

Analyse und technisch-ökologische Evaluierung des SCR-Verfahrens zur Stickstoffoxidminderung

Diplomarbeit

Institut für Technische Chemie und Polymerchemie
Universität Karlsruhe (TH)
Arbeitskreis Prof. Dr. Olaf Deutschmann

von

cand. Wi. Ing.
Christian Hauck

Karlsruhe, Juni 2010

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Bedeutung der Luftqualität	1
1.2. NO ₂ /NO _x -Problematik	4
1.3. Aufgabenstellung	8
2. Theorie	9
2.1. Verbrennung	9
2.2. Entstehung von Schadstoffen	9
2.3. Stickstoffoxide	10
2.3.1. Stickstoffmonoxid	11
2.3.2. Stickstoffdioxid	13
2.4. Minderungsmaßnahmen	14
2.4.1. Primäre Maßnahmen	15
2.4.2. Sekundäre Maßnahmen	16
2.4.2.1. Drei-Wege-Katalysator	16
2.4.2.2. NO _x -Speicher-Reduktionsverfahren	18
2.4.2.3. Nicht-selektive Katalytische Reduktion	19
2.5. Selektive katalytische Reduktion (SCR)	20
2.5.1. Die Chemie der SCR-Reaktion	20
2.5.2. SCR-Katalysatoren	21
3. Stickstoffdioxid	23
3.1. Gesetzliche Grundlagen	23
3.1.1. Euro-Abgasnormen	25
3.1.2. Umweltzone	27
3.2. Ökologische Auswirkungen	28
3.3. Humantoxizität	30

4. Analyse der Luftschadstoffbelastung in Baden-Württemberg	33
4.1. Einführung	33
4.2. Ergebnisse der Luftschadstoffbelastungen	34
4.3. Ursachenanalyse der Stickstoffdioxidemissionen	39
4.4. Das Luftmessnetz	45
4.4.1. Regierungsbezirk Stuttgart	45
4.4.1.1. Messort Stuttgart - Am Neckartor	46
4.4.2. Regierungsbezirk Karlsruhe	50
4.4.2.1. Messort Karlsruhe - Straße	51
4.4.3. Regierungsbezirk Freiburg	54
4.4.3.1. Messort Freiburg - Schwarzwaldstraße	55
4.4.4. Regierungsbezirk Tübingen	58
4.4.4.1. Messort Ulm - Zinglerstraße	59
4.5. Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität	62
4.5.1. Industrie und Gewerbe	62
4.5.2. Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)	62
4.5.3. Kleinf Feuerungsanlagen	63
4.5.4. Sonstige Maßnahmen	63
5. Stickstoffdioxidemissionen des Verkehrs	64
5.1. Bedeutung des Verkehrs	64
5.2. Entwicklung der NO ₂ -Belastung	65
5.3. Maßnahmen zur Senkung der Abgasemissionen	69
5.3.1. Umweltzone	69
5.3.2. Geschwindigkeitsreduzierung	71
5.3.3. Generelles Fahrverbot	72
5.3.4. Verbesserung des Verkehrsflusses	75
5.3.5. Nachrüstung / Neuanschaffung	76
5.3.6. Einführung Euro 6/VI	77

6. Einsatz des SCR-Verfahrens am Beispiel der AdBlue Technologie	79
6.1. Stand der Technik	79
6.2. Harnstoff	81
6.3. AdBlue	82
6.4. Minderungspotenzial	83
6.4.1. Diesel-Pkw	83
6.4.2. Leichte Nutzfahrzeuge (lNfz)	85
6.4.3. Schwere Nutzfahrzeuge (sNfz)	87
6.4.4. Busse	89
6.5. Kosten	92
7. Umweltbilanz	94
7.1. Grundlagen der Umweltbilanz	94
7.2. Fließschemata des SCR-Verfahrens	98
7.2.1. Erdgas	99
7.2.2. Harnstoff	100
7.2.3. AdBlue	103
7.2.4. Katalysator	104
7.3. Kohlenstoffdioxid- und Stickoxidbilanz	108
7.3.1. Pkw	108
7.3.2. Lkw	109
7.3.3. Bus / Leichte Nutzfahrzeuge	110
7.4. Ergebnisse	111
8. Fazit	113
9. Literaturverzeichnis	115

Kapitel 1

Einleitung

1.1. Bedeutung der Luftqualität

Die Grundlage der Energiegewinnung sowie der Mobilität moderner Gesellschaften ist die Verbrennung fossiler Energieträger und die damit verbundene Emission großer Mengen an Luftschadstoffen. Allgemein werden als Luftverunreinigungen alle Stoffe angesehen, die die natürliche Zusammensetzung der Luft verändern, wohingegen bei Schadstoffen die schädliche Wirkung der Luftverunreinigung bekannt sein muss. Grundsätzlich wird zwischen natürlichen Quellen und solchen anthropogener Herkunft unterschieden, wobei in dicht besiedelten Ballungsgebieten bis zu 90% der Luftschadstoffe durch menschliche Aktivitäten verursacht werden.

Die Ausbreitung der emittierten Luftschadstoffe in der Atmosphäre wird als Transmission bezeichnet, bei der es im Zuge der Transportvorgänge zu einer Verdünnung und chemischen Veränderung der Schadstoffe kommt. Nach der Emission der Schadstoffe und deren Transport in der Atmosphäre ist das Konzentrationsausmaß der luftfremden Stoffe in der Atemluft - die Immission - ein wesentliches Kriterium für die Gesundheit von Mensch und Umwelt. Insgesamt leiden alle Oberflächen unter dem gasförmigen, flüssigen und festen Schadstoffeintrag über die Luft. Luftschadstoffe müssen daher an ihrer Quelle bekämpft werden, denn einmal in die Atmosphäre gelangt, folgen sie ihrem natürlichen Kreislauf und belasten sowohl die Atemluft als auch in Form von Ablagerungen (Deposition) den Boden und das Wasser (siehe Abbildung 1.1.). Die Aufgabe einer vorsorgenden Luftreinhaltepolitik ist es daher die schädlichen Auswirkungen der Luftverschmutzungen auf den Menschen und die Umwelt frühzeitig zu erkennen und die Ursachen gezielt zu beseitigen [38b, 38d].

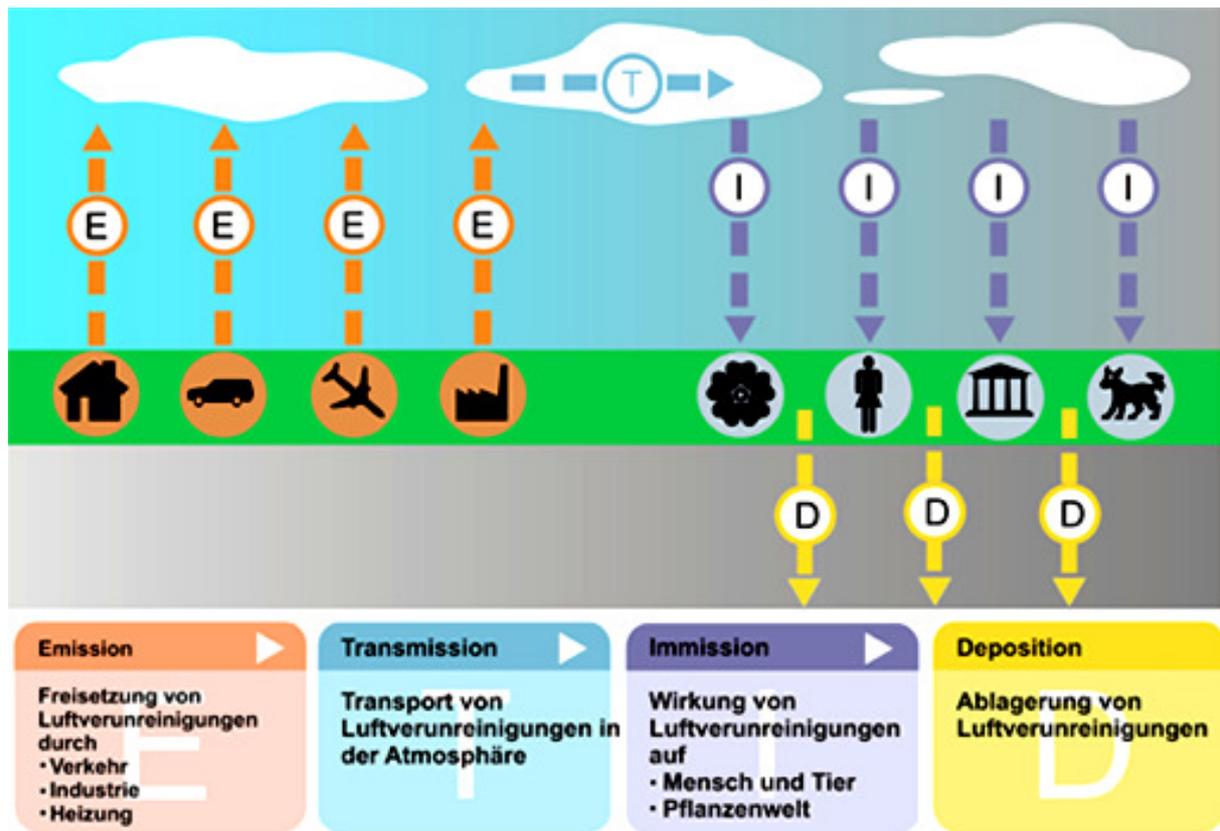


Abbildung 1.1.: Luftschadstoffkreislauf [38d]

Auch Analysen der Weltgesundheitsorganisation (WHO) haben gezeigt, dass Luftverschmutzungen inzwischen ein weltweites Problem mit gravierenden Auswirkungen für Mensch, Flora und Fauna darstellen [67]. Zu den Messbereichen zählen urbane Gebiete und Regionen mit hohem Verkehrsaufkommen, da hier der Großteil der Weltbevölkerung lebt und gleichzeitig die höchsten Konzentrationen an Luftschadstoffen zu verzeichnen sind.

Legt man die europäische Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft [19a] zugrunde und vergleicht diese mit den weltweiten Messwerten (siehe Tabelle 1.1.) so bleibt festzuhalten, dass in allen Schadstoffbereichen weitreichende Anstrengungen zur Senkung notwendig sind.

Region	jährliche Durchschnittskonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)			
	PM ₁₀	Stickoxid	Schwefeloxid	Ozon (Max 1-h Konzentration)
Afrika	40 - 150	35 - 65	10 - 100	120 - 300
Asien	35 - 220	20 - 75	6 - 65	100 - 250
Australien / Neuseeland	28 - 127	11 - 28	3 - 17	120 - 310
USA / Kanada	20 - 60	35 - 70	9 - 35	150 - 380
Europa	20 - 70	18 - 57	8 - 36	150 - 350
Lateinamerika	30 - 129	30 - 82	40 - 70	200 - 600
EU-Grenzwert	40	40	20	180 - 240

Tabelle 1.1.: Werte der jährlichen Durchschnittskonzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) für verschiedene Schadstoffe auf den Erdteilen anhand von städtischen Daten [19a, 67]

1.2. NO₂/NO_x-Problematik

Die vorliegende Diplomarbeit legt ihr Hauptaugenmerk auf Stickoxide (NO_x), die Sammelbezeichnung für die gasförmigen Oxide des Stickstoffes, Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂). Hierbei wird vor allem auf das Stickstoffdioxid (NO₂), einen der aktuell problematischsten Schadstoffe, eingegangen, für den in der Europäischen Union seit dem 01.01.2010 verbindliche neue Grenzwerte gelten. Die NO₂-Belastung der Luft darf im Jahresdurchschnitt nicht mehr als 40 µg/m³ betragen und der über eine Stunde gemittelte NO₂-Grenzwert von 200 µg/m³ darf nicht mehr als 18 Mal im Jahr überschritten werden [19a]. Die Analysen der NO_x-Emissionen und -Immissionen konzentrieren sich hierbei zunächst auf Deutschland und werden im weiteren Verlauf der Arbeit Baden-Württemberg als Schwerpunkt haben.

In Deutschland sind die NO_x-Emissionen zwischen 1990 und 2006 um ca. 50% zurückgegangen (siehe Abbildung 1.2.).

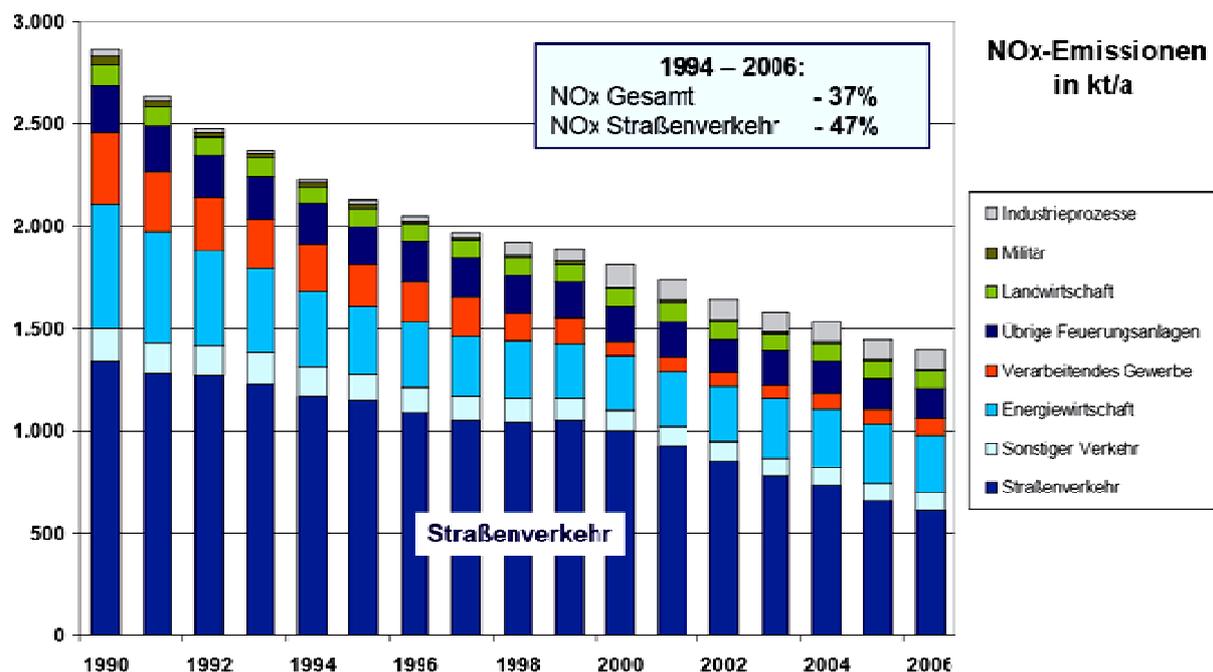


Abbildung 1.2.: NO_x-Emissionen in Deutschland 1990-2006 [60a]

Doch trotz einer Minderung der Stickstoffoxidemissionen ist nur ein geringer Rückgang der NO₂-Konzentration zu verzeichnen. Die Immissionsmessungen (siehe Abbildungen 1.3./1.4./1.5.) in verschiedenen Belastungsregimes (ländlicher Hintergrund / städtischer Hintergrund / städtisch verkehrsnah) zeigen deutlich, dass

in allen Bereichen die Minderung der NO_x -Konzentration fast ausschließlich der NO Absenkung geschuldet ist [60a].

Das Regime „ländlicher Hintergrund“ repräsentiert dabei Gebiete, in denen die Luftqualität weitgehend unbeeinflusst von lokalen Emissionen ist, das sogenannte großräumige Belastungsniveau. Das Regime „städtischer Hintergrund“ entspricht Gebieten, in denen die gemessenen Schadstoffkonzentrationen aus städtischen Emissionen (Straßenverkehr, Hausbrand etc.) und dem großräumigen Hintergrund bestehen. Die Messstationen des Regimes „städtisch verkehrsnah“ befinden sich an stark frequentierten Straßen, bei denen sich zur städtischen und ländlichen Hintergrundbelastung noch die direkten Emissionen des Straßenverkehrs addieren.

Im Zeitraum von 1995 bis 2007 nahmen die NO_x -Jahresmittelwertkonzentrationen deutlich ab (siehe Abbildung 1.3.). Die Absenkung entspricht dem nahezu identischen Verlauf des NO -Rückgangs (siehe Abbildung 1.4.). Die Rückgänge der NO_x -Konzentrationen sind in den verkehrsnahen Bereichen am stärksten ausgeprägt und nehmen zu den ländlichen Gebieten hin ab.

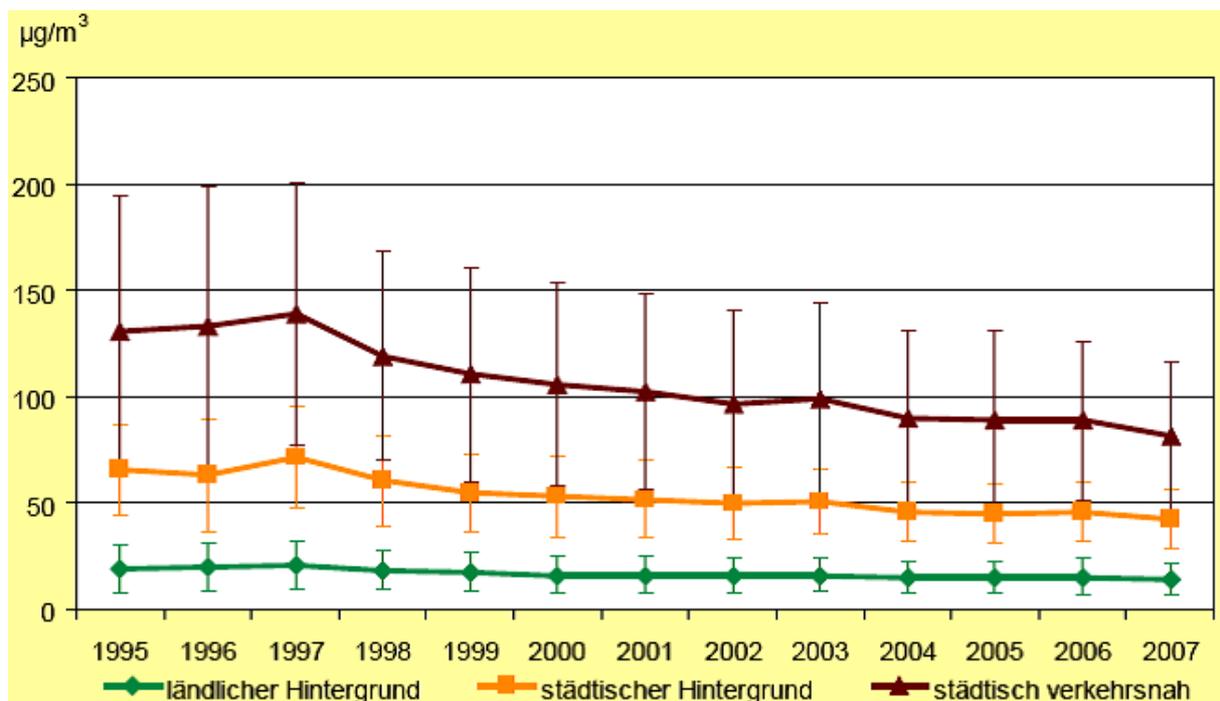


Abbildung 1.3.: Entwicklung der Jahresmittelwerte der NO_x -Konzentration im Mittel über die Belastungsregimes „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“ im Zeitraum 1995 bis 2007 (mit Standardabweichung) [60a]

