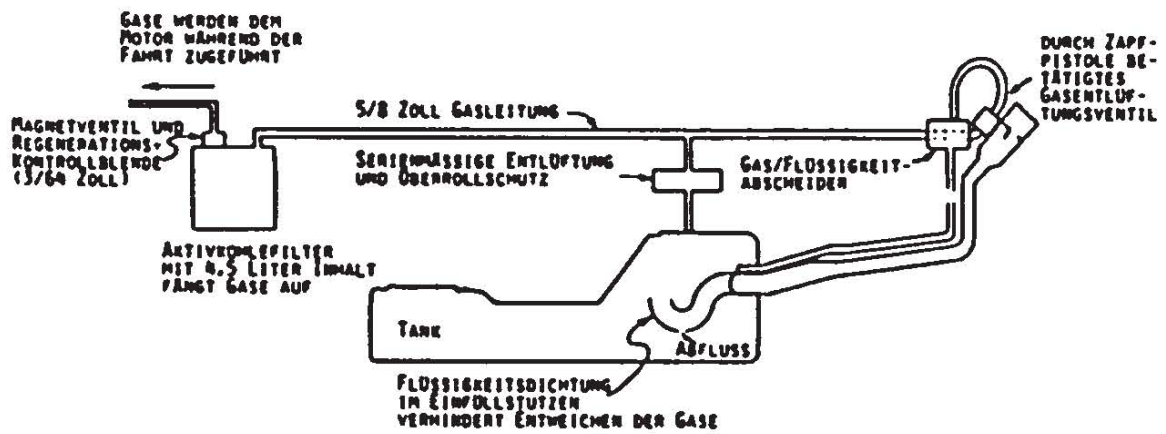


Abb 5.5: Fahrzeugseitige Anlage zur Minderung von Betankungsverlusten /KOEHL ET AL., 1986/

6 Technisches Minderungspotential und Minderungskosten für ausgewählte Maßnahmen zur Minderung von NO_x-, CO- und NMVOC-Emissionen

Für einige der in Kapitel 5 dargestellten Maßnahmen zur Minderung der energiebedingten Emissionen stationärer Quellen in der Bundesrepublik Deutschland sollen nachfolgend das technische Minderungspotential und, soweit möglich, die dabei entstehenden Minderungskosten abgeschätzt werden. Dabei wird, wie bereits mehrfach erwähnt, zum einen von der Emissionssituation im Jahr 1987 ausgegangen, und zum anderen von dem Emissionsniveau, das sich im Jahr 2005 ergeben würde, wenn - ausgehend von der Emissionssituation in 1987 - keine Minderungsmaßnahmen durchgeführt würden.

Es ist an dieser Stelle ausdrücklich darauf hinzuweisen, daß die angegebenen Potentiale und Kosten nur als grobe Orientierungswerte zu interpretieren sind. Teilweise mußten vereinfachende Annahmen getroffen werden, um einerseits den notwendigen Arbeitsaufwand an den vorgegebenen Rahmen anzupassen und andererseits bestehende Daten- und Informationslücken auszugleichen. Soweit erforderlich wird in den nachfolgenden Teilkapiteln darauf hingewiesen.

6.1 Feuerungsanlagen

Technische Minderungspotentiale und Minderungskosten werden für Maßnahmen zur NO_x-Minderung bei öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken und genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen der Industrie sowie - im Rahmen der bestehenden Möglichkeiten - für Maßnahmen zur CO- und NMVOC-Minderung bei nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen in Haushalten und im Kleinverbraucherbereich diskutiert.

6.1.1 NO_x-Minderung in öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken

Die Einhaltung der in der Großfeuerungsanlagen-Verordnung festgelegten Grenzwerte kann nur durch die Verwirklichung umfangreicher Primär- bzw. Sekundärmaßnahmen erreicht werden. In /JUNG, 1988/ wird ein Maßnahmenkatalog diskutiert, der zu einer Minderung der NO_x-Emissionen in der öffentlichen Elektrizitätswirtschaft von 740 000 t im Jahre 1982 auf ca. 200 000 t bis Mitte der neunziger Jahre führt. Im Vordergrund steht dabei die bevorzugte Installation von SCR-Anlagen in Steinkohlenkraftwerken sowie die Durchführung einfacher und kombinierter Primärmaßnahmen in den Feuerungsanlagen

für sonstige fossile Energieträger. Die Investitionsaufwendungen werden dabei mit mindestens 6.8 Mrd. DM beziffert. Diesen Angaben liegen Ergebnisse von Umfragen unter den betroffenen Kraftwerksbetreibern zugrunde. Dennoch wird auch hier auf die bestehende Fehlerbandbreite der Ergebnisse hingewiesen.

Weiterhin wird in /VDEW 1988/ vermerkt, daß 1987 eine Minderung der NO_x-Emissionen um 22 % gegenüber dem Stand von 1982 erreicht wurde. Dies wird bei den hier durchzuführenden Berechnungen entsprechend berücksichtigt.

In Abb. 6.1 ist die bisherige Entwicklung der NO_x-Emissionen aus öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken sowie aus der industriellen Stromerzeugung aufgezeigt /UBA, 1989/. Ebenfalls dargestellt sind die Auswirkungen der gesetzlich festgelegten Emissionsgrenzwerte, deren Einhaltung in den neunziger Jahren zu einer deutlichen Reduzierung des Emissionsniveaus führen werden.