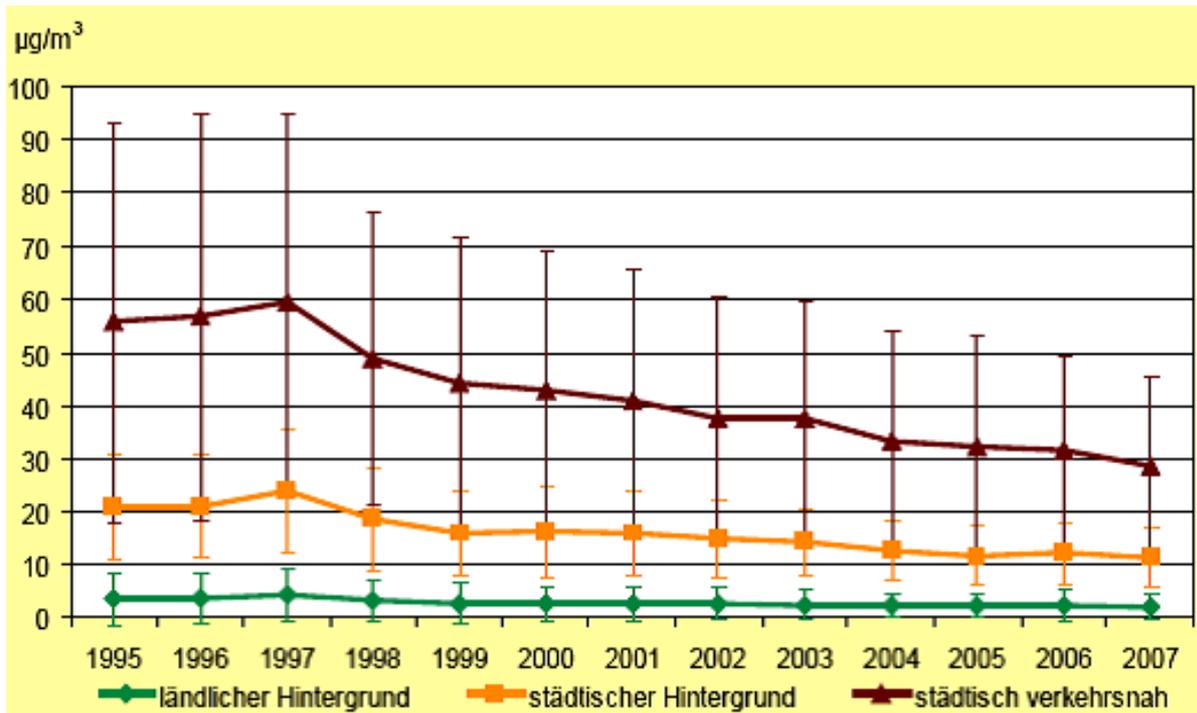


Abbildung 1.4.: Entwicklung der Jahresmittelwerte der NO-Konzentration im Mittel über die Belastungsregimes „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“ im Zeitraum 1995 bis 2007 (mit Standardabweichung) [60a]

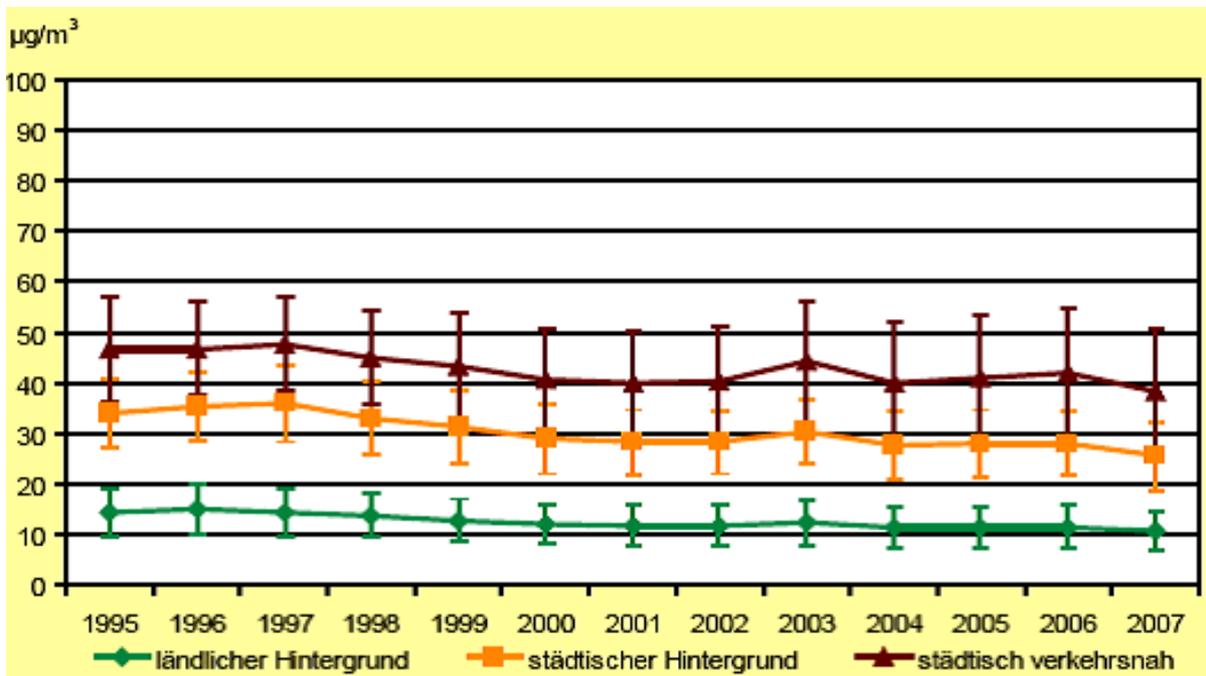


Abbildung 1.5.: Entwicklung der Jahresmittelwerte der NO₂-Konzentration im Mittel über die Belastungsregimes „ländlicher Hintergrund“, „städtischer Hintergrund“ und „städtisch verkehrsnah“ im Zeitraum 1995 bis 2007 (mit Standardabweichung) [60a]

Die Darstellung der Entwicklung der NO_2 -Konzentrationswerte im gleichen Zeitraum zeigt, dass sich die NO_2 -Jahresmittelwerte in städtisch verkehrsnahen Gebieten, im städtischen Hintergrund sowie im ländlichen Hintergrund kaum verändert haben (siehe Abbildung 1.5.). Dies hat zu einem wesentlich höheren NO_2/NO_x -Verhältnis in allen Belastungsregimes geführt. Die erkennbaren zwischenjährlichen Schwankungen aller Messungen sind vor allem auf witterungsbedingte Einflüsse zurückzuführen [60a].

Bei der Analyse der Daten ist festzustellen, dass der ab dem Jahr 2010 einzuhaltende Jahresgrenzwert für Stickstoffdioxid heute an vielen hoch belasteten Straßen in Deutschland überschritten wird. Wesentliche Ursache dafür sind die direkten NO_2 -Emissionen aus dem Kfz-Verkehr. Zudem wird NO_2 über eine luftchemische Reaktion mit Ozon aus den NO -Emissionen des lokalen Verkehrs gebildet (siehe Kapitel 2.3.). Weiterhin tragen die NO_2 -Emissionen des städtischen und regionalen Hintergrundes zur NO_2 -Belastung an einer Hauptverkehrsstraße bei. Auch die reine Ausrichtung der gesetzlichen Abgasgrenzwerte auf NO_x hat dazu geführt, dass die NO_2 -Konzentrationen nicht zurückgegangen sind. Vor allem durch den Anstieg des Anteils an Dieselfahrzeugen in der Fahrzeugflotte und veränderte Abgasnachbehandlungstechniken ist die NO_2 -Problematik heute besonders akut. Ein Erreichen der NO_2 -Luftqualitätsgrenzwerte wird in vielen Kommunen ohne weitreichende zusätzliche Maßnahmen kaum mehr möglich sein. Alle beteiligten Akteure (Politik, Industrie und Bürger) sind dazu angehalten sinnvolle Konzepte zur Minderung zu entwickeln und durchzusetzen [36].

1.3. Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist ein besseres Verständnis der NO_x-Problematik und die detaillierte Analyse der Entwicklungen auf politischer, gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Ebene.

In der Europäischen Union gelten ab dem 01.01.2010 verbindliche Immissionsgrenzwerte für Stickstoffdioxid. In den nächsten Jahren ist die Einhaltung dieses Grenzwertes eine der zentralen Aufgaben der Umweltpolitik aller EU-Mitgliedsländer. Exemplarisch für viele Regionen in der Europäischen Union untersucht diese Diplomarbeit zunächst auf Grundlage der Luftreinhalte- und Aktionspläne für Baden-Württemberg sowie den vorliegenden Umweltdaten von 2009 Art und Umfang der Emissionen, die Verursacher und die bisherigen Maßnahmen zur Reduktion. Im Folgenden wird das Verkehrswesen, als einem der maßgeblichen Emittenten von Stickstoffdioxid, einer genaueren Analyse unterzogen, wobei der Straßenverkehr von zentraler Bedeutung ist.

Die Einführung von Grenzwerten, Umweltzonen sowie Abgasnormen haben die Entwicklung und den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen angeregt. In dieser Arbeit wird, als eine Umsetzung dieser Systeme, das SCR-Verfahren untersucht, welches die Automobilindustrie durch das AdBlue System realisiert hat. Es soll auf der einen Seite gezeigt werden wie groß das Minderungspotenzial in Bezug zur Einhaltung der Grenzwerte ist und auf der anderen Seite welche Kosten für Umrüstung und Betrieb mit dieser Art der Abgasnachbehandlung verbunden sind.

Zuletzt wird eine Umweltbilanz für CO₂ und NO₂ entwickelt, welche die vollständige Produktionskette und den Einsatz der SCR-Technologie umfasst. Hierbei werden die Umweltbelastungen durch Produktion der verfahrensnotwendigen Einsatzstoffe, beginnend mit der Rohstoffförderung, über Herstellung der Katalysatoren sowie den veränderten Fahrzeugeinsatzbedingungen quantifiziert und bewertet.

Kapitel 2

Theorie

2.1. Verbrennung

„Die schnelle, sich selbst unterhaltende Oxidation von Brennstoffen, in der Regel von Kohlenwasserstoffen, unter Abgabe von Wärme und Licht wird im allgemeinen als Verbrennung,..., bezeichnet.“ [32].

Die komplexen Abläufe der Verbrennung fossiler Brennstoffe machen die Beschreibung der einzelnen Mechanismen, wie beispielsweise Strömungsmechanik, Reaktionskinetik oder von instationären Prozessen mit Zünd- und Löschvorgängen, sehr aufwendig. Es können häufig selbst unter vereinfachten Annahmen nur Teilaspekte der Verbrennung dargestellt werden. Aufgrund der Komplexität und durch die zunehmende Umweltbelastung durch Luftemissionen sind die Schadstoffbildung und insbesondere die Stickoxidentstehung im Folgenden die zentralen Themen [32, 64].

2.2. Entstehung von Schadstoffen

Wird ein Brennstoff auf Kohlenwasserstoffbasis verbrannt, so treten theoretisch laut Thermodynamik nur Kohlendioxid (CO_2) und Wasser (H_2O) als Produkte auf. Alle in der Praxis vorkommenden Verbrennungsprozesse sind aufgrund ihrer Kinetik jedoch unvollständig. Im realen Abgasstrom sind als Folge der Inhomogenität des Verbrennungsgemisches noch Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannte Kohlenwasserstoffe (HC) enthalten. Stickoxide (NO_x) entstehen in Sekundärreaktionen (siehe Abschnitt 2.3.) des Sauerstoffes der Verbrennungsluft mit dem ebenfalls vorhandenen Stickstoff. Bei Dieselmotoren kommen als weitere Komponente Rußpartikel hinzu. Gängige Kraftstoffarten enthalten zusätzlich noch in geringen Mengen Schwefel, welcher im Zuge der Verbrennung zu Schwefeldioxid aufoxidiert wird. Im Abgastrakt können sich Sulfate und schweflige Säuren bilden [37].

Abbildung 2.1. zeigt als Beispiel die mittlere Abgaszusammensetzung eines direkt-einspritzenden Dieselmotors. Das Abgas besteht zu über 99% aus den Substanzen Stickstoff, Kohlendioxid, Wasser und Sauerstoff wobei die Schadstoffe lediglich einen Anteil von 0,3% ausmachen. Sie sind jedoch aufgrund ihres Einflusses auf das Weltklima und ihrer toxischen Wirkung in ihrem Ausstoß gesetzlich limitiert.

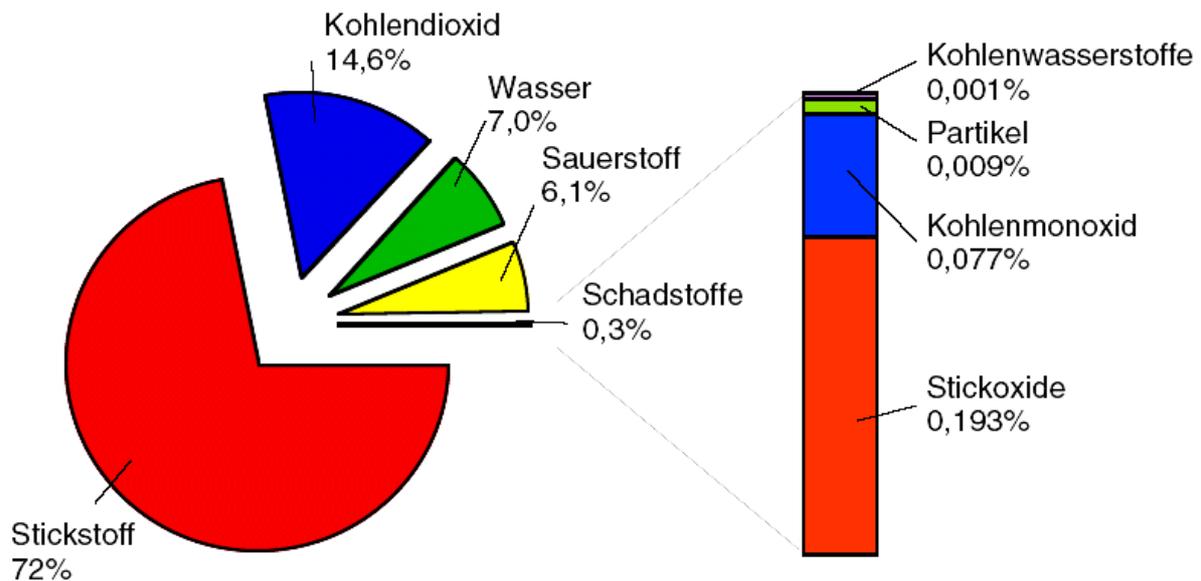


Abbildung 2.1.: Mittlere Abgaszusammensetzung eines direkt-einspritzenden Dieselmotors [33, 45]

2.3. Stickstoffoxide

Der Begriff Stickstoffoxide umfasst die Gruppe der bei der Verbrennung entstehenden Verbindungen von Stickstoff und Sauerstoff. Neben den Hauptvertretern Stickstoffmonoxid NO und Stickstoffdioxid NO₂, gemein hin als NO_x bezeichnet, werden ebenfalls Distickstoffoxid N₂O sowie in geringen Konzentrationen N₂O₃ und N₂O₅ gebildet. Die Stickoxidbildung erfolgt durch verschiedene Kettenreaktionen, die durch die Reaktionsbedingungen, den Brennstoff und die Prozessführung beeinflusst werden. Bei der Verbrennung wird zwischen drei NO-Bildungspfade unterschieden [32].

2.3.1. Stickstoffmonoxid

Thermisches Stickstoffmonoxid (Zeldovich-NO)

Bei sehr hohen Temperaturen ist die Oxidation von atmosphärischem Stickstoff nach dem thermischen Bildungsmechanismus, wie ihn Zeldovich erstmals 1946 beschrieb, die Hauptquelle für die NO-Emissionen [64].

Die drei wichtigsten Elementarreaktionen sind [28]:



Geschwindigkeitsbestimmend ist die Aufspaltung der Dreifachbindung an den Stickstoffmolekülen durch Sauerstoffatome, wobei die Geschwindigkeit dieser Reaktion eine starke Temperaturabhängigkeit aufweist. Thermisches NO bildet sich in nennenswerten Mengen bei Temperaturen über 2200 K [32, 64].

Promptes Stickstoffmonoxid (Fenimore-NO)

Dieser Mechanismus, der auf C. P. Fenimore von 1979 zurückgeht, ist stark vom Verhältnis von Brennstoff zu Luft abhängig und zeichnet sich dadurch aus, dass das NO äußerst schnell entsteht. Im Gegensatz zum thermischen NO wird das prompte NO nicht im Bereich des verbrannten Arbeitsmediums sondern an der Flammenfront gebildet. Hier entstehen besonders in sauerstoffarmen Vormischflammen Kohlenwasserstoffradikale, welche die Stickstoffmoleküle angreifen [64].



Die Folgereaktionen sind:



Bei der motorischen Verbrennung entstehen etwa 5-10% der Stickoxide über promptes NO [52].

Brennstoff-Stickstoffmonoxid

Der im Brennstoff enthaltene, chemisch gebundene Stickstoff wird bei der Verbrennung teilweise zu Stickstoffmonoxid umgesetzt. Vor Eintritt in die Flammenfront wird der Stickstoff zunächst in Radikale und Cyan-Verbindungen umgewandelt und anschließend mit dem Luftsauerstoff zu NO oxidiert. Die Reaktion ist nur gering temperaturabhängig und erfolgt meist ab Temperaturen über 800 °C.

Das Brennstoff-NO wird hauptsächlich bei der Kohleverbrennung emittiert, da selbst in hochwertiger Kohle ca. 1% Stickstoff gebunden ist. In Verbrennungsmotoren trägt das Brennstoff-NO nur in geringem Maße zu den Emissionen bei (ca. 1%), da der Stickstoffanteil in Kraftstoffen von Verbrennungsmotoren sehr niedrig ist (< 0,01 Gew.-%) [32, 49, 64].

2.3.2. Stickstoffdioxid

Stickstoffdioxid wird in der Regel durch die Reaktion von Stickstoffmonoxid mit HO_2 - und OH-Radikalen gebildet. In der Literatur sind eine Vielzahl von Bildungsmechanismen aufgeführt, die auch zum Teil ein Auftreten des NO_2 vor der NO -Bildung berücksichtigen. Folgende Reaktion ist jedoch am wahrscheinlichsten [54, 64]:



NO_2 kann während der Verbrennung, auf dem Weg zwischen Brennraum und Auspuffrohrmündung sowie in der offenen Atmosphäre gebildet werden. Unter atmosphärischen Bedingungen liegt das chemische Gleichgewicht auf der Seite des Stickstoffdioxids, wohingegen bei Temperaturen über 650°C nahezu ausschließlich NO vorhanden ist. Dieselmotoren erreichen einen Anteil von 10% bis 30% Stickstoffdioxid an der gesamten Stickoxidmenge [27].

Die wichtigsten Bildungsreaktionen der Stickoxide sind schematisch in Abbildung 2.2. zusammengefasst.

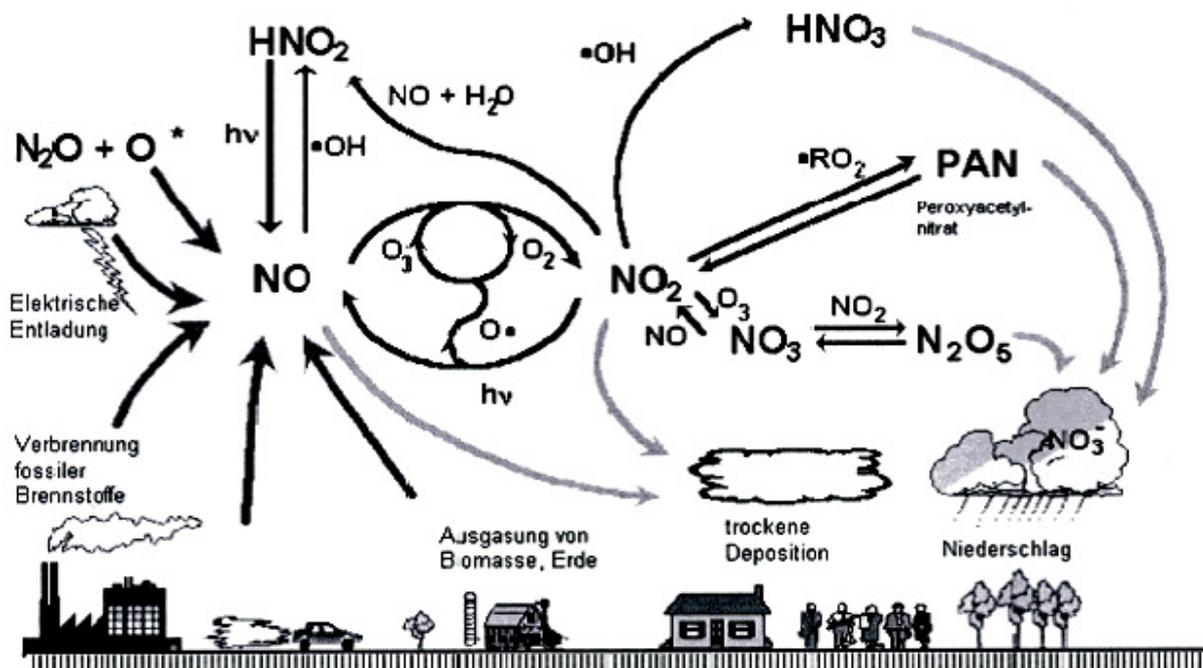


Abbildung 2.2.: Schema zur Chemie der Stickoxide in der Atmosphäre [70]

2.4. Minderungsmaßnahmen

Zur Verminderung von Schadstoffen im motorischen Abgas kann grundsätzlich zwischen innermotorischen (primären) Maßnahmen und Abgasnachbehandlungsmaßnahmen (sekundären) unterschieden werden. Innermotorische Eingriffe setzen bereits während der Schadstoffentstehung an. Durch gezielte Steuerung von Gemischbildung und Verbrennung werden emissionsrelevante Parameter günstig beeinflusst. Der Einflussnahme auf die Schadstoffemissionen sind allerdings Grenzen gesetzt, da relevante Verbrennungskenngrößen gegenläufige Auswirkungen auf die Schadstoffbildung der verschiedenen Komponenten haben. In Abbildung 2.3. ist als Beispiel der Zielkonflikt zwischen der NO_x - und der Partikelreduzierung dargestellt.

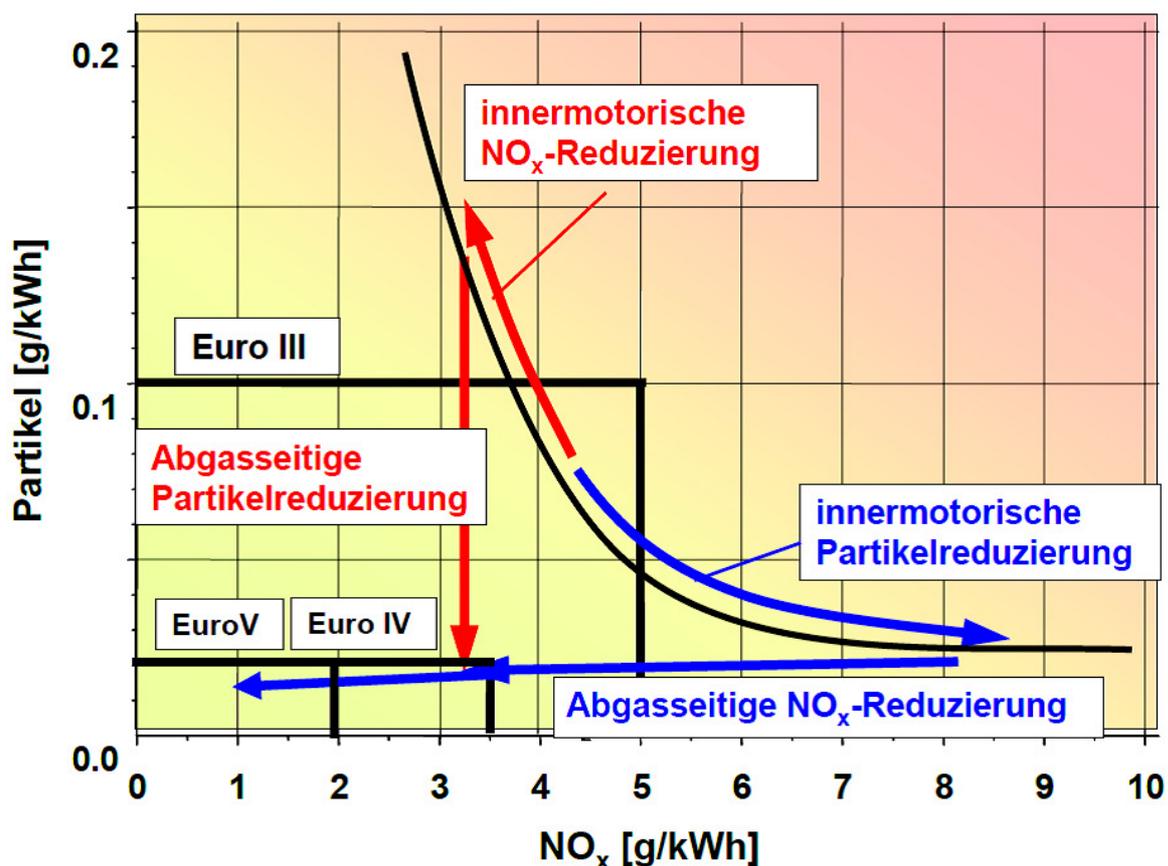


Abbildung 2.3.: Möglichkeiten der Stickoxid- und Partikelreduzierung [41]

Im Folgenden steht die Minderung des Stickoxidausstoßes im Vordergrund und wie diese insbesondere durch Abgasnachbehandlungssysteme zur Erreichung der Emissionsgrenzwerte realisiert wird.

2.4.1. Primäre Maßnahmen

Im Wesentlichen zielen innermotorische Maßnahmen auf die Absenkung der Spitztemperatur während der Verbrennung, da Stickoxide vor allem bei sehr hohen Temperaturen gebildet werden. Das größte Stickoxidminderungspotential liegt dabei in der frühen Phase der Verbrennung, da hier bereits hohe Temperaturen im Brennraum herrschen und die größten Verweilzeiten möglich sind [3]. Tabelle 2.1. zeigt die üblichen innermotorischen Maßnahmen.

Absenkung der Prozessspitztemperaturen	Vermeidung von lokalem Sauerstoffmangel	Langsame Verbrennung
<ul style="list-style-type: none"> - späte Einspritzung - Abgasrückführung (AGR) warm/kalt - Wassereinspritzung - Ladeluftkühlung 	<ul style="list-style-type: none"> - Absenkung der Drallzahl - Zentraler, muldenförmiger Brennraum - Zentrale Einspritzdüse - Reduzierung des Zündverzugs - Ladelufttemperaturregelung 	<ul style="list-style-type: none"> - lange Einspritzdauer - Einspritzmengenregelung - Kleiner Düsenlochdurchmesser - Einsatz von Common Rail - Erhöhung der Cetanzahl

Tabelle 2.1.: Innermotorische Maßnahmen zur NO_x -Reduktion [33]

Die lokalen Temperaturspitzen lassen sich durch Maßnahmen wie späte Einspritzung, Ladeluftkühlung, Abgasrückführung oder Wassereinspritzung absenken. Darüber hinaus wird durch eine optimierte Brennraumgestaltung, Variation des Einspritzdrucks, Staffelung der Einspritzung und Formung der Ladungsbewegung gezielt Einfluss auf Gemischbildung und Verbrennung genommen. Verfahren zur NO_x -Reduktion müssen immer in Verbindung mit ihren Auswirkungen gesehen werden, weil sich entweder der Wirkungsgrad verschlechtert und es somit zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs kommt oder aber sich die übrigen Emissionswerte verschlechtern. Die Erfüllung künftiger Abgasgrenzwerte macht aber eine Absenkung aller Schadstoffkomponenten notwendig, so dass ein Gesamtkonzept entwickelt werden muss, das die Abgasnachbehandlung mit einschließt [3].

2.4.2. Sekundäre Maßnahmen

Der Ansatzpunkt sekundärer Maßnahmen ist die Reduktion bereits gebildeter Stickoxide. Durch Abgasnachbehandlungssysteme werden bestimmte chemische Reaktionen unterstützt, die eine Umwandlung der Schadstoffe in unkritische Reaktionsprodukte bewirken. Im Folgenden werden verschiedene katalytische Verfahren vorgestellt, die heute zur Stickoxidminderung in Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Das zentrale Verfahren dieser Arbeit, die selektive katalytische Reduktion (SCR = **S**elective **C**atalytic **R**eduction), wird in Abschnitt 2.5. ausführlich behandelt.

2.4.2.1. Drei-Wege-Katalysator

Der Drei-Wege-Katalysator in Kraftfahrzeugen gehört zur Gruppe der Trägerkatalysatoren und setzt sich aus verschiedenen Teilen zusammen. Der Trägerkörper, meist eine wabenförmige, monolithische Keramik (Cordierit), ist mit katalytischen Materialien (Platin/Palladium/Rhodium) beschichtet. Diese katalytisch aktiven Substanzen werden auf einer Zwischenschicht, dem sogenannten Washcoat, aufgebracht, der als Fixierung und Oberflächenvergrößerung dient. Die drei Schadstoffklassen des Abgases Stickoxid, Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoff werden, wie in Abbildung 2.4. dargestellt, zu Wasser, elementarem Stickstoff und Kohlendioxid umgesetzt [32].

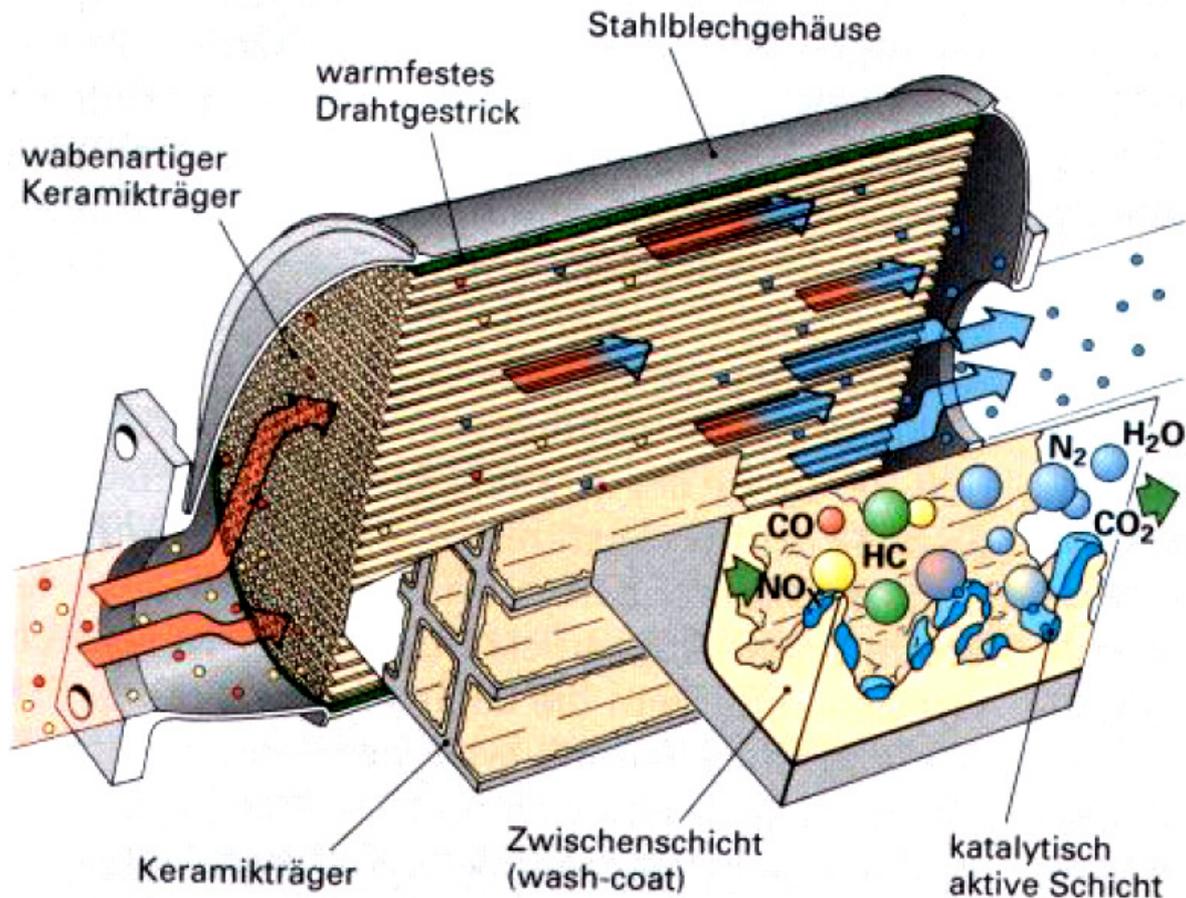


Abbildung 2.4.: Aufbau des Drei-Wege-Katalysators im Kfz [32]

Das Reduktionspotential des Katalysators hängt wesentlich von der Eintrittstemperatur und der Zusammensetzung des Abgases ab. Erst ab 400°C und bei einem korrekt geregelten Sauerstoffanteil findet eine Konvertierung der Schadstoffe von über 90% statt. Zur Regelung des Sauerstoffgehaltes misst eine sogenannte Lambda-Sonde den Sauerstoffanteil im Abgas und sorgt für ein Benzin-Luft-Gemisch im Motor, das den Abbau der Schadstoffe optimiert. Voraussetzung dafür ist, dass die Luftzahl in einem engen Fenster um die stöchiometrische Zusammensetzung $\lambda=1$ eingeregelt ist. Abbildung 2.5. zeigt das Lambda-Fenster eines Drei-Wege-Katalysators um die Reduktion aller Schadstoffe zu maximieren.

In Dieselfahrzeugen kann, aufgrund ihrer Bauart und Motorsteuerung, diese Technik jedoch nicht eingesetzt werden, weshalb andere Möglichkeiten zur Schadstoffminderung Verwendung finden. Die dieselmotorische Verbrennung findet unter großem Luftüberschuss ($\lambda \gg 1$) statt und verursacht aus diesem Grund nach Abbildung 2.5. hohe NO_x-Emissionen [32].

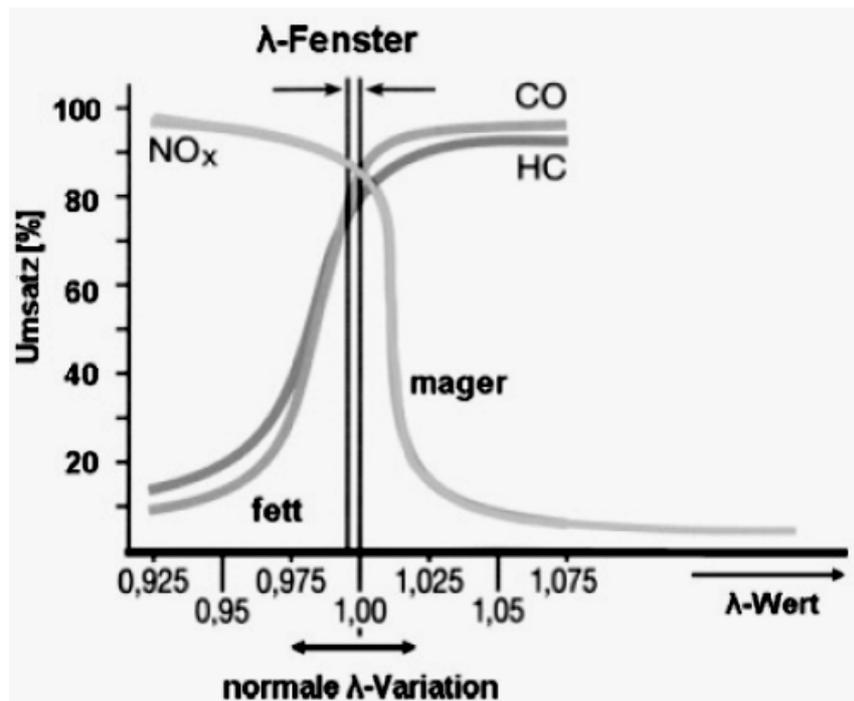


Abbildung 2.5.: Umsatz von Schadstoffen in Abhängigkeit der Luftzahl [5]

2.4.2.2. NO_x-Speicher-Reduktionsverfahren

Beim NO_x-Speicher-Reduktions-Verfahren kommt ein spezieller Katalysator mit basischen Speicherkomponenten zum Einsatz. Diese Komponenten bilden in sauerstoffreichem Abgas mit den emittierten Stickoxiden Nitrate. Ist die Speicherkapazität des Katalysators erschöpft, wird durch kurzzeitigen unterstöchiometrischen Motorbetrieb eine Regeneration eingeleitet. Das Speicher-Reduktionsverfahren ermöglicht Konvertierungsraten bis zu über 90% [9].

Die NO_x-Umsätze werden nicht nur durch das temperaturabhängige Speicher- vermögen begrenzt sondern unterliegen ebenso Alterungsprozessen. Wird der NO_x- Speicher-Reduktions-Katalysator schwefelhaltigem Abgas ausgesetzt, so ist ein kontinuierlicher Rückgang der Stickoxidkonvertierung zu verzeichnen. Der Schwefel oxidiert an den Edelmetallkomponenten des Katalysators zu Schwefeldioxid, das unter Bildung von Sulfat ebenfalls eingespeichert wird. Die gebildeten Sulfate sind thermodynamisch wesentlich stabiler als entsprechende Nitrate, wodurch sie während der NO_x-Regenerationsphase nicht zersetzt werden. Die Speicher- komponente wird für die Stickoxidspeicherung daher zunehmend blockiert. Um einen dauerhaften Rückgang des NO_x-Speichervermögens zu verhindern, ist eine zusätzliche Regenerationsphase zur Desulfatierung vorgesehen, die jedoch eine

thermische Alterung bedingt. Die thermische Haltbarkeit des NO_x -Speicher-Reduktions-Katalysators ist in erster Linie durch die Speicherkomponente begrenzt. Die Speicherkomponente bildet bei Temperaturen von 700-800 °C stabile Verbindungen mit anderen Aktivkomponenten und Bestandteilen des Washcoats und steht dann für die Nitratbildung nicht mehr zur Verfügung [34].

Trotz der vielschichtigen Probleme ist das NO_x -Speicher-Reduktionsverfahren ein wichtiger Bestandteil heute verwendeter Abgastechnik.

2.4.2.3. Nicht-selektive katalytische Reduktion

Grundidee der nicht-selektiven katalytischen Reduktion ist es, die vorhandenen Kohlenwasserstoff- und Kohlenmonoxid-Emissionen zur Entstickung des Abgases zu nutzen. Auf diese Weise kann auf einen zusätzlichen Betriebsstoff verzichtet werden. Bis heute sind die chemischen Vorgänge in NSCR-Katalysatoren noch nicht ausreichend geklärt [25, 55].

Die Selektivität des Verfahrens ist für verschiedene Kraftstofffraktionen vergleichsweise gering ausgeprägt, wobei in sauerstoffreicher Atmosphäre vor allem die Oxidationsreaktion des Reduktionsmittels aktiviert wird. Die Umsatzraten werden maßgeblich von der Katalysatortemperatur und dem Verhältnis zwischen Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden (HC/NO_x) im Abgas bestimmt.

Der Abgasstrom betriebswarmer Dieselmotoren wird beispielsweise mit Kohlenwasserstoff angereichert, da das HC/NO_x -Verhältnis meist unter 1 liegt und somit technisch relevante Konvertierungsraten erreicht werden können. Insgesamt reichen die erzielten Konvertierungsraten derzeit jedoch nicht aus, um künftige Emissionsgrenzwerte auch mit größeren Fahrzeugen zu erfüllen [40].

2.5. Selektive katalytische Reduktion (SCR)

Beim sogenannten SCR-Verfahren werden die in sauerstoffhaltigem Abgas vorhandenen Stickoxide mit stickstoffhaltigem Reduktionsmittel selektiv reduziert. Zu diesem Zweck wird Ammoniak (NH_3) als Reduktionsmittel in den Abgasstrom eingeleitet, das bei seiner sehr hohen Selektivität und gleichzeitig guten Aktivität bezüglich NO_x Umsätze bis zu 99% erzielt [28, 32, 64].

Aufgrund verschiedener Aspekte hat sich in diesem Zusammenhang der Harnstoff bewährt, da auf indirektem Wege über ihn Ammoniak freigesetzt werden kann. Er gehört nicht zur Klasse der Gefahrstoffe [18], kann kostengünstig in der Düngemittelproduktion hergestellt werden und wird als wässrige Lösung technisch unproblematisch in der Automobilindustrie eingesetzt. Im Folgenden werden nun die Reaktionsmechanismen der SCR-Harnstoff-Katalyse näher betrachtet.

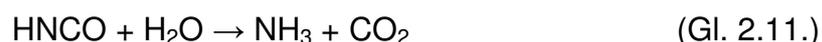
2.5.1. Die Chemie der SCR-Reaktion

Bei SCR-Systemen auf Harnstoff-Wasser-Basis wird die Harnstofflösung vor dem SCR-Katalysator in das Abgassystem eingebracht. Die thermische Zersetzung zu Ammoniak und die Verdampfung des Wassers werden durch die Enthalpie des Abgases ermöglicht [54].

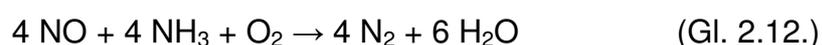
Im ersten Schritt entsteht aus einem Molekül Harnstoff ein Molekül Ammoniak und ein Molekül Isocyanensäure (HNCO):



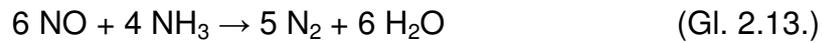
In einem zweiten Schritt wird die Isocyanensäure zu einem Molekül NH_3 sowie einem CO_2 hydrolysiert:



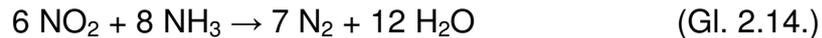
In sauerstoffreichem Abgas werden nun an der katalytischen Oberfläche nach folgenden Bruttoreaktionsgleichungen die Stickoxide umgesetzt:



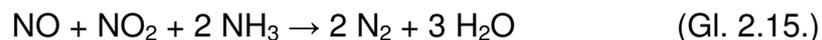
Die Umsetzung von Stickstoffmonoxid in Abwesenheit von Sauerstoff verläuft auch katalysiert sehr langsam und ist damit von untergeordneter Bedeutung.