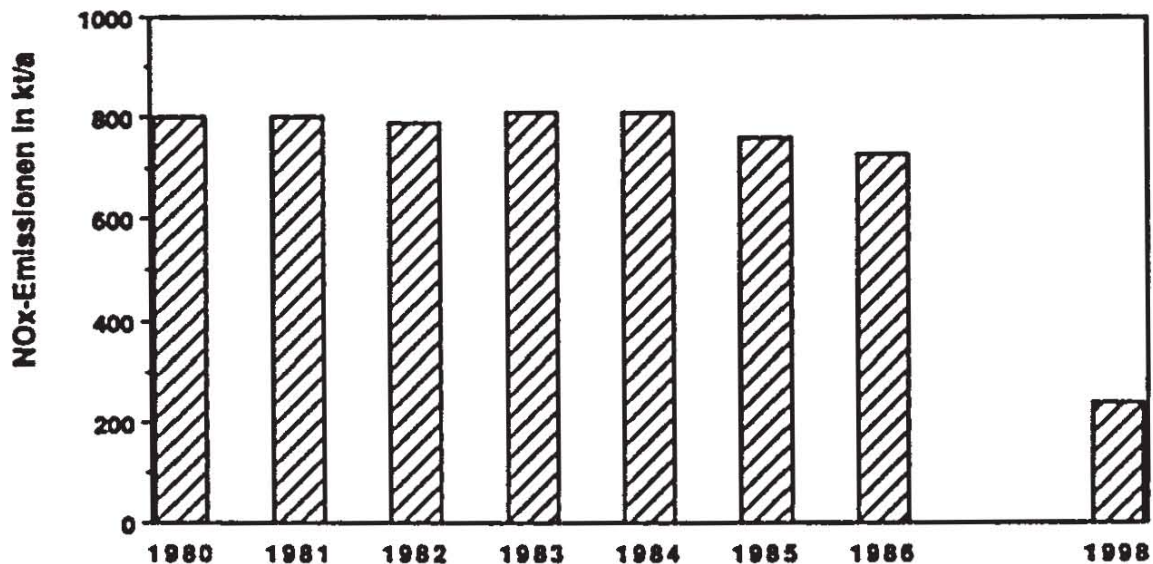


Abb. 6.1: Entwicklung der NO_x-Emissionen aus öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken (einschließlich industrielle Stromerzeugung) /UBA, 1989/

In Tabelle 6.1 sind die abgeschätzten technischen Potentiale und Kosten für ausgewählte Minderungsmaßnahmen aufgeführt. Die Angaben zu den Minderungskosten im Bereich der öffentlichen Kraft- und Fernheizwerke basieren auf Mittelwerten, die aus /WUI, 1986/ und /SCHÄRER ET AL, 1985/ abgeleitet wurden. Da die spezifischen Minderungskosten

je nach Feuerungstyp, Feuerungswärmeleistung und insbesondere Auslastung eine sehr hohe Bandbreite aufweisen, stellen die hier abgeschätzten Werte lediglich eine grobe Orientierungshilfe dar.

Genauere Ergebnisse lassen sich nur durch eine weitaus detailliertere Analyse erhalten. Es wäre u.a. auch die hier getroffene Annahme zu prüfen, daß für Braunkohlefeuerungen ähnliche Minderungsgrade und Minderungskosten anzusetzen sind wie für Steinkohlefeuerungen.

Tabelle 6.1

**Minderungspotential und Minderungskosten von Maßnahmen zur NO_x-Minderung
in öffentlichen Kraft- und Fernheizwerken
Bezugsjahre 1987¹⁾ und 2005²⁾**

Maßnahme	Minderungs- grad in %	techn. Minde- rungspotential in kt/a		Minderungskosten		spezifisch DM/kg NO _x
		1987	2005	Gesamt Mrd. DM/a 1987	2005	
SCR ohne Primärmaßnahmen	85	382	537	2.2	3.1	2.6-9.6
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
SCR und kombinierte Pri- märmaßnahmen	90-95	432	612	-	-	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
SCR und Low-NO _x -Brenner	88-94	419	592	-	-	-
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
SCR bei Steinkohlenfeuerungen, kombinierte Primärmaßnahmen bei sonstigen Feuerungen	65/85	333	479	1.4	2.0	2.2-14.0

¹⁾ Die Angaben beziehen sich auf die Emissionssituation im Jahr 1987.

²⁾ Die Angaben beziehen sich auf das Emissionsniveau, das sich im Jahr 2005 ergeben würde, wenn - ausgehend von der Emissionssituation in 1987 - keine Minderungsmaßnahmen durchgeführt würden.

Für die Kombinationen von Primär- und Sekundärmaßnahmen wurden keine Minderungskosten abgeschätzt. Werden Primärmaßnahmen der sekundären Rauchgasreinigung vorgeschaltet, erhöhen sich im Prinzip die spezifischen Minderungskosten der Sekundärmaßnahmen aufgrund der geringeren NO_x-Konzentrationen in dem der DeNO_x-Anlage

zugeführten Rauchgas. Inwieweit die Anpassung der Auslegungsleistung der sekundären NO_x-Minderung an die veränderten Bedingungen wiederum zu einer Abnahme der spezifischen Minderungskosten führt, bedarf einer umfangreicheren Analyse.

Erwartungsgemäß können bei der Installierung von SCR-Anlagen in Verbindung mit kombinierten Primärmaßnahmen in allen Feuerungsanlagen die NO_x-Emissionen am nachhaltigsten gemindert werden. Da bei Schmelzkammerfeuerungen Primärmaßnahmen nur in beschränktem Umfang durchgeführt werden können, wurde hier ein Minderungsgrad von insgesamt 90 % unterstellt, im Gegensatz zu den übrigen Feuerungsarten, für die eine NO_x-Emissionsminderung von 95 % zugrundegelegt wird. Die ausschließliche Ausrüstung der Feuerungen mit SCR-Anlagen führt ebenfalls zu einer deutlichen Emissionsminderung. Die damit verbundenen Kosten werden für 1987 mit 2.2 Mrd. DM/a abgeschätzt.

6.1.2 NO_x-Minderung in genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen der Industrie

Nach Angaben in /WUI, 1986/, die sich auf das Jahr 1983 beziehen, und nur das Gebiet von Baden-Württemberg beinhalten, werden rund 5 % der NO_x-Emissionen industrieller Feuerungen durch nicht genehmigungsbedürftige Anlagen verursacht. Zur Abschätzung des technischen Minderungspotentials der hier diskutierten Maßnahmen wird davon ausgegangen, daß dieser Anteil derzeit in der gesamten Bundesrepublik ca. 10 % beträgt.

Weiterhin werden bei der Ermittlung des technischen Minderungspotentials der verschiedenen Maßnahmen die NO_x-Emissionen von Trocknern und Prozessfeuerungen ausgeklammert. Wie in Kapitel 5.2.3 beschrieben, stehen für solche Anlagen derzeit noch keine allgemein einsetzbaren Minderungstechnologien zur Verfügung. Die NO_x-Emissionen dieser Quellen belaufen sich nach den hier durchgeführten Berechnungen auf ca. 150 kt in 1987.

Den Abschätzungen der Minderungskosten verschiedener Maßnahmen liegen Durchschnittsdaten des Anlagenparks in Baden-Württemberg zugrunde /BOYSEN ET AL., in Vorb./. Je nach Feuerungstyp, Feuerungswärmeleistung und insbesondere Auslastung der Feuerung weisen die spezifischen Minderungskosten eine sehr hohe Bandbreite auf.

In Tabelle 6.2 sind die abgeschätzten Minderungspotentiale und -kosten für die einzelnen Maßnahmen wiedergegeben. Da nach /PROGNOS, 1987/ der Einsatz fossiler Energieträger in industriellen Feuerungsanlagen bis zum Jahr 2005 nur um ca. 4 % zunimmt, können die technischen Minderungspotentiale und der Barwert der Minderungskosten näherungsweise als konstant betrachtet werden.

Tabelle 6.2

Abschätzung des Minderungspotentials und der Minderungskosten von Maßnahmen zur NO_x-Minderung in genehmigungsbedürftigen industriellen Feuerungsanlagen (bezogen auf das Emissionsniveau in 1987)

Maßnahme	Minderungs- grad in %	techn. Minde- rungspotential in kt/a	Minderungskosten	
			Gesamt Mio. DM/a	spezifisch DM/kg NO _x
Low-NO _x -Brenner	30-50	25	62	2.6
Kombinierte Primärmaß- nahmen	65	41	651	16.0
ACOM-Verfahren	35	29	29	1.0
SCR-Verfahren	85	110	989	9.0
NO _x OUT-Verfahren	50	32	84	2.6
Aktivkoks-Verfahren	80	69	4689	68.0

Der Aufstellung ist zu entnehmen, daß SCR-Anlagen mit 110 kt/a das höchste Minderungspotential beinhalten, wobei die Minderungskosten in der Größenordnung von rund 990 Mio. DM/a liegen. Die höchsten Minderungskosten aller Maßnahmen weist mit ca. 4.7 Mrd. DM/a allerdings das Aktivkoks-Verfahren auf.

6.1.3 NMVOC- und CO-Minderung bei nicht genehmigungsbedürftigen Feuerungsanlagen in Haushalten und von Kleinverbrauchern

Bei der Darstellung von Möglichkeiten zur NMVOC- und CO-Emissionsminderung bei Anlagen mit kleiner Feuerungswärmeleistung, die vorzugsweise in den Sektoren Haushalte und Kleinverbraucher eingesetzt werden, kam bereits zum Ausdruck, daß bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch keine umfangreichen Maßnahmenkonzepte zur Minderung von Produkten der unvollständigen Verbrennung zur Verfügung stehen. Dies gilt insbesondere für Anlagen, die mit festen Brennstoffen befeuert werden und in erheblichem Umfang zu den Gesamtemissionen von Feuerungsanlagen beitragen. Ansätze für konstruktionsseitige Verbesserungen sind - wie beschrieben - sicherlich vorhanden, können aber gegenwärtig nicht als Stand der Technik bezeichnet werden. Hier wäre auf den Bedarf an weiterführender Forschungs- und Entwicklungsarbeit hinzuweisen.

Kurz- bis mittelfristig gesehen könnte eine Minderung der NMVOC- und CO-Emissionen durch eine verbesserte Anpassung der Nennwärmeleistung der Anlagen an den tatsächlichen Wärmebedarf bzw. durch entsprechendes Nutzerverhalten erzielt werden. Welches Minderungspotential diese Maßnahmen beinhalten, läßt sich allerdings kaum abschätzen, da sich zum einen die Verringerung der Emissionen einer Anlage bestenfalls in der Größenordnung angeben läßt, und zum anderen keine ausreichend gesicherten Daten über den Bestand und die Auslastung von Kleinf Feuerungsanlagen verfügbar sind.