Auch das Stickstoffdioxid wird einzeln nach folgender Gleichung reduziert.



Die Gesamtreaktion wird optimal bedient, wenn Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid im äquimolaren Verhältnis vorliegen. Als bedeutendste Reaktion gilt die „Fast-SCR“, die eine deutlich gesteigerte Konvertierungsrate aufweist [28]:



2.5.2. SCR-Katalysatoren

In der Regel werden die SCR-Katalysatoren in der Form monolithischer Wabenkörper mit quadratischen Kanälen eingesetzt, die eine hohe Oberfläche pro Volumeneinheit aufweisen.

Es kommen überwiegend Keramikmonolithe aus Cordierit ($2 \text{ MgO} \cdot 2 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 5 \text{ SiO}_2$) zum Einsatz, die eine hohe thermische Stabilität (Smp. 1450.), einen geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten und eine hohe chemische Beständigkeit aufweisen. In der Produktion werden Kaolin, Talk, Al_2O_3 , SiO_2 und Wasser gemischt und in einem definierten Temperatur-Zeit-Profil gebrannt. Dabei werden Spitzentemperaturen von 1400 °C erreicht. Cordierit weist eine Porosität von ca. 30% auf und wird meist in quadratischen Zellen mit einer Dichte von 400 cpsi (cells per square inch) hergestellt [26].

Eine mögliche Alternative sind metallische Träger, die aus einer gefalteten Metallfolie, einer FeCrAl-Legierung, mit einer Beschichtung auf Basis von Übergangsmetallionen hergestellt werden. Ihr Einsatz ist jedoch bisher, aufgrund technischer Probleme und ihrer vergleichsweise kurzen Lebensdauer sehr begrenzt. Der größte Vorteil liegt in der deutlich höheren NO_x -Konvertierungsrate, speziell im

Niedertemperaturbereich, als übliche vanadiumbasierte SCR-Katalysatoren, bei vergleichbarer Selektivität bezüglich der Bildung von N_2O (siehe Abbildung 2.6.) [51].

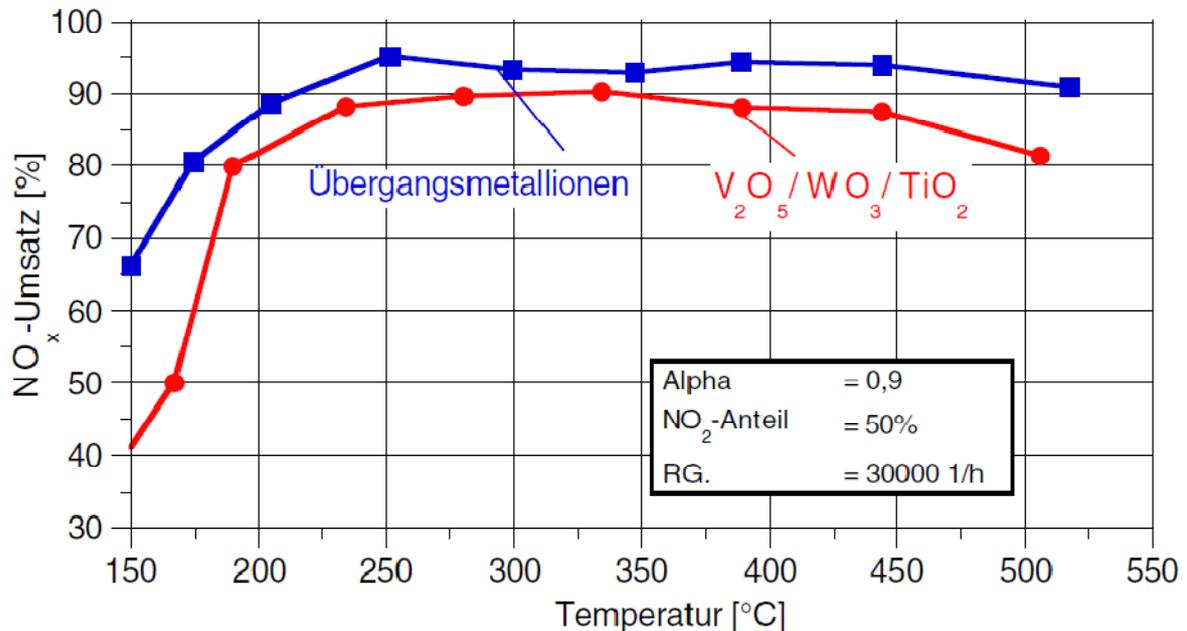


Abbildung 2.5.: Vergleich zwischen einem SCR-Katalysator auf Übergangsmetallionenbasis und einem Standard-SCR-Katalysator [48]

Neben dem Wabenkörper ist vor allem die Beschichtung mit katalytischen Materialien von zentraler Bedeutung für die Reaktionen. In der Literatur sind zahlreiche SCR-relevante Metalloxide als Aktivkomponenten beschrieben. Es werden verschiedene Ansätze verfolgt, die mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen bezüglich der Temperaturfenster und Selektivitäten einhergehen [12].

Moderne Katalysatorkonzepte verwenden vor allem V_2O_5 bzw. $\gamma\text{-Al}_2O_3$ kombiniert mit verschiedenen Edelmetallen wie beispielsweise Platin. Hierzu wird der Träger erst mit einem Washcoat aus Metalloxid beschichtet, auf den dann die Edelmetalle aufgebracht werden. Die Konzentration der im gesamten Washcoat eingelagerten katalytischen Materialien definiert die Beladungsdichte des Katalysators und damit die Güte der Reaktion [26].

Ein wesentlicher Punkt bei Beschichtungskatalysatoren ist eine genügend hohe chemische und mechanische Langzeitstabilität um einen dauerhaften Einsatz in Fahrzeugen zu garantieren.

Kapitel 3

Stickstoffdioxid

3.1. Gesetzliche Grundlagen

Das Problembewusstsein über die komplexen weltweiten Zusammenhänge von Luftverschmutzungen ist, unter anderem durch die sichtbar werdenden Folgen der globalen Erwärmung, in den letzten Jahren stark gewachsen. Dies hat sich in den verschiedensten Formen internationaler Verträge und Verpflichtungen wie dem Kyoto-Protokoll [35] von 1997 und zuletzt der UN-Klimakonferenz in Kopenhagen 2009 [62] manifestiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Schadstoff, das Stickstoffdioxid (NO₂), aufgrund seiner Emissionsentwicklung, Auswirkung und gesetzlichen Limitierung zum zentralen Thema.

In der Europäischen Union sind die Ziele der Luftreinhaltung in der Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa [19a] festgelegt. Grundlage hierfür sind unter anderem Untersuchungen der WHO [67, 68] zur Abwendung von schädlichen Auswirkung auf Mensch und Umwelt. Mit dieser Richtlinie wurden die bisherige Luftqualitätsrahmenrichtlinie, die ersten drei Tochterrichtlinien und die Entscheidung des Rates 97/101/EG zusammengefasst.

Die Umsetzung der neuen Luftqualitätsrichtlinie in deutsches Recht erfolgte durch die 39. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen – 39. BImSchV) vom 25.01.2010 [7b]. Sie ist Teil des in Deutschland gültigen Gesetzes zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG), welches durch die aktuellen Verordnungen immer wieder neuen Gegebenheiten angepasst wird.

Die 39. BImSchV schreibt Immissionsgrenzwerte zum Schutz der menschlichen Gesundheit u. a. für den Luftschadstoff Stickstoffdioxid (NO_2) vor. Bei Überschreitungen der festgelegten Immissionsgrenzwerte zuzüglich einer Toleranzmarge verpflichtet § 47 Abs. 1 BImSchG die zuständige Behörde, einen Luftreinhalteplan aufzustellen. Luftreinhaltepläne sollen dazu beitragen die Luftbelastung dauerhaft so zu verbessern, dass der Immissionsgrenzwert eingehalten werden kann. Bei kurzfristigen Konzentrationsspitzen ist nach § 47 Abs. 2 BImSchG ein Aktionsplan erforderlich, der mit direkt wirksamen Maßnahmen die Gefahr der Grenzwertüberschreitung verringert oder den Zeitraum von Überschreitungen deutlich verkürzt. Die in einem Luftreinhalte-/Aktionsplan festgelegten Maßnahmen sind nach § 47 Abs. 4 BImSchG entsprechend des Verursacheranteils unter Beachtung des Grundsatzes der Verhältnismäßigkeit gegen alle Emittenten zu richten. Darüber hinaus ist die Öffentlichkeit bei der Aufstellung der Pläne zu beteiligen. Diese Vorgehensweise stellt eine weitreichende Neuerung gegenüber allen bisherigen Verordnungen dar.

Die aus der EU-Richtlinie resultierenden Maßnahmen umfassen ebenfalls die Möglichkeiten einer Ausnahme bzw. Fristverlängerung zur Einhaltung bestehender Grenzwerte. Für Stickstoffdioxid besteht die Chance einer Fristverlängerung zur Einhaltung der Grenzwerte bis 2015. Als Voraussetzung für eine Ausnahme bzw. Fristverlängerung muss sowohl ein Luftqualitätsplan für kurzfristige Maßnahmen zur Absenkung der Immissionen als auch ein langfristiges, schlüssiges Konzept zur zukünftigen Einhaltung der Grenzwerte vorgelegt werden. Ferner darf im Übergangszeitraum der Grenzwert zuzüglich maximaler Toleranzmarge nicht überschritten werden. Bisher sind keine Konsequenzen oder Auflagen von der Europäischen Union bei Überschreitung der Grenzwerte definiert worden [7b, 19a].

Die Immissionsgrenzwerte für NO_2 sowie die während einer Ausnahme bzw. Fristverlängerung einzuhaltenden Immissionsgrenzwerte plus Toleranzmarge sind in Tabelle 3.1. dargestellt.

Definition	Zielwert	Grenzwert	Beurteilungswert ¹⁾ bis Inkrafttreten des Grenzwertes	Grenzwert plus Toleranzmarge bei Fristverlängerung	Zeitpunkt der Gültigkeit	Bemerkung
Stickstoffdioxid						
98%-Wert		200			bis 31.12.2009	175 Überschreitungen pro Kalenderjahr zulässig
Stundenmittelwert		200	220		ab 01.01.2010	18 Überschreitungen pro Kalenderjahr zulässig
				300	in 2008 2010 bis 2015	
Jahresmittelwert		40	44		ab 01.01.2010	
				60	in 2008 2010 bis 2015	
Stundenmittelwert		400				Alarmschwelle

Tabelle 3.1.: Ziel-, Grenz- und Beurteilungswerte der 39. BImSchV und der Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG (alle Werte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$) [7b]

(¹ = Summe aus Immissionsgrenzwert und jährlich abnehmender Toleranzmarge)

Die Vorgaben und Grenzwerte dieser Gesetzgebung wurden durch verschiedene Instrumente konkretisiert. Da der Verkehr als Hauptverursacher der Stickoxidemissionen gilt (siehe Abschnitt 5.) sind gerade in der Abgasgesetzgebung und der Verkehrssteuerung große Fortschritte erzielt worden.

3.1.1. Euro-Abgasnormen

In der EU wurden die Abgasgrenzwerte in den vergangenen Jahren zunehmend verschärft wodurch es gelungen ist, trotz stärkerer Motorisierung der Fahrzeuge und wachsender Fahrleistung, die Emissionen zu reduzieren. Die folgenden Abbildungen 3.1. und 3.2. zeigen die Entwicklung der Abgasgrenzwerte für Pkw und schwere Nutzfahrzeuge.

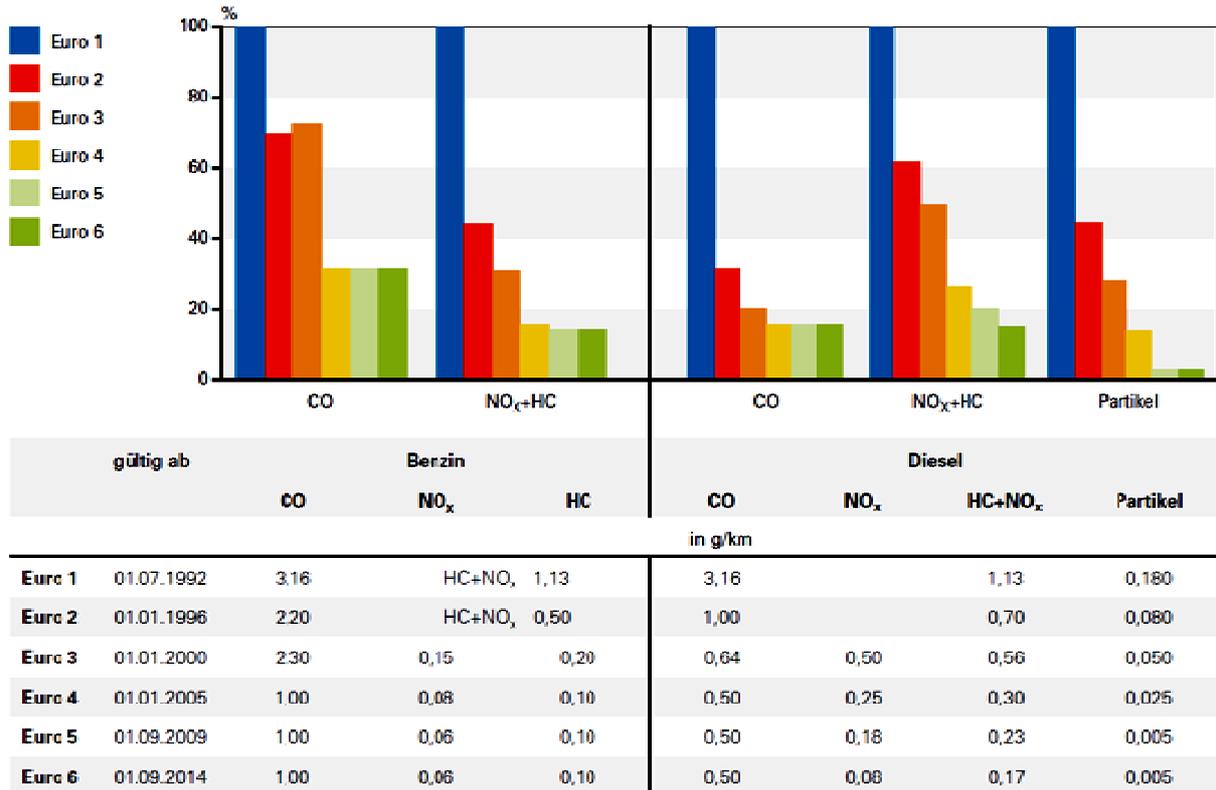


Abbildung 3.1.: Entwicklung der europäischen Abgasgrenzwerte [g/km] für Otto- und Diesel-Pkw / Bezugswert Euro 1 = 100 % [38b]

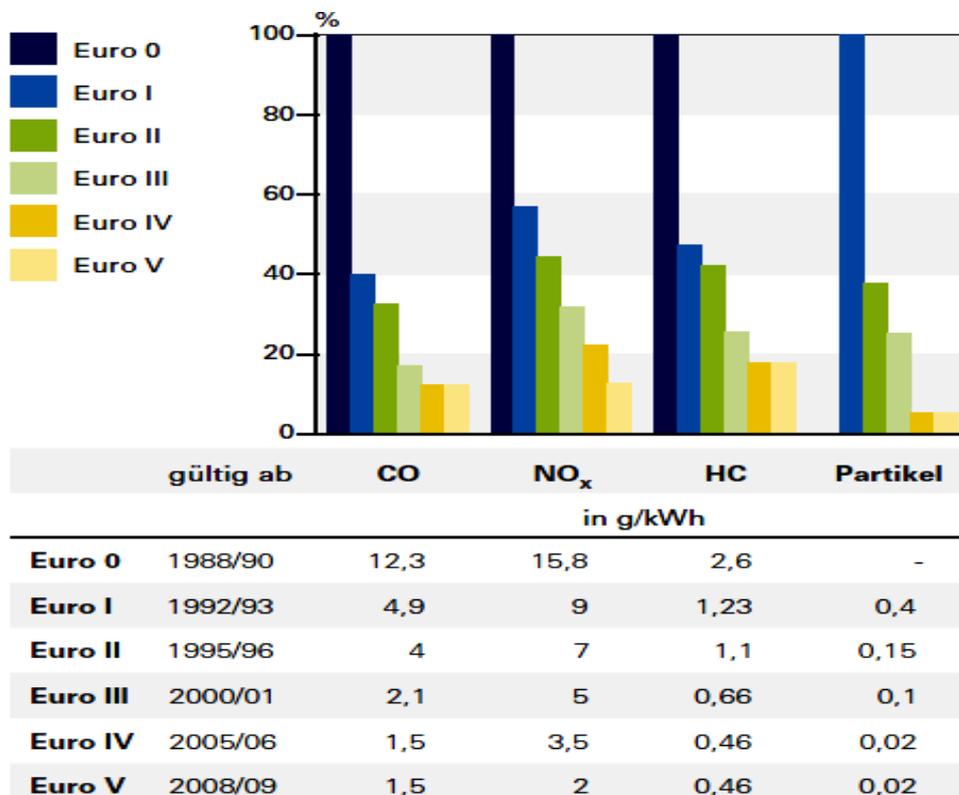


Abbildung 3.2.: Entwicklung der europäischen Abgasgrenzwerte [g/kWh] für schwere Nutzfahrzeuge über 3,5 t / Bezugswert Euro 0 = 100 % [38b]

Bei den Pkw liegen die ab September 2009 geltenden Grenzwerte Euro 5 je nach Komponente zwischen 68% und 97% niedriger als die Grenzwerte der 1992 eingeführten Stufe Euro 1. Mit der Minderungsstufe Euro 5 wird bei den Diesel-Pkw der Grenzwert für Stickstoffoxide von 500 mg/km (Euro 3) auf 180 mg/km (Euro 5) reduziert. Zum Erreichen der Euro 6 Norm 2014 ist eine weitere Halbierung des NO_x-Ausstoßes notwendig (siehe Abbildung 3.1.).

Bei Lkw und Bussen sind mit der ab Oktober 2008/2009 geltenden Stufe Euro V die Grenzwerte gegenüber Euro I um 82% bis 88%, bei Partikeln sogar um 95% abgesenkt worden. Die Vorgaben der Euro IV und vor allem der Euro V bedingen eine Abgasnachbehandlung, da allein mit motorischen Maßnahmen die Zielwerte nicht mehr eingehalten werden können (siehe Abbildung 3.2.).

3.1.2. Umweltzone

Als zweites Instrument wird die Einführung der Umweltzonen zur Bekämpfung von Schadstoffen im Straßenverkehr vorgestellt. Nach Abbildung 3.3. werden Fahrzeuge abhängig vom Schadstoffausstoß in Klassen unterteilt, die den Zugang zu den Zonen reglementieren [38b]. In Deutschland bleibt der Zeitpunkt der Einführung sowie der Umfang der Umweltzonen den Kommunen überlassen, die ausschließlich für die Einhaltung der Grenzwerte verantwortlich sind. Über den Grad der Wirkung, die sozialen Folgen und rechtliche Konsequenzen gibt es verschiedene Ansichten, obwohl die Wirkung des Instrumentes unbestreitbar ist (siehe Abschnitt 5.2.).

Schadstoff- gruppe	1	2	3	4
Plakette	keine Plakette			
Diesel	EURO 1 oder schlechter	EURO 2	EURO 3	EURO 4
Benziner	ohne geregeltan Katalysator	EURO 1 mit Partikelfilter	EURO 2 mit Partikelfilter	EURO 3 mit Partikelfilter
				mit geregeltan Katalysator

Abbildung 3.3.: Einstufung der Kraftfahrzeuge in Schadstoffgruppen [38b]

3.2. Ökologische Auswirkungen

Die Stickoxide wechselwirken mit ihrer Umwelt in vielfältiger Art und Weise. Sie schädigen die Flora und Fauna auf direkten sowie indirekten Wegen und greifen Atmosphäre und Gewässer an.

Ein unmittelbar messbarer Effekt ist eine pflanzentoxische Wirkung, bei der sich Schädigungen in der Oberschicht von Blättern und Nadeln der Bäume zeigen. Die anderen belegbaren Effekte gehen auf indirektem Weg vom sogenannten „Saurer Regen“ aus. Darunter versteht man Niederschlag der durch Luftverschmutzungen einen pH-Wert unter 5,5 aufweist [31, 59] und nach folgender Reaktionsgleichung aus Stickstoffdioxid gebildet wird [28]:

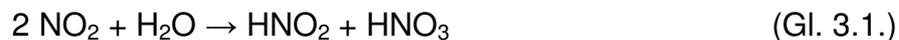


Abbildung 3.4. zeigt wie die aus NO_2 gebildete Salpetersäure (HNO_3) als saurer Regen wieder in die Natur eingetragen wird. Hinzu kommen noch die ätzenden Säuren des Schwefels, die im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden.