6.2 NMVOC-Minderung bei Raffinerieprozessen

Technisches Minderungspotential und Minderungskosten für Maßnahmen zur NMVOC-Minderung werden hier nur für diejenigen Quellen berücksichtigt, die bei der Verarbeitung von Mineralölen und bei der Abwasserbehandlung auftreten. Dies ist im Verarbeitungsbereich die verbesserte Anlagenwartung und bei Ölabscheidern die Abdeckung offener Becken. Die Lagerung und der Umschlag von Produkten, insbesondere von Ottokraftstoffen, werden im nächsten Abschnitt betrachtet. Tabelle 6.3 gibt die für die Emissionsniveaus in den Jahren 1987 und 2005 abgeschätzten Werte wieder. Der für das Jahr 2005 angenommene Rohöldurchsatz liegt mit ca. 70 Mio. t ungefähr 16 % niedriger als 1987. Bei einem konstanten Anteil von Importprodukten ergibt sich dies aus der Bedarfsanalyse in /PROGNOS, 1987/.

Für die Abdeckung der Ölabscheider wurde eine Nutzungsdauer von 15 Jahren angesetzt.

Tabelle 6.3

**Minderungspotential und Minderungskosten von Maßnahmen zur
NMVOC-Minderung in Raffinerien
Bezugsjahre 1987¹⁾ und 2005²⁾**

Maßnahme	Minderungs- grad in %	techn. Minde- rungspotential in kt/a		Minderungskosten			
		1987	2005	Gesamt Mio. DM/a		spezifisch DM/kg NMVOC	
				1987	2005	1987	2005
optimierte Anlagenwartung	60	10.0	8.3	-0.7	-1.7	-0.07	-0.22
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Abdeckung Ölabscheider	90	2.4	2.0	0.3	0.0	0.14	0.00

¹⁾ Die Angaben beziehen sich auf die Emissionssituation im Jahr 1987.

²⁾ Die Angaben beziehen sich auf das Emissionsniveau, das sich im Jahr 2005 ergeben würde, wenn - ausgehend von der Emissionssituation in 1987 - keine Minderungsmaßnahmen durchgeführt würden.

Wie aus der Tabelle hervorgeht, sind die angegebenen spezifischen Minderungskosten deutlich niedriger als dies bei den zuvor diskutierten NO_x-Minderungsmaßnahmen der Fall ist. Dies ist unter anderem auch auf die Gutschrift zurückzuführen, die für den Wert der zurückgewonnenen Kohlenwasserstoffe - hier wurde der Rohölpreis in den entsprechenden Jahren zugrunde gelegt - zu veranschlagen ist. Mit steigenden Rohölpreisen kann unter den getroffenen Annahmen zum Teil eine geringe Kosteneinsparung, in Tabelle 6.3 mit negativem Vorzeichen ausgewiesen, erzielt werden.

6.3 NMVOC-Minderung bei der Lagerung und dem Umschlag von Benzin

Zur Ermittlung des technischen Minderungspotentials und der Minderungskosten wurden verschiedene Annahmen über das Benzinverteilungssystem in der Bundesrepublik Deutschland getroffen. Diese beruhen im wesentlichen auf den Angaben in /CONCAWE, 1986/, welche für ein hypothetisches Benzinverteilungsnetz in Europa entwickelt wurden. Die für die einzelnen Lagerungs- und Umschlagvorgänge verwendeten spezifischen

Emissionsfaktoren entsprechen in der Summe ungefähr dem in /ÖKO-INSTITUT, 1989/ angegebenen Wert von 4.2 kg/t umgeschlagenen Benzins. Der als gering einzuschätzende Methananteil an den Emissionen wurde dabei vernachlässigt. Die Gesamtemissionen vom Raffinerielagertank bis hin zur Befüllung von Kraftfahrzeugtanks an den Tankstellen errechnen sich demnach zu etwa 108 000 t/a in 1987 bzw. 56 000 t/a im Jahr 2005. Die Abnahme der Emissionen bis zum Jahr 2005 ergibt sich aus dem in /PROGNOS, 1987/ unterstellten deutlichen Rückgang des Benzinverbrauches im Straßenverkehr. Bei einem geringeren Rückgang des Benzinverbrauches würde das Emissionsniveau entsprechend höher liegen. Es wird weiter davon ausgegangen, daß insgesamt 70 % des Raffinerieabsatzes bzw. der Importmengen über Zwischenlager verschiedener Größe umgeschlagen, und der Rest direkt an Tankstellen geliefert wird. Zudem wird für das Jahr 1987 unterstellt, daß größere Tanklager im Raffinerie- und Zwischenlagerbereich mit Schwimmdachtanks bzw. Festdachtanks mit Schwimmdache ausgerüstet sind, kleinere Zwischenlager dagegen mit Festdachtanks. Außerdem wird angenommen - und dies kommt auch bei den verwendeten Emissionsfaktoren zum Ausdruck - daß 1987 vielfach noch keine Minderungsmaßnahmen verwirklicht sind. Derartige Maßnahmen zur Emissionsminderung müssen nach TA Luft in verschiedenen Bereichen künftig durchgeführt bzw. nachgerüstet werden.

Die den Berechnungen zugrunde gelegten spezifischen Minderungskosten wurden ebenfalls größtenteils aus /CONCAWE, 1986/ abgeleitet. Dabei wurde in der Regel eine Nutzungsdauer der einzelnen Anlagen von 10 Jahren angesetzt. Genauere Erfahrungswerte für die Bundesrepublik stehen bisher noch nicht zur Verfügung.

In Tabelle 6.4 sind die Ergebnisse der vorgenommenen Abschätzungen in aggregierter Form wiedergegeben. Bei der hier dargestellten Maßnahmenpalette wurde bevorzugt auf die Gaspandlung und nachgeschaltete Dämpferückgewinnung zurückgegriffen, wobei der Wert der zurückgewonnenen Produkte den Maßnahmen gutgeschrieben werden kann. Es werden die jeweiligen Benzinpreise abzüglich Mineralöl- und Mehrwertsteuer zugrunde gelegt.

Es ist darauf hinzuweisen, daß die in verschiedenen Veröffentlichungen angegebenen spezifischen Minderungskosten eine hohe Bandbreite aufweisen. Die hier diskutierten Werte sind deshalb als grobe Orientierungswerte zu verstehen.

Tabelle 6.4

**Minderungspotential und Minderungskosten von Maßnahmen zur
NMVOC-Minderung bei der Lagerung und dem Umschlag von Benzin
Bezugsjahre 1987¹⁾ und 2005²⁾**

Maßnahme	Minderungs- grad in %	techn. Min- derungs- potential in kt/a		Minderungskosten			
		1987	2005	Gesamt Mio. DM/a		spezifisch DM/kg NMVOC	
				1987	2005	1987	2005
sekundäre Randabdichtung von Schwimmdachtanks	92	1.1	0.6	0.5	0.03	0.42	0.06
Anschluß von Festdachtanks an Gassammelsystem mit Rückgewinnung	98	13.2	6.8	11.7	3.60	0.89	0.52
Dämpferückgewinnung bei Transportmittelbeladung (incl. der von Tankstellen rückgeführten Dämpfe)	98	22.6	11.7	57.2	25.2	2.53	2.17
Rückführung von Dämpfen aus der Tankstellenbelieferung an Raffinerie/Zwischenlager	98	33.9	17.5	35.0	11.7	1.04	0.67
Rückführung von Dämpfen aus der Kfz-Betankung in den Tankstellentank	80	28.4	14.7	144.0	69.0	5.07	4.70
oder: Aktivkohlefilter im Kfz	92	32.7	16.9	65.6	27.7	2.01	1.64

¹⁾ Die Angaben beziehen sich auf die Emissionssituation im Jahr 1987.

²⁾ Die Angaben beziehen sich auf das Emissionsniveau, das sich im Jahr 2005 ergeben würde, wenn - ausgehend von der Emissionssituation in 1987 - keine Minderungsmaßnahmen durchgeführt würden.

Die spezifischen Minderungskosten dieser Maßnahmen liegen über den Werten, welche für Prozessanlagen in Raffinerien abgeschätzt wurden (vgl. Tabelle 6.3). Insbesondere die

Einrichtung der Gaspandlung bei der Kfz-Betankung an den zahlreichen Straßentankstellen (Ende 1987 ca. 19500 Tankstellen im Bundesgebiet) ist mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden.

Nach /WUNDERLICH, 1986/ können die Grenzwerte der TA Luft nur in Kombination derartiger Maßnahmen mit einer Nachverbrennungsanlage - bei einer relativ geringen zusätzlichen Emissionsminderung - eingehalten werden. Die Investitionskosten für Nachverbrennungsanlagen sind zwar niedriger als diejenigen von Rückgewinnungsanlagen, es muß aber unter Umständen mit höheren Betriebs- bzw. Brennstoffkosten gerechnet werden.

Werden Nachverbrennungsanlagen im Bereich von Raffinerien und Zwischenlagern bevorzugt berücksichtigt, verringern sich unter Umständen die Minderungskosten. Die in diesem Kontext gebotene, sinnvolle Nutzungsmöglichkeit der Abwärme ist aber nicht immer zwangsläufig gegeben.

7 Veränderung der Immissionskonzentration von Ozon bei Ausschöpfung des technischen Potentials zur Emissionsminderung der Vorläufersubstanzen

Bedingt durch die Komplexität und Vielschichtigkeit von luftchemischen Reaktionen, die zur Bildung bzw. zum Abbau von Ozon in der Troposphäre beitragen, können zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine verlässlichen Rückschlüsse gezogen werden, inwieweit durch die Minderung der Emissionen von Vorläufersubstanzen aus bestimmten Quellen eine allgemeine Verringerung der Ozon-Immissionskonzentration zu erwarten ist. Dies gilt auch für die hier erarbeiteten Ergebnisse.

Aussagen über die Ozonbildung in der Troposphäre lassen sich nur ableiten, wenn der zeitliche Verlauf und die räumliche Verteilung der Emissionen der Vorläufersubstanzen in möglichst hoher Auflösung bekannt sind (z.B. stündliche Emissionswerte für Rasterelemente mit einer Kantenlänge von 1 km * 1 km). Erforderlich ist außerdem die Erfassung der jeweiligen Quellhöhen, eine weitergehende Differenzierung der emittierten Stoffe, wie z.B. die Aufspaltung von NO_x in NO und NO₂, sowie die Unterteilung der VOC-Emissionen in verschiedene Gruppen (die gängigen Luftchemiemodelle stellen hier unterschiedliche Anforderungen an die Eingangsdaten). Wird ein räumlich begrenztes Gebiet untersucht, muß zusätzlich festgestellt werden, welche Schadstoffmengen von außerhalb eingetragen werden. Ferner sind meteorologische Parameter wie z.B. Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Sonneneinstrahlung usw. zu erfassen.

Bei den hier diskutierten Minderungsmaßnahmen führt - zumindest im Bezugsjahr 1987 - nur die NO_x-Minderung zu einer deutlichen Veränderung der Gesamtemissionssituation der einzelnen Schadstoffe. Dies wird durch Tabelle 7.1 verdeutlicht, in welcher für Minderungsmaßnahmen, die hohe technische Minderungspotentiale aufweisen, die Auswirkungen auf die Gesamtemissionen angegeben sind.