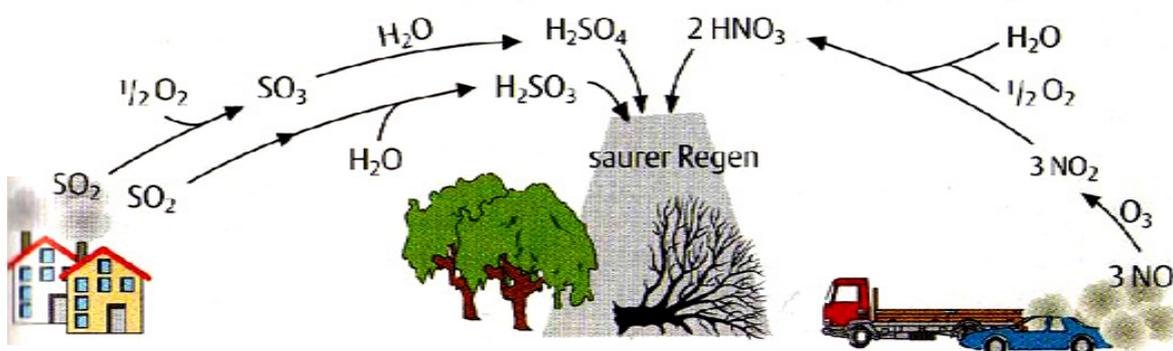


Abbildung 3.4.: Entstehung des „Saurer Regens“ [46]

Durch die Störung der natürlichen Bodenzusammensetzung werden Giftstoffe freigesetzt, welche die feinen Baumwurzeln absterben lassen. Diese nachhaltige Schädigung der Bäume lässt ihre Widerstandskraft stark sinken und macht sie daher sehr anfällig für vielfältige Belastungen wie Stürme, Schädlinge oder Krankheiten. Die entstehende Bodenversauerung ist eine der Ursachen für das Waldsterben [31].

Auch Gewässer werden zunehmend stark durch den Säureeintrag belastet, weil sich dadurch Metall-Kationen im Wasser ansammeln, die zu einer biologischen Artenverarmung führen können.

Am Rande soll noch kurz die Auswirkung des sauren Regens auf Gebäude betrachtet werden. Alle säurereaktiven Baumaterialien wie Beton, Marmor oder Stahl werden durch die chemischen Reaktionen stark in Mitleidenschaft gezogen. Der Schutz bzw. die Wiederherstellung von kulturell wertvollen Gebäuden bzw. wichtiger Infrastruktur ist aufwendig und kostspielig [31].

Die Atmosphäre wird durch Stickstoffdioxid ebenfalls weitreichend beeinflusst. Es ist für die Bildung des bodennahen Sommersmogs verantwortlich, welcher nach folgender photochemischer Reaktion gebildet wird [31]:



Hierbei ist die Rückreaktion zu beachten:



Das bedeutet, dass sich abhängig von der Sonneneinstrahlung ein Gleichgewicht zwischen den drei Reaktionspartnern Stickstoffmonoxid, Stickstoffdioxid und Ozon einstellen würde. Es kommt bei viel Sonnenschein zu einer immer größeren Ozonkonzentration in Bodennähe, da durch andere Luftverschmutzungen (meist reaktive Kohlenwasserstoffe) NO zu NO₂ oxidiert wird, ohne dass O₃ davon beeinflusst würde. Das heißt, es wird netto immer mehr neues Ozon gebildet [28].

Im Gegensatz zum bodennahen wird das stratosphärische Ozon, welches unseren Planeten vor UV-Strahlung schützt, durch die gleichen Reaktionen abgebaut. An die Zerstörung der Ozonmoleküle nach Gl. 3.4. schießt sich die Autoxidation des gebildeten Stickstoffdioxids zu Nitrat an. Dieses lagert sich an Aerosole an und wird in partikelgebundener Form durch nasse und trockene Deposition aus der Atmosphäre ausgetragen [59].

Durch die lange Verweilzeit in der Atmosphäre (ca. 5-7 Tage) kann sich das NO₂ weiträumig verteilen. Dies bedeutet, dass nicht nur lokale Maßnahmen sondern vor allem die Reduktion der Gesamtemissionen weltweit von immenser Wichtigkeit sind um Schäden für Mensch und Umwelt zu mindern.

3.3. Humantoxizität

Die Notwendigkeit einer Reduktion von Stickstoffdioxid zeigt sich vor allem in der Auswirkung auf die menschliche Gesundheit, weshalb in diesem Abschnitt die lang- und kurzfristigen Auswirkungen charakterisiert werden.

Das rötlich braune, stechend riechende Reizgas Stickstoffdioxid wurde hinsichtlich seines Metabolismus¹, seiner Vergiftungssymptome sowie therapeutischen Maßnahmen in verschiedensten medizinischen Studien untersucht. Die Informationen aus den ermittelten Gesundheitsdaten und labortechnischen Messungen flossen in die Ermittlung des Grenzwertes der EU und die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) ein. Aktuell gilt ein MAK-Wert von 5 ppm (= 5 ml/m³ = 9,5 mg/m³) [6a] welcher allerdings auf Anregung der „Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft einer Überprüfung unterzogen wird. Die Veröffentlichung der Ergebnisse ist am 01.07.2010 zu erwarten [6b].

Inhalationsstudien haben gezeigt das 75 - 90% des NO₂ vom Körper absorbiert werden. Das Gas geht die ersten chemischen Reaktionen im Flüssigkeitsfilm der Epithelen² ein, deren Produkte sich in allen möglichen Körperflüssigkeiten nachweisen lassen. In Tierversuchen zeigte sich, dass der Großteil des aufgenommenen NO₂ als Nitrat mit dem Urin ausgeschieden wird. Stickstoffdioxid reagiert aber zuvor im Organismus aufgrund seines Radikalcharakters innerhalb von Proteinen mit Fett- und Aminosäuren. Dies hat weitreichende Folgen für den Vitamin- und Nährstoffhaushalt des menschlichen Körpers und steigert nicht zuletzt die Anfälligkeit für bakterielle und virale Infektionen.

¹ = Der Metabolismus steht für die Aufnahme, den Transport und die chemische Umwandlung von Stoffen in einem Organismus sowie die Abgabe von Stoffwechselendprodukten an die Umgebung.

² = Sammelbezeichnung für Deckgewebe und Drüsengewebe, eine der vier Gewebegrundarten

In Expositionsstudien traten bereits bei niedrigen NO_2 -Konzentrationen ($< 2,5$ ppm) Bronchialverengungen auf. Die Vergiftungserscheinungen hängen elementar von Dauer und Intensität der Exposition ab, weshalb zwischen akuten und chronischen Vergiftungen unterschieden wird [42].

Akute Vergiftungen sind von drei Phasen gekennzeichnet. Konzentrationen von 100 bis 150 ppm verursachen in der ersten Phase bereits innerhalb der 1 Stunde leichte Irritationen der oberen Atemwege, die von Husten, Halsschmerzen, Entzündungen der Bindehaut des Auges, Atembeschwerden, Kopfschmerzen, Schwindel und Übelkeit begleitet werden. Konzentrationen von 300-700 ppm können in dieser Zeit bereits tödlich enden. In der zweiten Phase, nach einer symptomfreien Zeit von 3 - 30 Stunden, ist die Entwicklung eines Lungenödems möglich, welches zu einem akuten Atemversagen führen kann. Nahezu die Hälfte der überlebenden Patienten bilden in der dritten Phase, nach 2 – 6 Wochen, eine Bronchiolitis obliterans (Entzündung der Bronchiolen) aus [42]. Alle auftretenden Symptome sind in Abbildung 3.5. dargestellt.

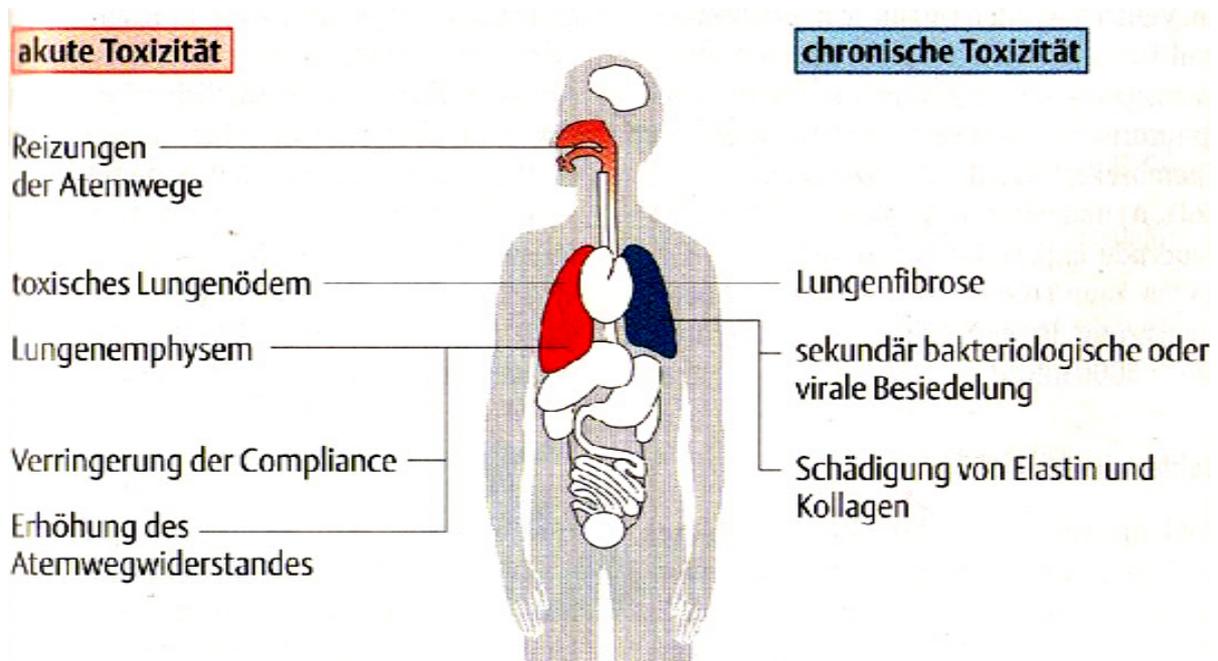


Abbildung 3.5.: Erkrankung nach Stickstoffdioxid (NO_2)-Exposition [46]

Eine der extremsten Vergiftungen mit Stickstoffdioxid ist die Silofüllerkrankheit (Exposition von bis zu 4000 ppm NO_2 über kurze Zeit), welche symptomatisch einer Grippe mit Fieber, Schüttelfrost und Husten ähnelt, wobei noch die Risiken des schweren Lungenversagens und der Bronchiolitis obliterans hinzu kommen [42].

Chronische Vergiftungen wurden durch eine geringe Dosis ($\sim 0,4$ ppm NO_2) über einen Zeitraum von 2 Jahren in Tierversuchen simuliert. Im Ergebnis konnten morphologische und biochemische Veränderungen konstatiert werden, welche kaum Rückschlüsse für die toxikologische Bedeutung von Menschen zuließen (siehe Abbildung 3.5.). Häufig überlagern sich Effekte anderer lungenschädigender Stoffe wie Schwefel oder Feinstaub, die durch klimatische Bedingungen oder auch Zigarettenrauch verursacht werden, so dass eine genaue Zuordnung kaum möglich ist [42]. Die Bestimmung eines sinnvollen LOAEL³ ist aus diesen Gründen erheblich erschwert und wird vom Umweltbundesamt bei $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gesehen [60b].

Die therapeutischen Maßnahmen müssen ebenfalls kritisch betrachtet werden, da es keine kontrollierten Studien bei Menschen gibt und sich die Behandlungsmethoden lediglich auf Tierversuche stützen. Es wird empfohlen mit Corticosteroiden dem Lungenödem entgegenzuwirken und damit gleichzeitig langfristig der Bronchiolitis obliterans vorzubeugen [42].

³ Lowest Observed Adverse Effect Level: Niedrigste Dosis eines verabreichten chemischen Stoffes, bei der im Tierexperiment noch Schädigungen beobachtet wurden

Kapitel 4

Analyse der Luftschadstoffbelastung in Baden-Württemberg

4.1. Einführung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Immissionsmessungen von Stickstoffdioxid, eine detaillierte Ursachenanalyse sowie die Entwicklung der Schadstoffbelastung aus Messwerten für das Bundesland Baden-Württemberg dargelegt.

Anhand dieser Informationen ist zwar nicht die Immissionsproblematik der gesamten Bundesrepublik Deutschland (siehe Abbildung 4.1.) oder der Europäischen Union ableitbar, da häufig lokale Gegebenheiten einen maßgeblichen Einfluss haben, dennoch zeigen sich starke Tendenzen und Grundursachen die gleichermaßen gelten.

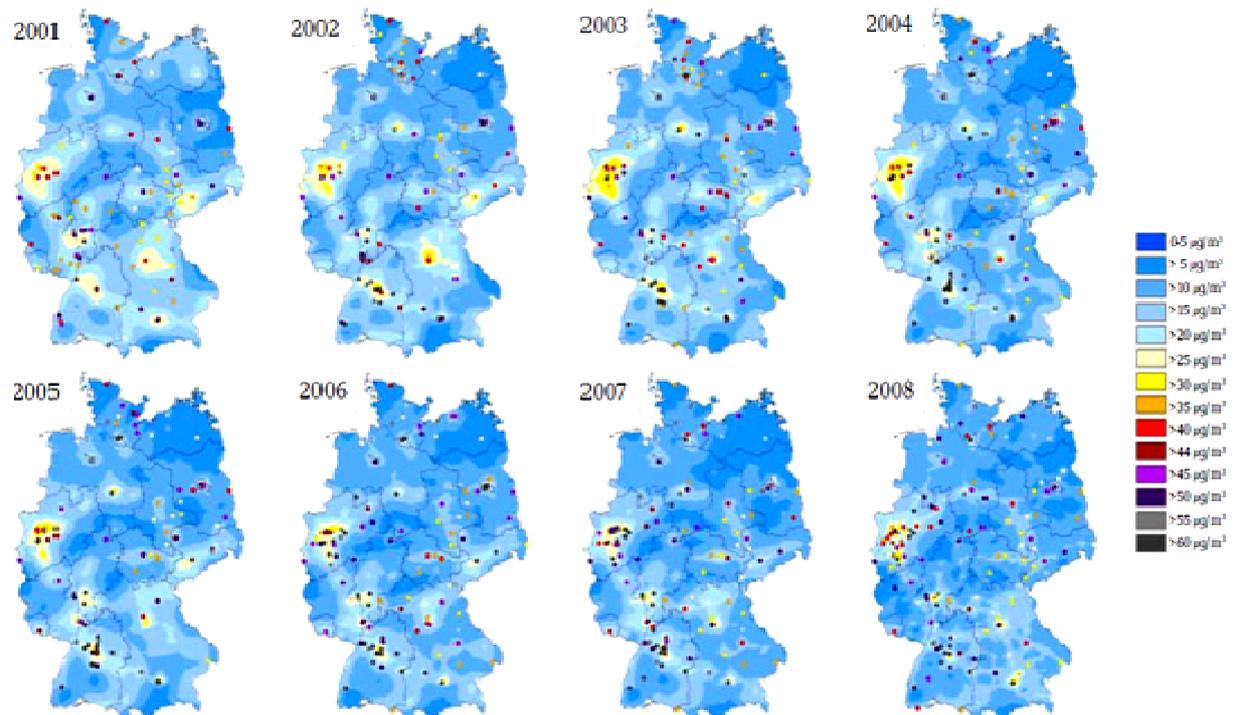


Abbildung 4.1.: Mittlere NO_2 -Immissionsbelastung in Deutschland in den Jahren 2001 bis 2008 mit „Spots“ [60a]

4.2. Ergebnisse der Luftschadstoffbelastungen

Aufgabe des bundeslandweiten Messprogramms ist die Bestimmung der städtischen und großräumigen Struktur der Immissionsbelastungen. Hierzu wurde an straßennah gelegenen „Spots“ und Hintergrundmesspunkten die Schadstoffkonzentration von Stickstoffdioxid (NO₂) erfasst. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 4.1. dargestellt.

Stations- code ¹⁾	Messpunkt/Messstation	NO ₂			
		Anzahl der 1h-MW über		JMW in	98%- Wert in
		200 µg/m ³ ²⁾	220 µg/m ³ ³⁾	µg/m ³ ⁴⁾	µg/m ³ ⁵⁾
Spotmesspunkte					
<i>Regierungsbezirk Stuttgart</i>					
DEBW145	Heidenheim, Wilhelmstraße	0	0	53	125
DEBW132	Heilbronn, Weinsberger Straße	–	–	<u>71</u>	–
DEBW135	Herrenberg, Hindenburgstraße	0	0	63	150
DEBW133	Ilfeld, König-Wilhelm-Straße	–	–	<u>50</u>	–
DEBW148	Ingersheim, Tiefengasse	–	–	<u>59</u>	–
DEBW120	Leonberg, Grabenstraße	5	0	67	151
DEBW117	Ludwigsburg, Friedrichstraße West	10	5	75	152
DEBW142	Markgröningen, Grabenstraße	0	0	47	97
DEBW121	Pleidelsheim, Beihinger Straße	10	2	64	147
DEBW118	Stuttgart, Am Neckartor	377	181	106	221
DEBW116	Stuttgart, Hohenheimer Straße	300	149	98	217
DEBW134	Stuttgart, Waiblinger Straße	–	–	<u>68</u>	–
DEBW149	Urbach, Hauptstraße	–	–	<u>45</u>	–
<i>Regierungsbezirk Karlsruhe</i>					
DEBW126	Karlsruhe, Kriegsstraße	–	–	<u>46</u>	–
DEBW128	Mühlacker, Stuttgarter Straße	–	–	<u>61</u>	–
DEBW125	Pfintzal-Berghausen, Karlsruher Straße	–	–	<u>57</u>	–
DEBW130	Pforzheim, Jahnstraße	–	–	<u>52</u>	–
DEBW144	Walzbachtal-Jöhlingen, Bahnhofstraße *	–	–	<u>59</u>	–

Regierungsbezirk Freiburg

DEBW127	Freiburg, Zähringer Straße	0	0	45	100
DEBW143	Schramberg, Oberndorfer Straße	–	–	<u>50</u>	–

Regierungsbezirk Tübingen

DEBW147	Reutlingen, Lederstraße Ost	19	3	88	168
DEBW136	Tübingen, Mühlstraße	73	30	78	186
DEBW137	Tübingen-Unterjesingen, Jesinger Hauptstraße	–	–	<u>57</u>	–
DEBW138	Ulm, Zinglerstraße	–	–	<u>63</u>	–

Verkehrsmessstationen

DEBW122	Freiburg Schwarzwaldstraße **	1	0	69	144
DEBW080	Karlsruhe-Straße	2	1	50	120
DEBW098	Mannheim-Straße	0	0	51	100
DEBW099	Stuttgart-Mitte-Straße	9	3	74	149

Messungen durch die Kommune beauftragt

DEBW154	Freiburg am Neckar, Benninger Straße	–	–	<u>54</u>	–
---------	--------------------------------------	---	---	-----------	---

Tabelle 4.1.: Ergebnisse der Immissionsmessungen im Jahr 2008 in Baden-Württemberg [38a]

JMW: Jahresmittelwert; MW: Mittelwert

** Neuer Standort der Verkehrsmessstation in Freiburg seit 2007

¹ Stationscode nach Formular 3 der jährlichen Meldung an das Umweltbundesamt gemäß § 13 der 22. BImSchV (DE: Deutschland, BW: Baden-Württemberg)

² Überschreitungsanzahl des 1h-Mittel von 200 µg/m³ im Kalenderjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Grenzwert ab 2010

³ Überschreitungsanzahl des 1h-Mittel von 220 µg/m³ im Kalenderjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Beurteilungswert für 2008

⁴ Beurteilungswert für 2008: 44 µg/m³; Grenzwert ab 2010: 40 µg/m³; unterstrichener Wert: Messungen mit Passivsammler

⁵ bis 31.12.2009 gültiger Grenzwert von 200 µg/m³; maximal sind 175 Überschreitungen zulässig

Das Messprogramm im Jahr 2008 umfasst landesweit 25 verkehrsnah gelegene Messpunkte für NO₂, die jeweils mit einem Referenzmesspunkt in diesen Straßenabschnitten verknüpft sind. Zusätzlich wurde, zur Ermittlung der räumlichen Struktur der Immissionsbelastung, mit Passivsammlern an sechs weiteren Messpunkten pro Straßenabschnitt Stickstoffdioxid bestimmt. Als weitere Immissionsvariable kam ein nicht in dem betreffenden Straßenabschnitt gelegener Hintergrundmesspunkt hinzu, mit dessen Hilfe die städtische Hintergrundbelastung festgestellt wurde.