Insgesamt könnte, bei alleiniger Betrachtung die hier diskutierten Minderungsmaßnahmen, eine Verschiebung des NO_x/NMVOC-Verhältnisses hin zu niedrigeren Werten eintreten. Daß mit einer solchen ungleichmäßigen Emissionsreduzierung nicht notwendigerweise eine Verringerung der troposphärischen Ozonkonzentration einhergeht, sei durch ein in Abb. 7.1 wiedergegebenes Isolethendiagramm verdeutlicht /BRUCKMANN, 1983/. Aufgezeichnet sind hier die Linien gleicher Photooxidantien-Konzentration, die bei unterschiedlichen Konzentrationen an Vorläufersubstanzen in der Atmosphäre auftreten können.

Tabelle 7.1

**Auswirkungen ausgewählter Minderungsmaßnahmen auf die Emissionen
ozonbildender Spurengase
Bezugsjahre 1987¹⁾ und 2005²⁾**

Maßnahmen	Minderungs- potential in kt/a		Minderung der energie- bedingten Emissionen stat. Quellen in %		Minderung der Gesamtemission in % ³⁾
	1987	2005	1987	2005	1987
<u>NOx-Minderung:</u>					
SCR und kombinierte Primärmaßnahmen in öf. Kraft- und Fern- heizwerken	432	612	47	57	15
SCR in Industrie- feuerungen	110	114	12	11	4
Gesamt	542	726	59	68	19
<u>NMVOc-Minderung:</u>					
Anlagenwartung und Ab- deckung des Ölabschei- ders in Raffinerien	12	10	6	7	0.5
Minderung von Tankla- geremissionen und Gas- pendelung bzw. Dämpfe- rückgewinnung bei Ben- zinumschlag	99	51	49	36	4.0
Gesamt	111	61	55	43	4.5

¹⁾ Die Angaben beziehen sich auf die Emissionssituation im Jahr 1987.

²⁾ Die Angaben beziehen sich auf das Emissionsniveau, das sich im Jahr 2005 ergeben würde, wenn - ausgehend von der Emissionssituation in 1987 - keine Minderungsmaßnahmen durchgeführt würden.

³⁾ Bezogen auf die Gesamtemissionen im Jahr 1986. Der Anteil der geminderten NMVOc-Emissionen bezieht sich auf die VOC-Gesamtemissionen

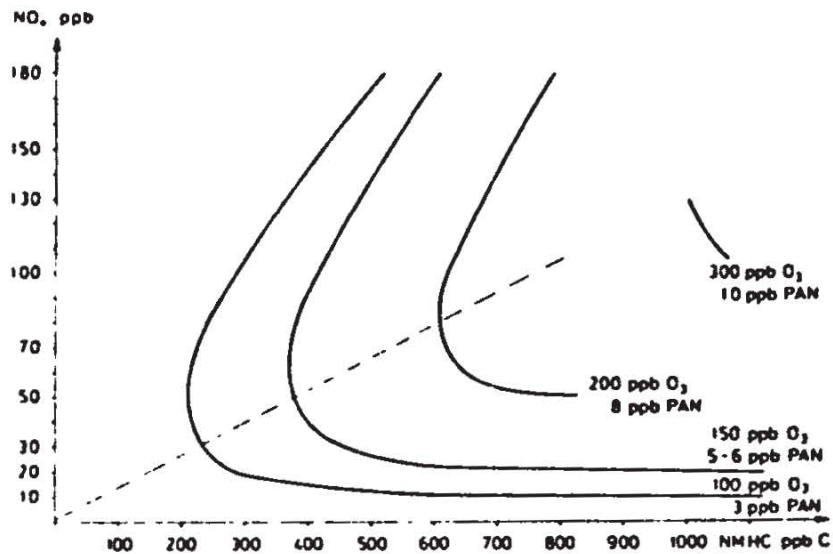


Abb. 7.1: Isoplethendiagramm für die Bildung von Photooxidantien
/BRUCKMANN, 1983/

Je nachdem, welche örtlichen bzw. zeitlichen Konzentrationsverhältnisse von NO_x/NMVOC vorliegen, kann bei einer mehr oder weniger einseitigen Verringerung der NO_x -Konzentrationen möglicherweise sogar eine verstärkte Ozonbildung auftreten.

Allgemeingültige Aussagen lassen sich aus diesem Diagramm allerdings nicht ableiten, da die dargestellten Iso-Linien je nach den atmosphärischen und sonstigen Rahmenbedingungen unterschiedliche Formen aufweisen können.

8 Schlußbetrachtung und Ausblick

Wesentliches Ziel der vorliegenden Arbeit zum Studienkomplex A.5.4 war es, mögliche Maßnahmen zur Minderung energiebedingter Emissionen der Spurengase NO_x, CO und NMVOC aus stationären Quellen darzustellen und zu diskutieren. Wenngleich diese Spurengase nach dem derzeitigen Kenntnisstand keinen direkten Einfluß auf das Klima ausüben, ist ihre Bedeutung in der Fähigkeit zur Bildung von klimarelevantem, troposphärischem Ozon zu sehen.

In Anbetracht des vorgegebenen, zeitlich eng begrenzten Rahmens dieser Studie ist zu betonen, daß die gewonnenen Ergebnisse zum Teil auf vereinfachenden Annahmen beruhen, und deshalb in erster Linie als Orientierungswerte zu verstehen sind. Genauere Analysen und Untersuchungen bleiben längerfristigeren Forschungsarbeiten vorbehalten.