In Tabelle 4.1. ist zu sehen, dass an 24 Spotmesspunkten, an den vier Verkehrsmessstationen sowie an dem Messpunkt in Freiberg am Neckar der ab 2010 geltende NO₂-Jahresmittelgrenzwert von 40 µg/m³ deutlich überschritten wurde. Der Grenzwertverstoß bewegte sich im Bereich zwischen 45 µg/m³ am Messpunkt der Zähringer Straße in Freiburg und 106 µg/m³ in Stuttgart am Neckartor als Spitzenreiter. Die Anzahl der Überschreitungen des 1h-Mittelwertes von 200 µg/m³ für Stickstoffdioxid lag an vier Spotmesspunkten über den zugelassenen 18 Überschreitungen pro Kalenderjahr. Die Alarmschwelle für Stickstoffdioxid von 400 µg/m³ wurde im Jahr 2008 an keiner Messstelle erreicht, weshalb unverzügliche Maßnahmen der europäischen Richtlinie über Luftqualität und saubere Luft vermieden werden konnten [19a, 38a].

Die zeitliche Entwicklung der Stickoxidbelastung ist von zentraler Bedeutung für die Ursachenanalyse, deshalb differenzieren die Abbildungen 4.2./4.3./4.4. die Stickoxide und zeigen deren Verlauf im Zeitraum von 1994 bis 2008.

Die Jahresmittelwerte von NO_x (siehe Abbildung 4.2.) und NO (siehe Abbildung 4.3.) weisen an den Verkehrsmessstationen und im städtischen Gebiet eine deutlich abnehmende Tendenz aus. Die Reduktion liegt bei NO_x zwischen 50% und 65%, bei NO zwischen 40% und 50%. Die Graphen weisen ein hohes Maß an Symmetrie auf, durch die sich auf eine direkte Korrelation schließen lässt. Im ländlichen Hintergrund bleiben die Konzentrationen über die Jahre gleichmäßig auf einem sehr niedrigen Niveau [38b].

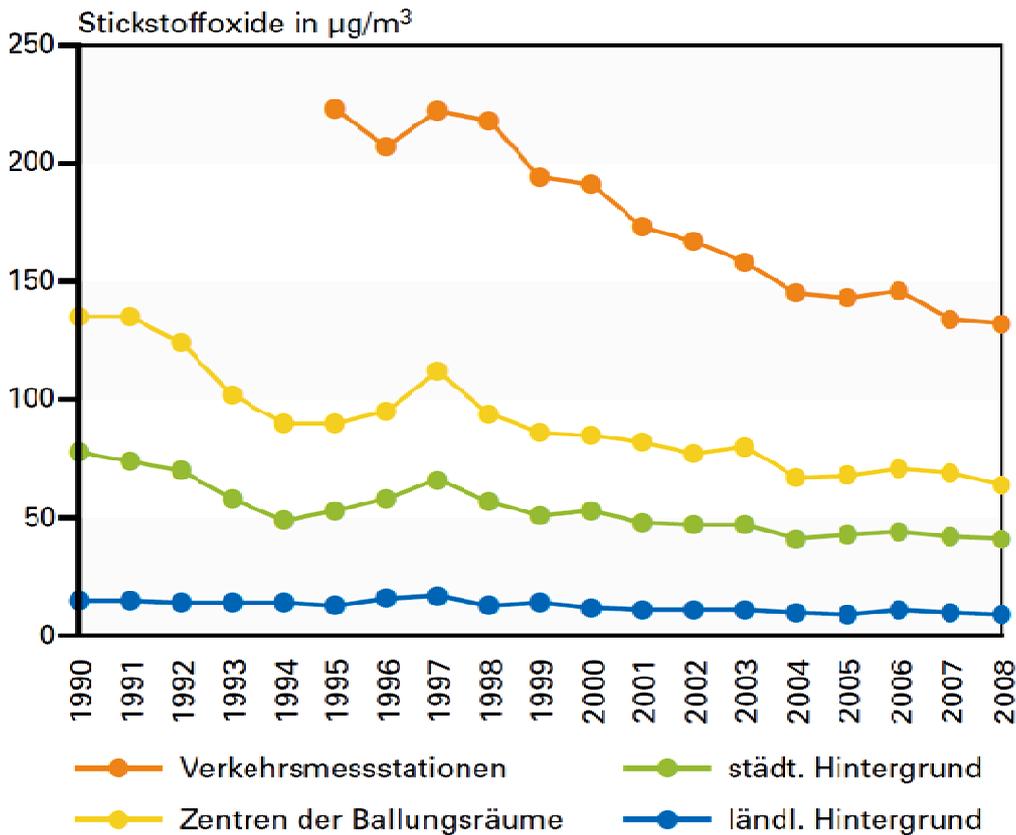


Abbildung 4.2.: Entwicklung der Jahresmittelwerte von NO_x in Baden-Württemberg von 1990 bis 2008. Stand: 2009 [38b]

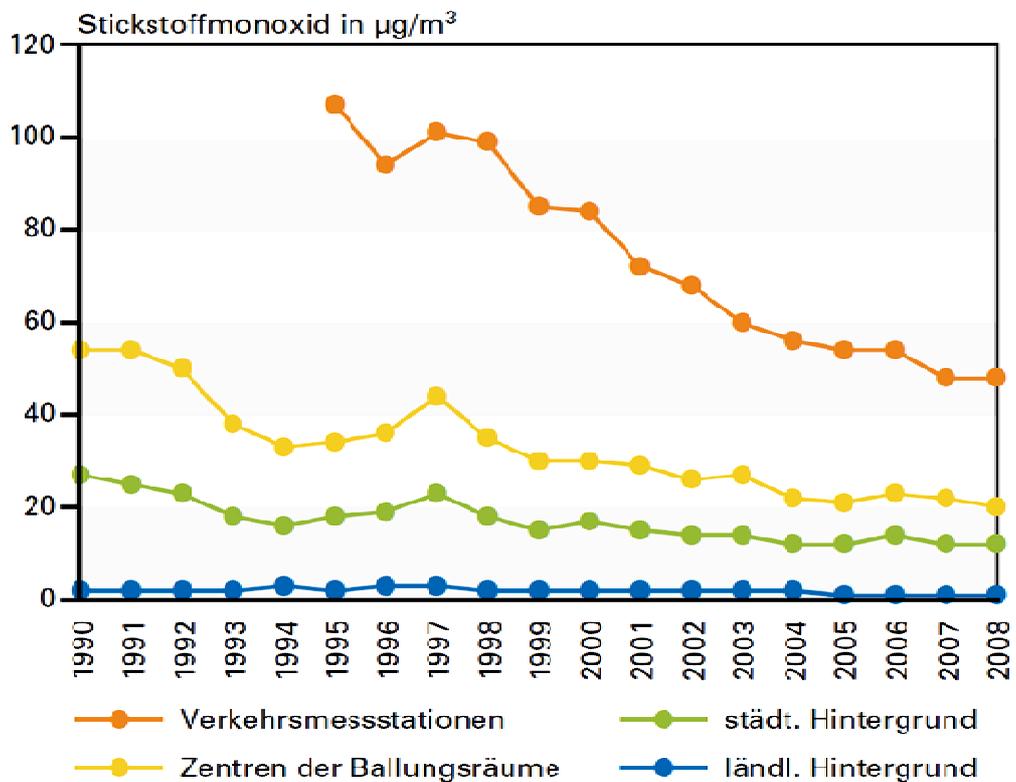


Abbildung 4.3.: Entwicklung der Jahresmittelwerte von NO in Baden-Württemberg von 1990 bis 2008. Stand: 2009 [38b]

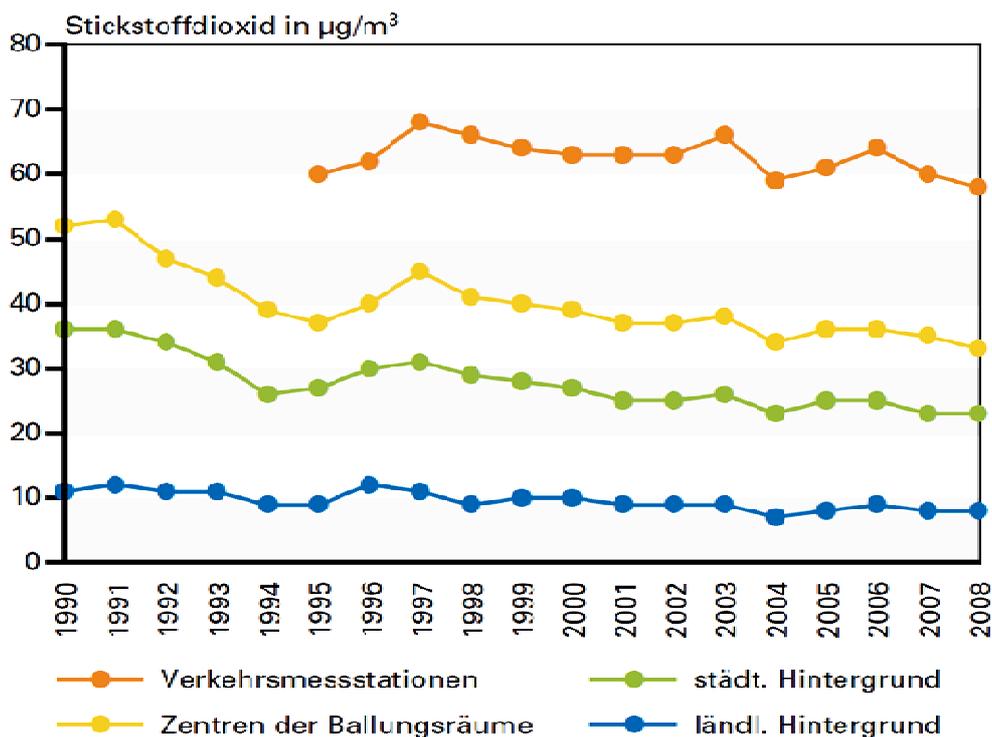


Abbildung 4.4.: Entwicklung der Jahresmittelwerte von NO₂ in Baden-Württemberg von 1990 bis 2008. Stand: 2009 [38b]

Der Verlauf der NO₂-Jahresmittelwerte (siehe Abbildung 4.4.) zeigt im ländlichen Hintergrund und an den Verkehrsmessstationen nur leichte jährliche Schwankungen, die keine Rückschlüsse auf einen Trend zulassen. In den Ballungsräumen und im städtischen Hintergrund ist in den Jahren 1990 bis 1995 zunächst eine deutliche Reduktion erkennbar, die im weiteren Verlauf mehr und mehr zurückgeht. Die letzten Jahre sind nur noch von einer sehr schwach negativen Tendenz geprägt.

Aufgrund der festgestellten Grenzwertüberschreitungen bei Stickstoffdioxid und der daraus entstandenen gesetzlichen Verpflichtung zur Erstellung eines Luftreinhalte- und Aktionsplans, müssen die Ergebnisse der Immissionsmessungen näheren Betrachtungen unterzogen werden.

4.3. Ursachenanalyse der Stickstoffdioxidemissionen

Der erste Schritt gezielter Luftreinhaltemaßnahmen liegt in der Ermittlung der relevanten Quellengruppen (Emittenten) und ihres quantitativen Einflusses (Immission) an den zu betrachtenden Messpunkten. Zu diesem Zweck werden die Immissionen in die Anteile lokale Belastung und Gesamthintergrundniveau separiert.

Die lokale Belastung stellt den Immissionseinfluss verschiedener Emissionsbeiträge der relevanten Verursacher dar. Die Bestimmung des Immissionseinflusses erfolgt aus den direkt am Messpunkt erhobenen Emissionsdaten und dem bei der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) kleinräumig vorhandenen Datenbestand des Luftschadstoff-Emissionskatasters. Durch die regelmäßige Datenerfassung seit 1994, die in zweijährigem Rhythmus erfolgt, konnten in Baden-Württemberg vier Quellen der lokalen Emissionen bestimmt werden (siehe Abbildung 4.5.) [38a, 38b].

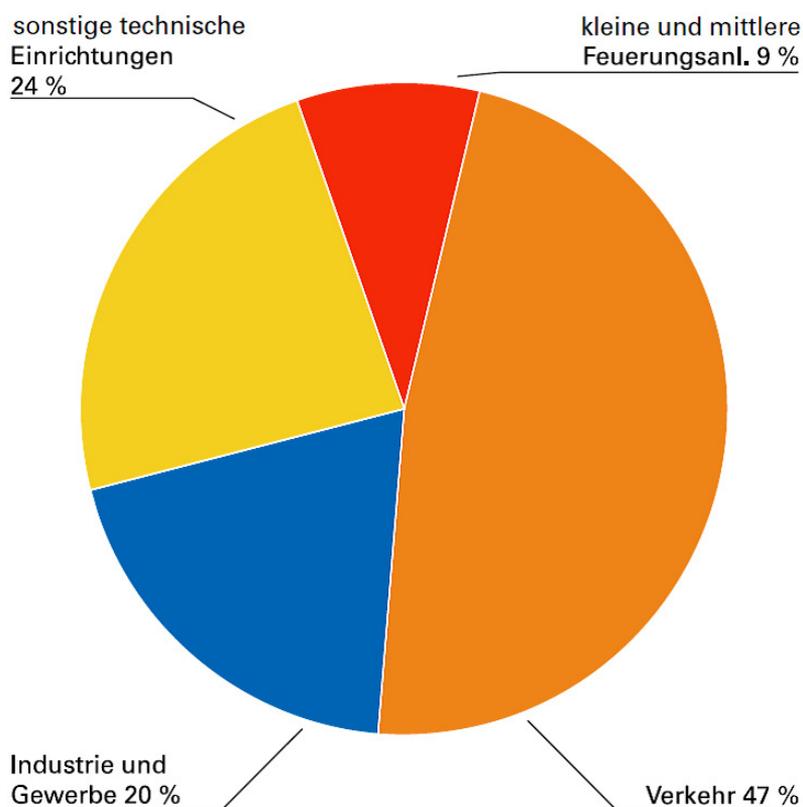


Abbildung 4.5.: Quellen der NO_x-Emissionen in Baden-Württemberg 2008 [38b]

In der Quellengruppe „Verkehr“, mit einem Anteil von 47%, werden die NO_x-Emissionen des Straßen-, Schiff-, Schienen- und bodennahen Flugverkehrs erfasst, die aus der Bundesverkehrswegezählung und den Kraftstoffverbräuchen mit spezifischen Emissionsfaktoren berechnet werden.

In der Komponente „Industrie und Gewerbe“ mit 20% werden Betriebe mit genehmigungsbedürftigen Anlagen nach der 11. Bundes-Immissionsschutzverordnung [7a] und kleine, nicht genehmigungsbedürftigen Anlagen, wie beispielsweise Tankstellen, oder kleine und mittlere Betriebe der Holz-, Metall- und Kunststoffverarbeitung, zusammengefasst. Maßgebliche NO_x-Emittenten sind in diesem Zusammenhang die großen Kraft- und Heizwerke, die Zementindustrie sowie die Mineralölverarbeitung.

Die „kleinen und mittleren Feuerungsanlagen“ decken 9% der NO_x-Emissionen ab. Bei ihnen handelt es sich um häusliche und gewerbliche Feuerungsanlagen für die Gebäudeheizung und die Warmwasserbereitung sowie für die Erzeugung von Prozesswärme bei Kleinverbrauchern.

Mit 24% sind „sonstige technische Einrichtungen“ vertreten, die alle Anlagenarten, die sich nicht den vorherigen Quellen zuordnen lassen, beinhalten. Die wesentlichen Verursacher der NO_x-Emissionen sind Geräte der Industrie, der Bau- sowie der Land- und Forstwirtschaft [38b].

Abbildung 4.6. zeigt, dass die NO_x-Emissionen von 1994 bis 2006 insgesamt um 35% zurückgegangen sind. Allerdings ist der Anteil der Einsparungen in den einzelnen Gruppen sehr unterschiedlich. Trotz steigender Fahrleistungen haben die Emissionen des Verkehrs in diesem Zeitraum aufgrund von Minderungsmaßnahmen am weitesten nachgelassen. Die anderen Quellengruppen stagnieren nahezu und weisen im Vergleich zum Verkehr auch ein viel geringeres Niveau auf.

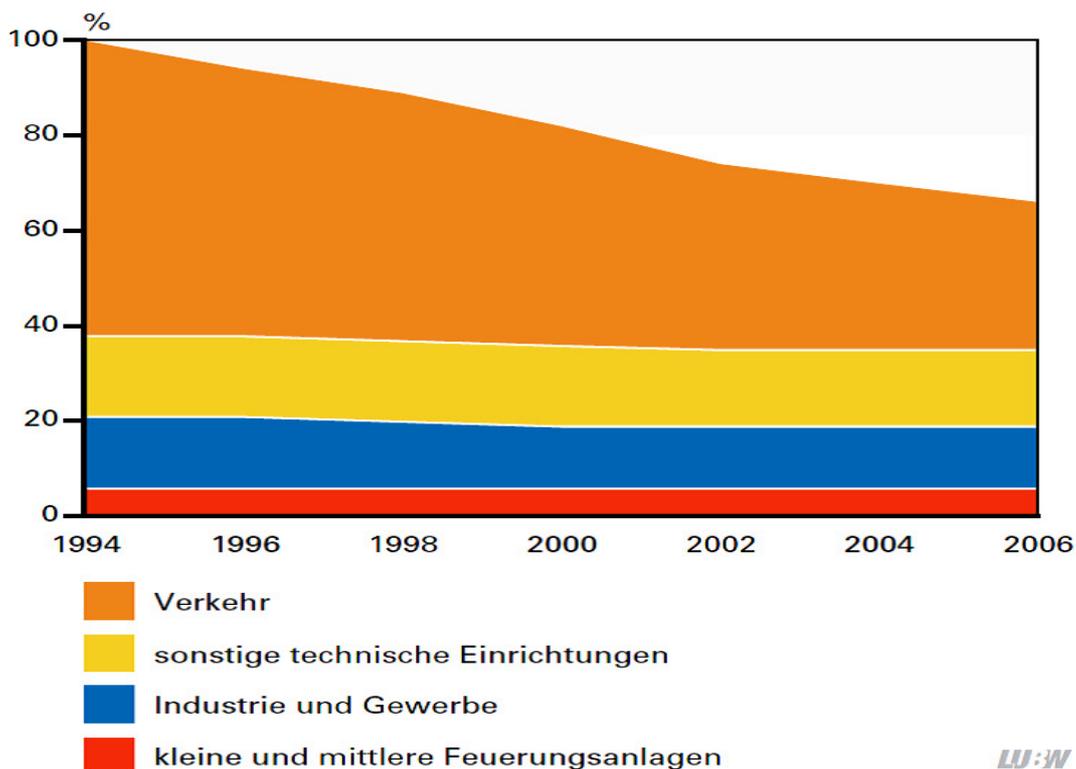


Abb. 4.6.: Entwicklung der NO_x-Emissionen in Baden-Württemberg 1994 bis 2006 im Vergleich zu 1994 (1994 = 100 %). Stand: 2008 [38a]

Das Gesamthintergrundniveau spiegelt die Immissionsverhältnisse in einem weiter gefassten Gebiet wieder und unterteilt sich nochmals in zwei weitere Bereiche: zum einen in den großräumigen Hintergrund in ländlich geprägten Gebieten und zum anderen in das städtische Hintergrundniveau.

Aus diesen Betrachtungen heraus wurden in Baden-Württemberg die vier Messstationen Odenwald, Welzheimer Wald, Schwäbische Alb und Schwarzwald Süd ausgewählt und aus ihnen im Jahr 2008 ein Mittelwert von 8 µg/m³ für den NO₂-Jahresmittelwert des großräumigen Hintergrunds abgeleitet [38a].

Das städtische Hintergrundniveau wurde zum einen aus Daten der Luftmessstationen, die im städtischen Hintergrund, d. h. abseits von Straßenzügen mit hoher Verkehrsbelastung liegen und zum anderen aus Daten des Luftschadstoff-Emissionskatasters berechnet. Es fließen Emissionsbeiträge aus industriellen Quellen, kleinen und mittleren Feuerungsanlagen, dem Straßenverkehr, dem Offroad-Verkehr und sonstigen Quellen (z. B. Geräte, Maschinen, Fahrzeuge aus Land- und Forstwirtschaft, Bauwirtschaft, Militär) ein, durch die der gesamte Immissionseinfluss ermittelt wird. In Tabelle 4.2. werden die Anteile der relevanten Verursacher am Gesamthintergrundniveau und der lokalen Belastung dargelegt.