Im einzelnen hat sich gezeigt, daß derzeit schon zahlreiche Maßnahmen zur NO_x-Minderung verfügbar sind, insbesondere im Bereich der hier herausgegriffenen genehmigungspflichtigen Feuerungsanlagen der öffentlichen Kraft- und Fernheizwerke und der Industrie. Verschiedene Maßnahmen sind teilweise bereits im Einsatz bzw. in der Planung, um die Einhaltung der gesetzlich verankerten Emissionsgrenzwerte gewährleisten zu können. Auszuklammern sind allerdings Prozessfeuerungen in der Industrie, für die gegenwärtig noch keine allgemein einsetzbaren Minderungstechnologien angegeben werden können. In diesem Punkt wäre weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeit notwendig, um das für die hier ausgewählten Maßnahmen abgeschätzte Minderungspotential zu erhöhen. Erwartungsgemäß ist die Ausschöpfung des technischen Minderungspotentials der diskutierten Maßnahmen zum Teil mit hohen Minderungskosten verbunden. Durch die gesetzlich verankerten, künftig einzuhaltenden NO_x-Emissionsgrenzwerte für Feuerungsanlagen mit hoher Feuerungswärmeleistung ist bis Mitte der neunziger Jahre mit einer deutlichen Verringerung der NO_x-Emissionen dieser Emittentengruppen zu rechnen. Vor allem die NO_x-Emissionen aus Feuerungsanlagen von Haushalten rücken dann dementsprechend in den Vordergrund. Auch hier stehen bereits verschiedene Maßnahmen zur NO_x-Minderung zur Verfügung, die allein aus Zeitgründen in dieser Studie unberücksichtigt bleiben.

Es ist weiterhin festzustellen, daß zur Minderung von CO- und NMVOC-Emissionen aus kleineren Feuerungsanlagen bisher keine wesentlichen konstruktionsseitigen Maßnahmen verfügbar sind. Die Entwicklung solcher Maßnahmen wäre insbesondere für die in hohem Maße emissionsrelevanten Feststofffeuerungen von Bedeutung. Eine kurzfristige Minderung der CO- und NMVOC-Emissionen wäre durch ein verändertes Nutzerverhalten zu

erreichen. Der Umfang der dadurch erzielbaren Emissionsminderung läßt sich allerdings kaum quantifizieren.

Geeignete Maßnahmen zur Minderung von NMVOC-Emissionen im Raffineriebereich und bei der Lagerung und dem Umschlag von Benzin sind dagegen bekannt. Für verschiedene Emittentenbereiche ist die künftige Einführung derartiger Maßnahmen in der TA Luft bereits festgelegt, insbesondere im Raffineriebereich zum Teil auch schon verwirklicht. Die dargestellten Maßnahmen können zu einer erheblichen Minderung der energiebedingten Emissionen aus stationären Quellen führen, deren Anteil an den NMVOC-Gesamtemissionen ist jedoch vergleichsweise klein. Die Durchführung verschiedener Maßnahmen, insbesondere im Raffineriebereich, ist nach den vorgenommenen Abschätzungen zum Teil auch mit Kosteneinsparungen verbunden. Dies beruht nicht zuletzt darauf, daß der Wert von zurückgewonnenen Produkten den Maßnahmen gutgeschrieben werden kann.

In welcher Hinsicht durch die ausgewählten Minderungsmaßnahmen für NO_x und NMVOC eine Änderung der Immissionssituation von Ozon zu erwarten ist, kann derzeit nicht angegeben werden. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, daß bei einer zu einseitigen Minderung von NO_x-Emissionen unter bestimmten Voraussetzungen erhöhte Ozonkonzentrationen auftreten können.

Klimarelevante N₂O-Emissionen aus stationären Feuerungs- und DeNO_x-Anlagen, die hier am Rande ebenfalls diskutiert wurden, lassen aufgrund der grob abgeschätzten Gesamtmengen die Entwicklung von entsprechenden Vermeidungstechniken nicht vordringlich erscheinen. Es wird davon ausgegangen, daß andere - insbesondere biogene Quellen - in weitaus höherem Maße zu den Gesamtemissionen beitragen.

Literatur:

BEHLING ET AL., 1989:

Rückgewinnung von Kohlenwasserstoffen aus Abluft mit Hilfe von Membranen. Umwelt (VDI) 19 (1989) Nr. 3, Sonderteil: Sonderlösungen der Luftreinhaltung, S. L18-L23

BIERL, 1979:

Emissionen aus Dichtelementen, Auffinden, Ursachen. In: VDI-Berichte Nr. 339, S. 45-50. Düsseldorf: VDI-Verlag 1979

BOYSEN ET AL., in Vorb.:

Kosten-Effektivitäts-Analyse von Maßnahmen zur Minderung von SO₂- und NO_x-Emissionen in Baden-Württemberg für alle Emittentengruppen unter besonderer Berücksichtigung regionaler Aspekte. (in Vorbereitung)

BRUCKMANN, 1983:

Bildung von Säuren und Oxidantien durch Gasphasenreaktionen. In: VDI (Hrsg.): Saure Niederschläge - Acid Precipitation. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH 1983

CONCAWE, 1987:

Cost-Effectiveness of Hydrocarbon Emission Controls in Refineries from Crude Oil Receipt to Product Dispatch. Report no. 87/52, Den Haag 1987

CONCAWE, 1986:

Hydrocarbon Emissions from Gasoline Storage and Distribution Systems. Report no. 85/54, Den Haag 1986

ENQUETE-KOMMISSION, 1988:

Erster Zwischenbericht der Enquete-Kommission Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre. Deutscher Bundestag, Drucksache 11/3246, 1988