KAPITEL 4. ANALYSE DER LUFTSCHADSTOFFBELASTUNG IN BADEN-WÜRTTEMBERG

Stations- code	Messpunkt/Messstation	JMW in µg/m³	Gesamthintergrund in µg/m³				Lokale Belastung in µg/m³			
			Sum- me	Groß- räumi- ger Hinter- grund	Städt. Hintergrund		Sum- me	Ind. FA	Kl. u. Mittl. FA	Strä- ßen- ver- kehr
Spotmesspunkte										
<i>Regierungsbezirk Stuttgart</i>										
DEBW145	Heidenheim, Wilhelmstraße	53	26	8	9	9	27	6	7	14
DEBW132	Heilbronn, Weinsberger Straße	71	30	8	9	13	41	<1	4	37
DEBW135	Herrenberg, Hindenburgstraße	63	29	8	6	15	34	<1	7	27
DEBW133	Illsfeld, König-Wilhelm-Straße	50	26	8	3	15	24	<1	5	19
DEBW148	Ingersheim, Tiefengasse	59	28	8	6	14	31	<1	4	27
DEBW120	Leonberg, Grabenstraße	67	28	8	4	16	39	<1	13	26
DEBW117	Ludwigsburg, Friedrichstraße West	75	28	8	10	10	47	<1	10	37
DEBW142	Markgröningen, Grabenstraße	47	28	8	12	8	19	<1	6	13
DEBW121	Pleidelsheim, Beihinger Straße	64	26	8	5	13	38	<1	8	30
DEBW118	Stuttgart, Am Neckartor	106	38	8	12	18	68	<1	6	62
DEBW116	Stuttgart, Hohenheimer Straße	98	38	8	14	16	60	<1	10	50
DEBW134	Stuttgart, Waiblinger Straße	68	38	8	16	14	30	1	5	24
DEBW149	Urbach, Hauptstraße	45	28	8	7	13	17	<1	4	13
<i>Regierungsbezirk Karlsruhe</i>										
DEBW126	Karlsruhe, Kriegsstraße	46	30	8	8	14	16	<1	2	14
DEBW128	Mühlacker, Stuttgarter Straße	61	28	8	13	7	33	<1	10	23
DEBW125	Pfingztal-Berghausen, Karlsruher Straße	57	30	8	13	9	27	<1	6	21
DEBW130	Pforzheim, Jahnstraße	52	28	8	11	9	24	<1	5	19
DEBW144	Walzbachtal-Jöhlingen, Bahnhofstraße	59	26	8	11	7	33	1	8	24
<i>Regierungsbezirk Freiburg</i>										
DEBW127	Freiburg, Zähringer Straße	45	21	8	6	7	24	2	4	18
DEBW143	Schramberg, Oberndorfer Straße	50	19	8	6	5	31	<1	9	22
<i>Regierungsbezirk Tübingen</i>										
DEBW147	Reutlingen, Lederstraße Ost	88	24	8	7	9	64	<1	7	57
DEBW136	Tübingen, Mühlstraße	78	22	8	9	5	56	<1	10	46
DEBW137	Tübingen-Unterjesingen, Jesinger Hauptstraße	57	22	8	7	7	35	<1	7	28
DEBW138	Ulm, Zinglerstraße	63	29	8	10	11	34	1	7	26
Verkehrsmessstationen										
DEBW122	Freiburg Schwarzwaldstraße *	69	21	8	6	7	48	2	6	40
DEBW080	Karlsruhe-Straße	50	30	8	7	15	20	<1	4	16
DEBW098	Mannheim-Straße	51	29	8	12	9	22	4	3	15
DEBW099	Stuttgart-Mitte-Straße	74	38	8	13	17	36	<1	6	30
Messungen durch die Kommune beauftragt										
DEBW154	Freiburg am Neckar, Benninger Straße	54	28	8	5	15	26	<1	4	22

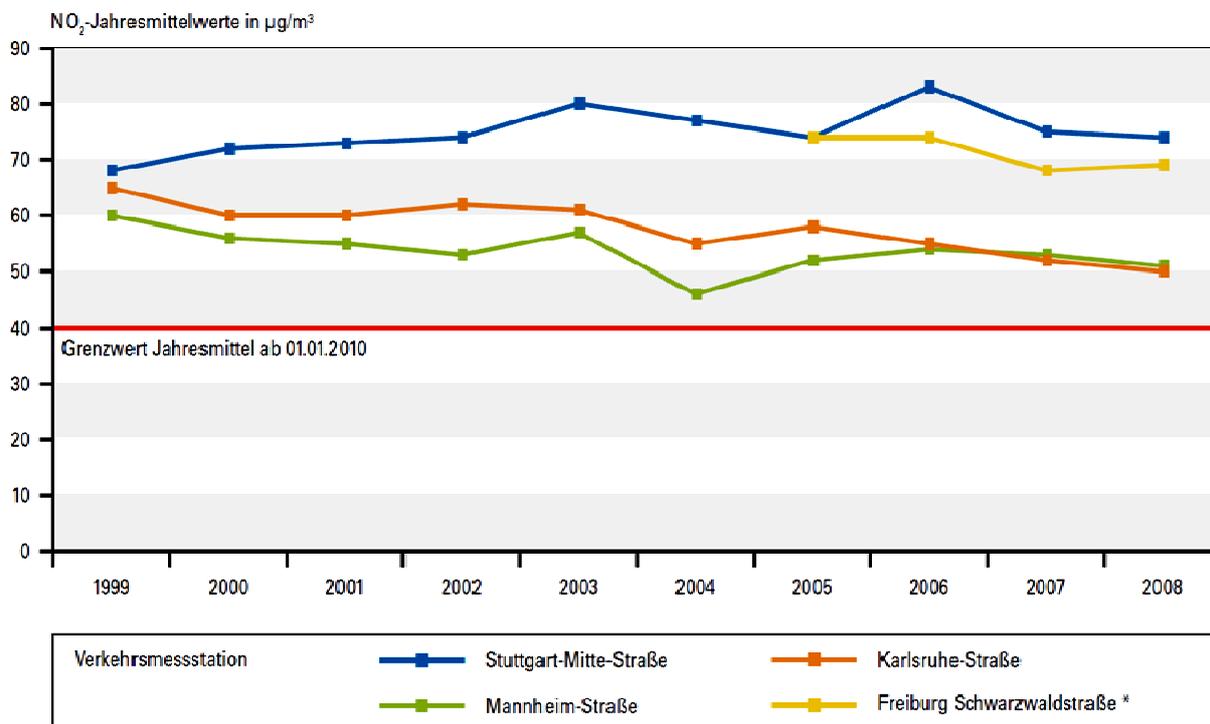
Tabelle 4.2.: Einfluss der relevanten Quellengruppen auf die Immissionskonzentration an den Messpunkten mit Überschreitungen des für das Jahr 2008 gültigen NO₂-Beurteilungswertes (Grenzwert + Toleranzmarge) von 44 µg/m³ im Jahresmittel im Jahr 2008 [38a]

JMW: Jahresmittelwert; Städt. Hintergrund: Städtischer Hintergrund; Ind.: Industrie; Kl. u. Mittl. FA: Kleine und Mittlere Feuerungsanlagen; Offroad: Offroad-Verkehr (Schiff-, Schiene- und Luftverkehr); Sonstige: Sonstige Quellen (Geräte, Maschinen, Fahrzeuge aus Land-, Forst-, Bauwirtschaft, Industriemaschinen etc.)

* Neuer Standort der Verkehrsmessstation in Freiburg seit 2007 [38a]

Vergleicht man die prozentualen Anteile der verschiedenen Messpunkte, bezogen auf den Beurteilungswert von $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für den NO_2 -Jahresmittelwert im Jahr 2008, so sind große Unterschiede festzustellen. Der Mittelwert des großräumigen Hintergrunds schwankt zwischen 8% und 18% wohingegen die Beiträge des Straßenverkehrs zwischen 43% und 76% liegen. Mit 15% bis 42% weisen die aufsummierten Quellengruppen kleine und mittlere Feuerungsanlagen, industrielle Quellen, Offroad-Verkehr und sonstige Quellen einen Wert dazwischen auf.

Zum Abschluss der Ursachenanalyse wird die Entwicklung der vier Verkehrsmessstationen in Baden-Württemberg im Messzeitraum 1999 bis 2008 betrachtet.



* Neuer Standort der Verkehrsmessstation in Freiburg seit 2007

LW:W

Abbildung 4.7.: Entwicklung der NO_2 -Konzentrationen als Jahresmittelwert an den Verkehrsmessstationen in Baden-Württemberg 1999-2008 [38a]

Abbildung 4.7. zeigt, dass seit dem Messjahr 1999 kein eindeutiger Trend zu einer Verminderung der NO₂-Immissionsbelastung feststellbar ist.

Dies wird zusätzlich durch die in den letzten Jahren durchgeführten Messungen an verkehrsnahen Messpunkten gestützt (siehe Abbildung 4.2./4.3./4.4.). Das heißt, die Erfolge in der Stickoxidminderung sind maßgeblich durch die NO-Reduktion im Verkehrssektor getragen und wirken sich nicht auf die Stickstoffdioxid-Emissionen aus. Der Straßenverkehr ist der Hauptverursacher der NO₂-Belastungen (siehe Kapitel 5) [38a, 38b].

4.4. Das Luftmessnetz

Um wirksame Maßnahmen zur Reduktion der NO₂-Emissionen ergreifen zu können, ist ein genaues Verständnis der lokalen Gegebenheiten und Messapparaturen unabdingbar. Aus diesem Grund wird im Folgenden das Luftmessnetz, das in Baden-Württemberg in die vier Regierungsbezirke Stuttgart, Karlsruhe, Freiburg und Tübingen eingeteilt ist, vorgestellt. Des Weiteren wird exemplarisch für den verkehrsnahen Messbereich jeweils ein Messort beschrieben, in dem die ermittelten Ergebnisse der Immissionsmessungen, die Ursachenanalyse für NO₂ im Messjahr 2008 und Messwerte aus früheren Messjahren enthalten sind.

4.4.1. Regierungsbezirk Stuttgart

Der Regierungsbezirk Stuttgart mit über 4 Mio. Einwohnern liegt im Nordosten von Baden-Württemberg und umfasst die zwei Stadtkreise Heilbronn und Stuttgart sowie 11 Landkreise auf einer Fläche von 10 558 km². In Abbildung 4.8. sind die Gebiete farblich markiert, in denen die NO₂-Immissionsgrenzwerte im Jahr 2008 überschritten wurden. Dazu zählen die beiden Stadtkreise Stuttgart und Heilbronn, die Städte Heidenheim, Herrenberg, Leonberg, Ludwigsburg und Markgröningen sowie die Gemeinden Ilsfeld, Ingersheim, Pleidelsheim und Urbach [38a].

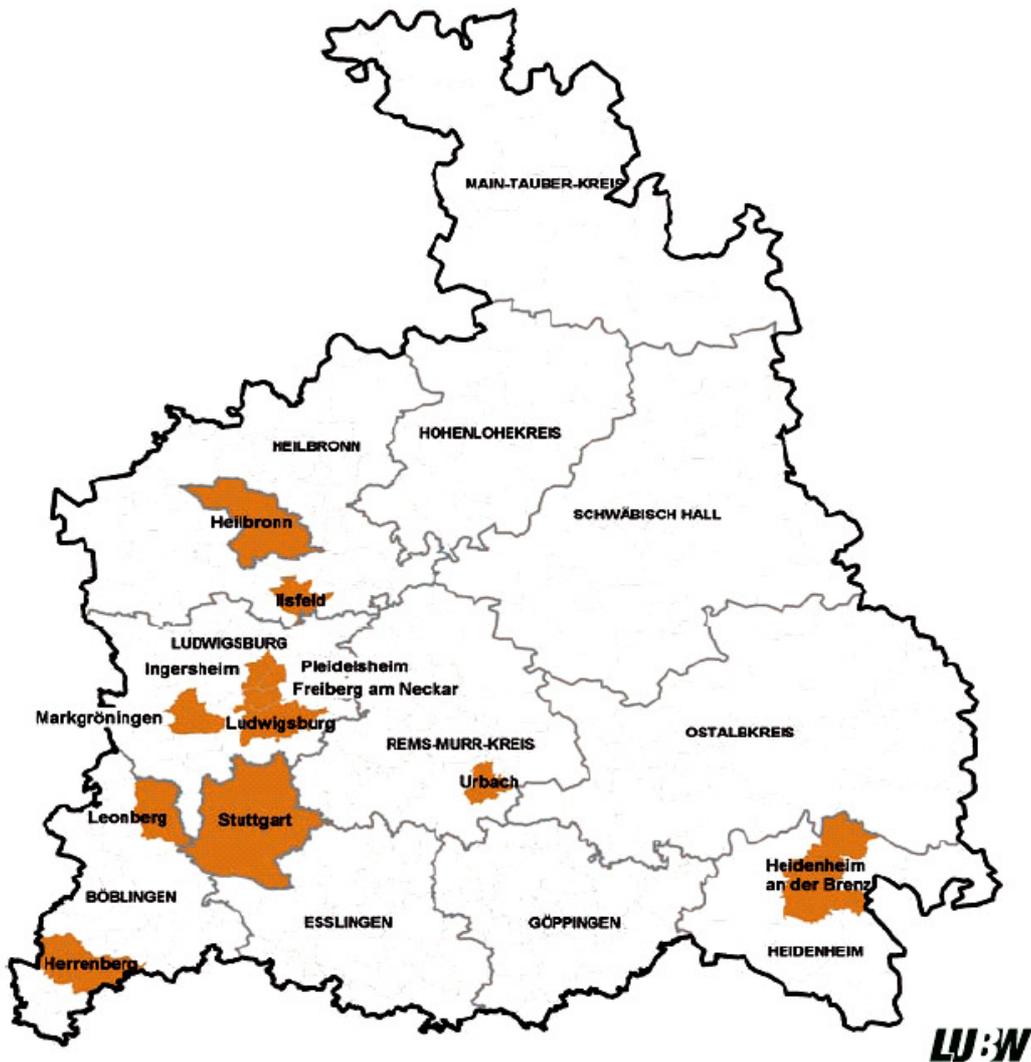


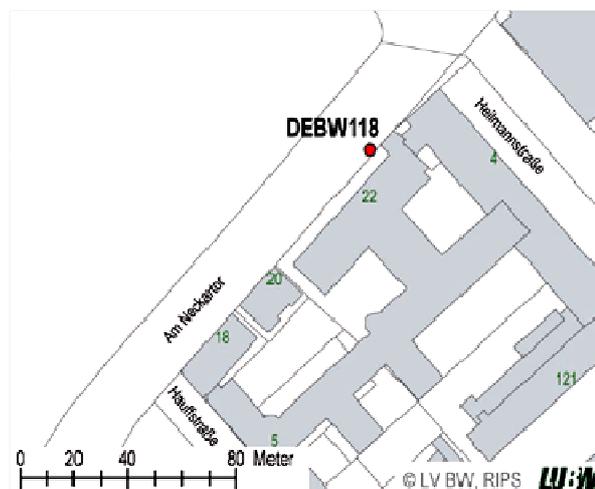
Abbildung 4.8.: Geographische Lage der Überschreitungsbereiche im Regierungsbezirk Stuttgart im Jahr 2008 [38a]

4.4.1.1. Messort Stuttgart - Am Neckartor

Der Messort Stuttgart - Am Neckartor ist ein Beispiel für eine verkehrsnaher Messung, welche die gravierendsten Überschreitungen aufweist. Der Straßenzug mit 3 Fahrstreifen pro Richtung befindet sich an der B 14 vor dem Amtsgericht und ist die Hauptausfahrtsstraße Richtung Stuttgart - Bad Cannstatt und Esslingen mit entsprechend hohem Verkehrsaufkommen. Die Lage am Schlossgarten mit einseitiger Bebauung begünstigt den Schluchtencharakter der Straße. In ca. 40 m Entfernung zur Messstation in nordöstlicher Richtung befindet sich die ampelgeregelter Kreuzung Am Neckartor/Heilmannstraße mit der Einmündung der Cannstatter Straße (siehe Abbildung 4.9.).

MESSPUNKTBESCHREIBUNG

Messpunkt Stuttgart, Am Neckartor



Ansicht

Lageplan

Daten der Messstation

Stationscode	DEBW118
Standort/Straße	Am Neckartor 22
Stadt/Gemeinde	Stuttgart
Stadt-/Landkreis	Stuttgart, Stadt
Regierungsbezirk	Stuttgart

Koordinaten

Geographische Koordinaten			
geographische Länge	9° 11' 31"	geographische Breite	48° 47' 21"
Gauß-Krüger Koordinaten			
Rechtswert	3514110	Hochwert	5405644

Umgebungsbeschreibung

Topographie	Ebene
Bebauung	Innenstadt
Gebietsnutzung	Verkehr, Wohnen, Handel
Emissionsquelle	Verkehr
Straßentyp	sehr große breite Straße
Verkehrsstärke	71 900 Kfz/Tag (aus aktuellen Verkehrszählungen: 01.01.-31.12.2008)

Gemessene Komponenten

Komponenten	NO ₂ , PM10, Benzol, Ruß
-------------	-------------------------------------

Abbildung 4.9.: Messpunkt Stuttgart - Am Neckartor [38a]

Am Messpunkt Stuttgart - Am Neckartor wurde im Jahr 2008 sowohl der ab 2010 geltende NO₂-Grenzwert von 40 µg/m³ mit 106 µg/m³ als auch die Anzahl der maximal erlaubten 18 Überschreitungen des 1h-Mittelwertes (200 µg/m³) mit 181 mal weit überschritten (siehe Tabelle 4.3.).

Stations- code	Messpunkt/Messstation	Mess- jahr	NO ₂			JMW in µg/m ³ ³⁾
			max. 1h- MW in µg/m ³	Anzahl der 1h-MW über 200 µg/m ³ ¹⁾	über dem Beurteilungs- wert im Messjahr ²⁾	
Spotmesspunkt						
DEBW113	Stuttgart, Am Neckartor	2008	322	377	181	106
DEBW113	Stuttgart, Am Neckartor	2007	294	450	126	106
DEBW113	Stuttgart, Am Neckartor	2006	383	853	251	121
DEBWS11	Stuttgart, Am Neckartor	2005	396	848	166	119
DEBWS11	Stuttgart, Am Neckartor	2004	394	555	102	106
DEBWS11	Stuttgart, Am Neckartor	2003	-	-	-	<u>105</u>

Tabelle 4.3.: Messergebnisse in Stuttgart [38a]

JMW: Jahresmittelwert; MW: Mittelwert

- 1) Überschreitungsanzahl des 1h-Mittel von 200 µg/m³ im Kalenderjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Grenzwert ab 2010
- 2) Überschreitungsanzahl der 1h-Beurteilungswerte im jeweiligen Messjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Beurteilungswert für 2008: 220 µg/m³, für 2007: 230 µg/m³, für 2006: 240 µg/m³, für 2005: 250 µg/m³, für 2004: 260 µg/m³, für 2003: 270 µg/m³
- 3) unterstrichener Wert: Messungen mit Passivsammler

Abbildung 4.10. zeigt die Verteilung der Emissionen auf die Verursachergruppen. Die Analyse ergab für den Straßenverkehr einen Anteil von 76% der Gesamtemission.