EPA, 1987:

EPA Workshop on N₂O-Emission from Combustion, Boulder/Colorado, September 1987

EPA, 1989:

Policy Options for Stabilizing Global Climate. Draft - Report to Congress, February 1989.
(Arbeitsunterlage 11/339, 09.08.1989)

GEIGER ET AL., 1989:

Energieträger- und Emissionsmatrix. Studienkomplex A 1.1. München: Lehrstuhl für
Energiewirtschaft und Kraftwerkstechnik, TU München, 1989

GFAVO, 1983:

Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verord-
nung über Großfeuerungsanlagen - 13.BImSchV) vom 22.06.1983 (BGBl. I S. 719)

GOETHEL, 1988:

Kohlenwasserstoff-Emissionen aus Mineralö Raffinerien. Erdöl-Erdgas-Kohle 104 (1988)
Nr. 5, S. 221-224

IVD, 1988:

Schadstoffemissionen von Kleinf Feuerungen. Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkes-
selwesen der Universität Stuttgart - Abteilung Reinhaltung der Luft -, Bericht Nr. 11,
1988

JACOBS ET AL., 1988:

Bedeutung des N₂O innerhalb der Stickoxidemissionen. VGB Kraftwerkstechnik 8/1988,
S. 841-843

JUNG, 1988:

Investitionsaufwand für die SO₂- und NO_x-Minderung in der deutschen Elektrizitätswirt-
schaft. VGB Kraftwerkstechnik 68 (1988) Nr. 2, S. 154-157

KOEHL ET AL., 1986:

Emissionskontrolle bei der Betankung von Kraftfahrzeugen in den Vereinigten Staaten.
Erdöl-Erdgas-Kohle 102 (1986) Nr. 10, S. 457-462

KOLAR, 1986:

NO_x-Grenzwerte und Emissionsminderungsmaßnahmen im internationalen Vergleich. gas
wärme international 35 (1986) Nr. 4, S. 227-238

KREMER, 1986:

Grundlagen der NO_x-Entstehung und Minderung. gas wärme international 35 (1986) Nr. 4, S. 239-246

LINAK ET AL., 1988:

N₂O-Emissions from Fossil Fuel Combustion. US-EPA, Research Triangle Park, North Carolina

MWV, 1989:

Persönliche Mitteilung Mineralölwirtschaftsverband, 1989

MUZIO et al., 1988:

Measurement of N₂O from Combustion Sources. Fossil Fuel Research Corporation, Laguna Hills, California

ÖKO-INSTITUT, 1989:

Zusammenstellung von klimarelevanten Emissionsdaten für Energiesysteme in der BRD. Darmstadt, Endbericht August 1989

PROGNOS, 1987:

Rationelle Energieverwendung und -erzeugung ohne Kernenergienutzung: Möglichkeiten sowie energetische, ökologische und wirtschaftliche Auswirkungen. Untersuchung im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie des Landes Nordrhein-Westfalen, Basel, Köln, Oktober 1987

SCHÄRER ET AL., 1985

Zur Wirtschaftlichkeit der NO_x-Abgasreinigung bei Großfeuerungsanlagen. In: Dokumentation Rauchgasreinigung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985

SCHMIDT, 1989:

Kohlenwasserstoff-Emissionen - Methoden zu ihrer Verringerung bei der Verladung von Motorkraftstoffen. Energiewirtschaftliche Tagesfragen 39 (1989) Nr. 4, S. 222-225

SCHROD ET AL., 1985:

Verfahren zur Minderung von NO_x-Emissionen in Rauchgasen. Chem.-Ing.-Tech. 57 (1985) Nr. 9, S. 717-727

SCHWEFER ET AL., 1984:

Behandlung sowie Beseitigung der bei der Lagerung und Verladung brennbarer Flüssigkeiten entstehenden Dämpfe. Chem.-Ing.-Tech. 56 (1984) Nr. 4, S. 286-291

TA LUFT, 1986:

Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft - TA Luft) vom 27.02.1986 (GMBI. S. 95)

UBA, 1989:

Daten zur Umwelt 1988/89. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1989

UMK, 1984:

Interpretation des Standes der Technik zur Minderung der Stickstoffoxidemissionen aus Großfeuerungsanlagen. Beschluß der Umweltministerkonferenz vom 05.04.1984

VDEW, 1988:

Liste der Kraftwerke der öffentlichen Stromversorgung mit großtechnischen Anlagen zur Stickoxidminderung - Stand: Juni 1988. VDEW-Pressekonferenz, Frankfurt am Main, 28.07.1988

VDI, 1985:

Emissionsminderung: Raffinerieferne Mineralölvertriebsläger. VDI-Richtlinien 347
9, Juli 1985

WEBER ET AL., 1986:

Stickoxid-Bremsen - Überblick über DeNO_x-Verfahren. Energie 38 (1986) Nr. 4, S. 10-15

WUEBBLES ET AL., 1988:

A Primer On Greenhouse Gases - CO₂. National Technical Information Service, U.S. Department of Commerce, Springfield, Virginia 22161, 1988.

WUI, 1986:

Bericht der Arbeitsgruppe >> Wirtschaftliche Entwicklung - Umwelt - Industrielle Produktion (WUI) << im Auftrag der Landesregierung Baden-Württemberg, herausgegeben vom Staatsministerium, Stuttgart 1986

WUNDERLICH, 1986:

**Tankstellen und Mineralöltanklager. In: VDI-Berichte Nr. 605, S. 393-403. Düsseldorf:
VDI-Verlag 1986**