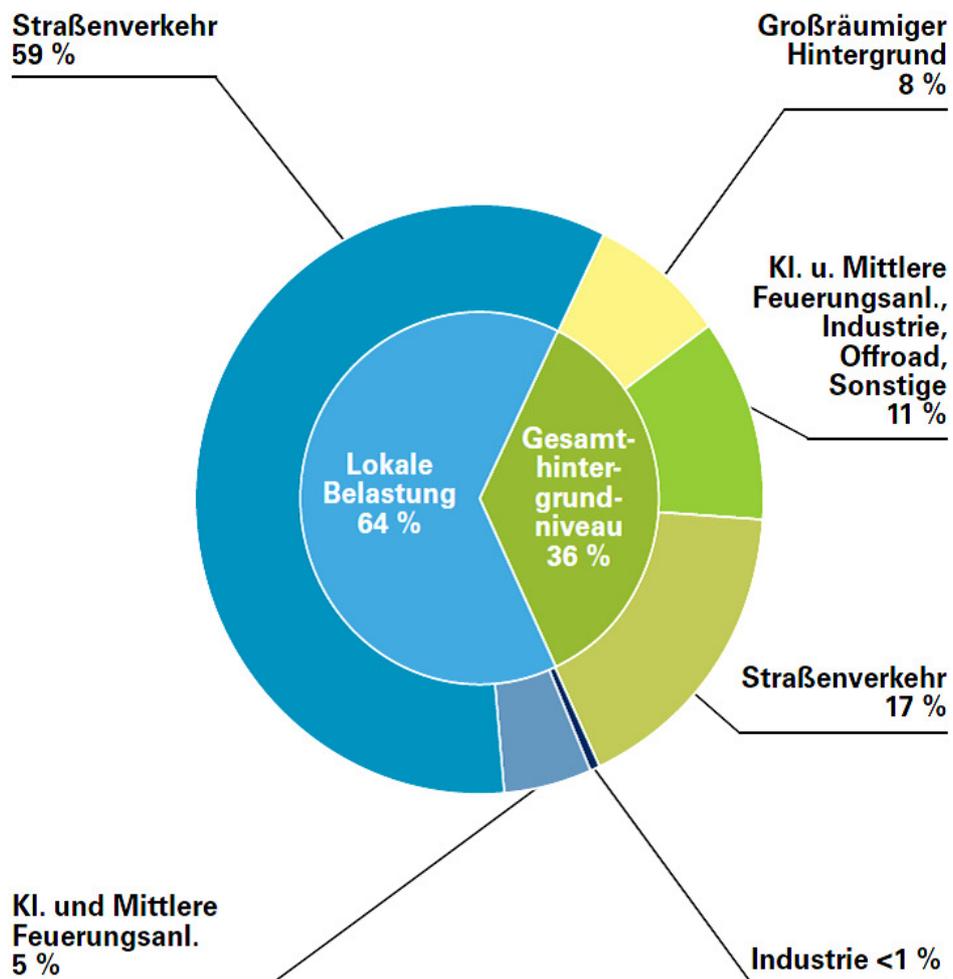


Abbildung 4.10.: Verursacher der NO₂-Immissionsbelastung am Messpunkt Stuttgart, Am Neckartor im Jahr 2008 [38a]

4.4.2. Regierungsbezirk Karlsruhe

Der Regierungsbezirk Karlsruhe im Nordwesten Baden-Württembergs ist mit einer Fläche von 6919 km² und ca. 2,74 Mio. Einwohnern die am dichtesten besiedelte Region. Er besteht aus 5 Stadt- und 7 Landkreisen, von denen Karlsruhe, Mannheim, Mühlacker und Pforzheim sowie die Gemeinden Pfinztal und Walzbachtal die zulässigen Grenzwerte überschritten (siehe Abbildung 4.11.) [38a].

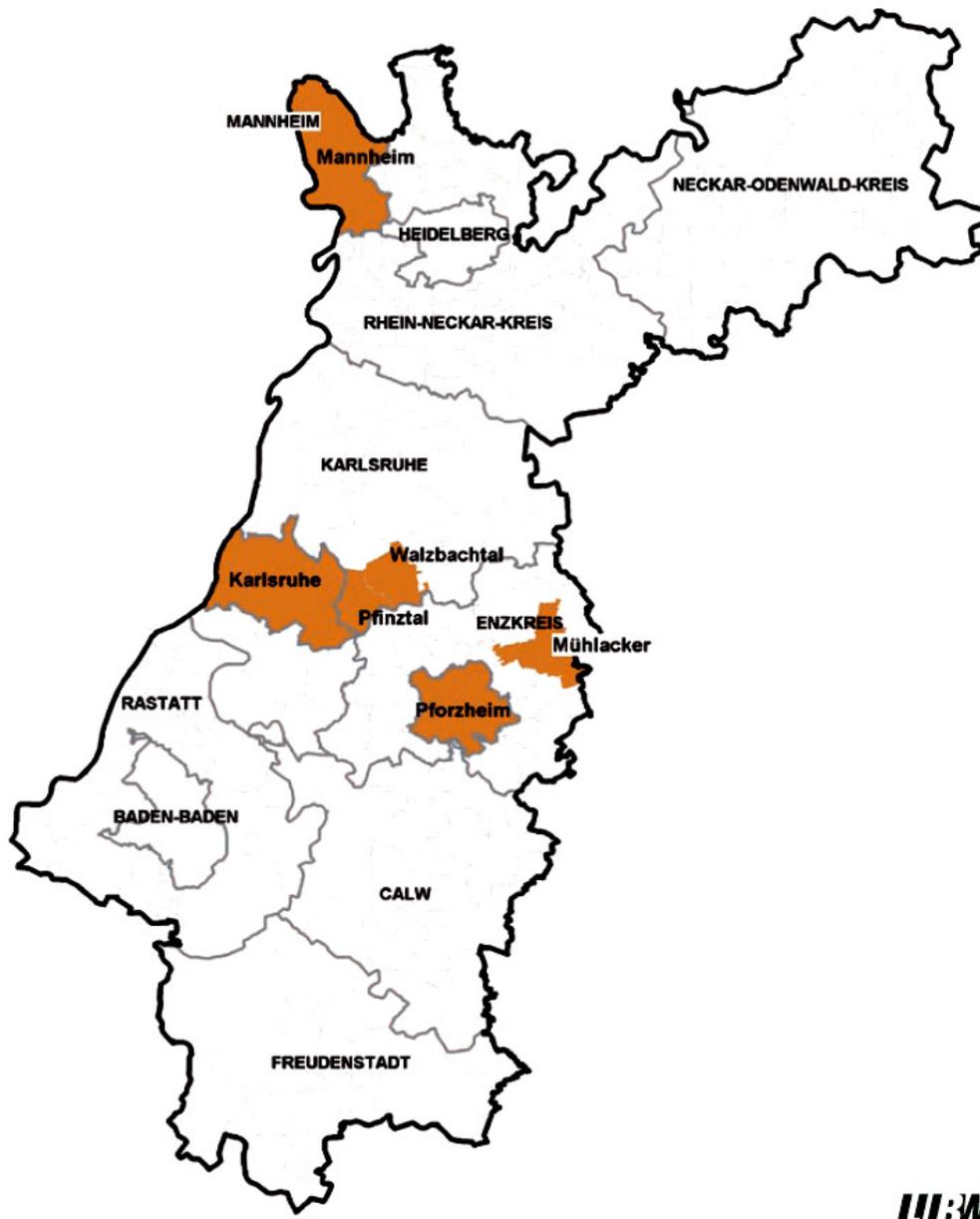


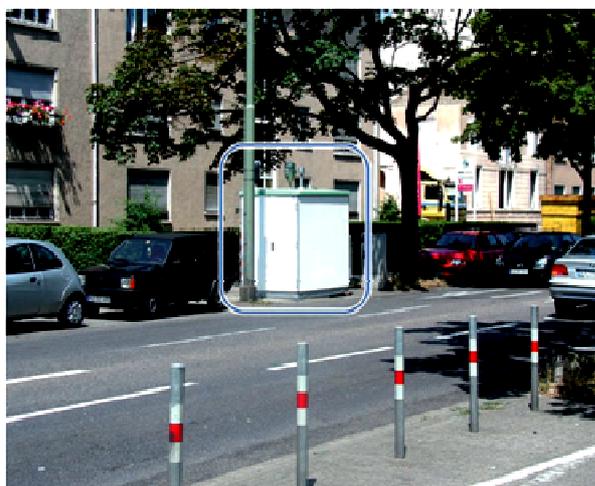
Abbildung 4.11.: Geographische Lage der Überschreitungsbereiche im Regierungsbezirk Karlsruhe im Jahr 2008 [38a]

4.4.2.1. Messort Karlsruhe - Straße

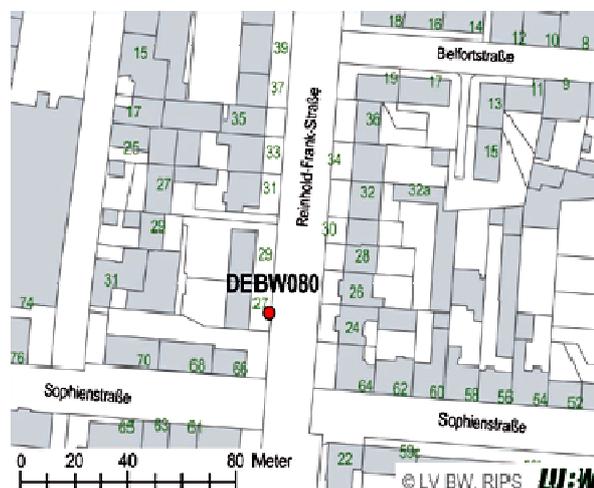
Der Messort Karlsruhe - Straße liegt im Abschnitt Reinhold-Frank-Straße nahe der Kreuzung Reinhold-Frank-Straße/Sophienstraße. Die Messstation der zweispurigen Straße mit hoher Verkehrsdichte befindet sich direkt vor einem viergeschossigen Wohngebäude im Bereich zwischen Bürgersteig und Fahrbahn. Das locker bepflanzte Gebiet mit Alleencharakter unterliegt allgemeiner städtischer Gebietsnutzung wie Handel, Gewerbe und Wohnen (siehe Abbildung 4.12.) [38a].

MESSPUNKTBESCHREIBUNG

Verkehrsmessstation Karlsruhe-Straße



Ansicht



Lageplan

Daten der Messstation

Stationscode	DEBW080
Standort/Straße	Reinhold-Frank-Straße 27
Stadt/Gemeinde	Karlsruhe
Stadt-/Landkreis	Karlsruhe, Stadt
Regierungsbezirk	Karlsruhe

Koordinaten

Geographische Koordinaten			
geographische Länge	8° 23' 17"	geographische Breite	49° 0' 32"
Gauß-Krüger Koordinaten			
Rechtswert	3455234	Hochwert	5430251

Umgebungsbeschreibung	
Topographie	Ebene
Bebauung	Innenstadt
Gebietsnutzung	Verkehr, Wohnen, Handel, Gewerbe
Emissionsquelle	Verkehr
Straßentyp	Straßenschlucht
Verkehrsstärke	24 600 Kfz/Tag (aus aktuellen Verkehrszählungen: 06.05.-31.12.2008)
Gemessene Komponenten	
Komponenten	NO ₂ , PM10, Benzol, Ruß

Abbildung 4.12.: Messpunkt Karlsruhe - Straße [38a]

Die Messungen an der Station Karlsruhe - Straße ergaben nach Tabelle 4.4. eine Überschreitung des Jahresmittels 2008 von 50 µg/m³. Der 1h-Mittelwert hingegen lag mit einer Häufigkeit von 2 innerhalb der geforderten Werte.

Stationscode	Messpunkt/Messstation	Messjahr	NO ₂			JMW in µg/m ³ ³⁾
			max. 1h-MW in µg/m ³	Anzahl der 1h-MW über 200 µg/m ³ ¹⁾	über dem Beurteilungswert im Messjahr ²⁾	
Verkehrsmessstation						
DEBW080	Karlsruhe-Straße	2008	255	2	1	50
DEBW080	Karlsruhe-Straße	2007	188	0	0	52
DEBW080	Karlsruhe-Straße	2006	193	0	0	55
DEBW080	Karlsruhe-Straße	2005	193	0	0	58
DEBW080	Karlsruhe-Straße	2004	253	5	0	55
DEBW080	Karlsruhe-Straße	2003	217	5	0	61

Tabelle 4.4.: Messergebnisse in Karlsruhe [38a]

JMW: Jahresmittelwert; MW: Mittelwert

1) Überschreitungsanzahl des 1h-Mittel von 200 µg/m³ im Kalenderjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Grenzwert ab 2010

2) Überschreitungsanzahl der 1h-Beurteilungswerte im jeweiligen Messjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Beurteilungswert für 2008: 220 µg/m³, für 2007: 230 µg/m³, für 2006: 240 µg/m³, für 2005: 250 µg/m³, für 2004: 260 µg/m³, für 2003: 270 µg/m³

3) unterstrichener Wert: Messungen mit Passivsammler

Die Ursachenanalyse ergab die in Abbildung 4.13. dargestellten Anteile der Emittenten. Der Straßenverkehr ist mit 62% die bei weitem größte Quellengruppe.

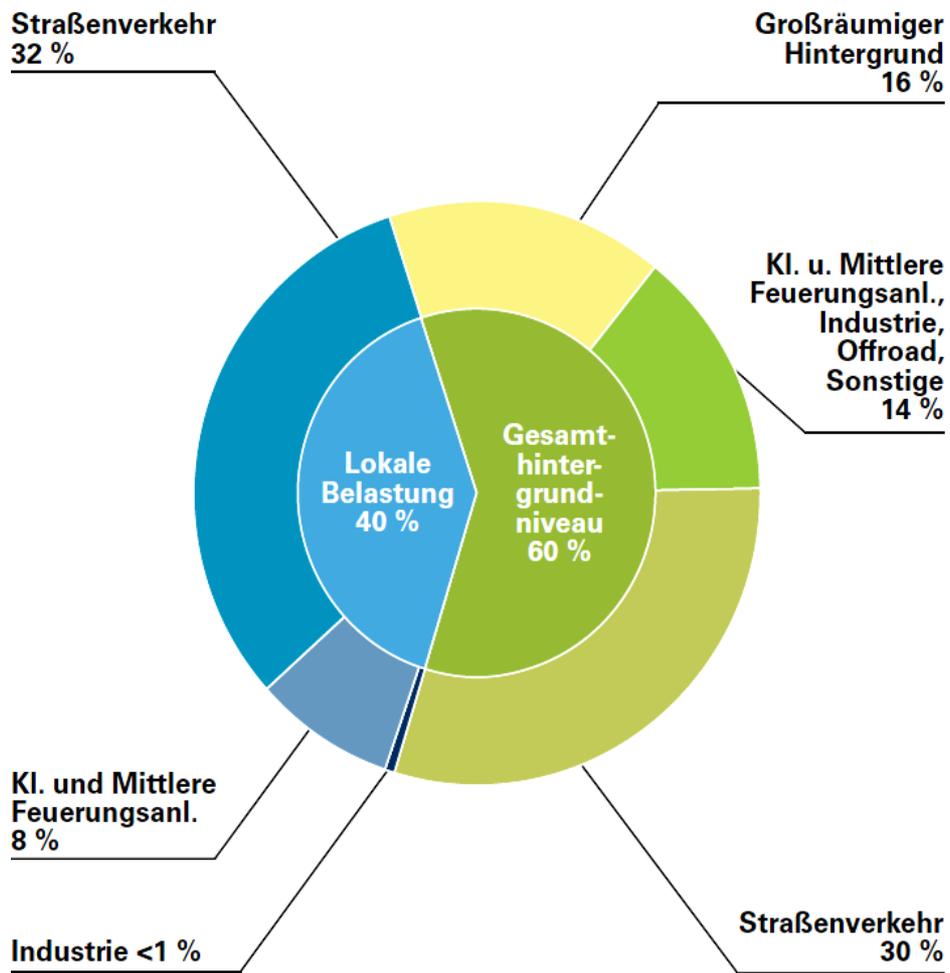


Abbildung 4.13.: Verursacher der NO₂-Immissionsbelastung am Messpunkt Karlsruhe, Straße im Jahr 2008 [38a]

4.4.3. Regierungsbezirk Freiburg

Im Südwesten Baden-Württembergs liegt der Regierungsbezirk Freiburg. Die knapp 2,2 Mio. Einwohner leben auf einer Fläche von 9347 km² und verteilen sich auf den Stadtkreis Freiburg und neun weitere Landkreise. Die geographische Lage der Kommunen ist in Abbildung 4.14. dargestellt, von denen nur die Städte Freiburg und Schramberg die Grenzwerte überschritten [38a].

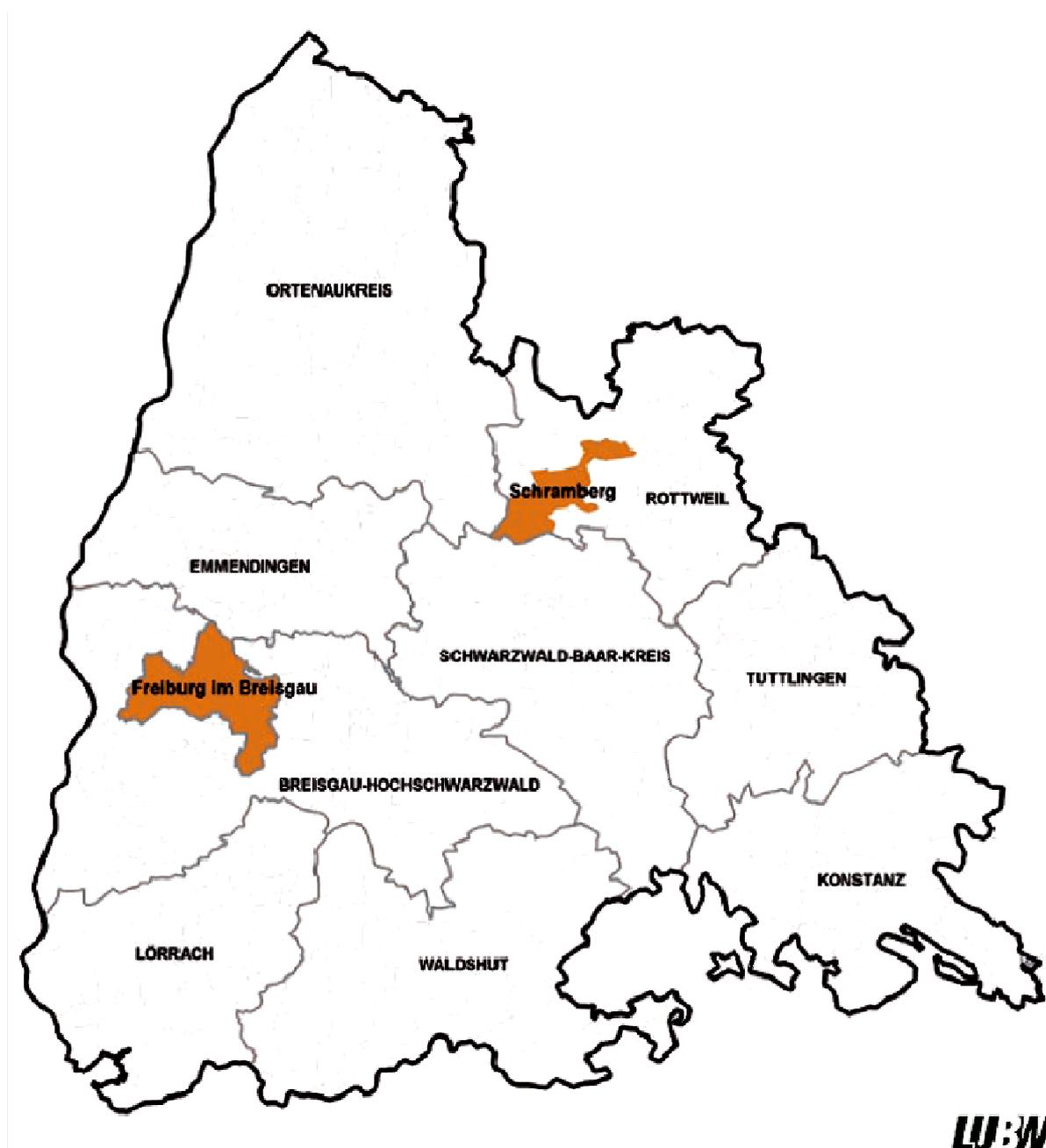


Abbildung 4.14.: Geographische Lage der Überschreitungsbereiche im Regierungsbezirk Freiburg im Jahr 2008 [38a]

4.4.3.1. Messort Freiburg - Schwarzwaldstraße

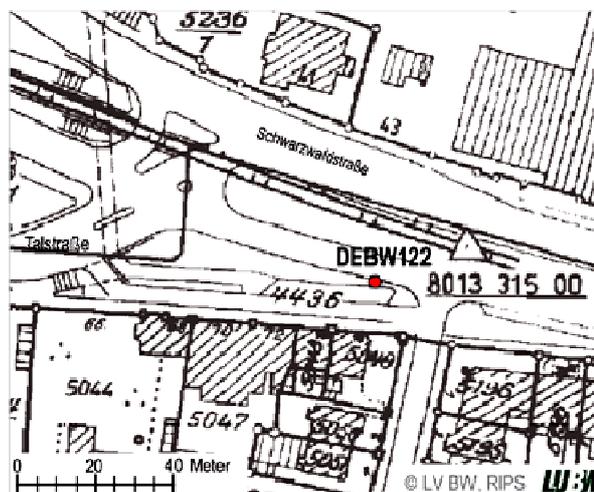
Der Messort Freiburg - Schwarzwaldstraße befindet sich auf einem Grünstreifen zwischen der Schwarzwaldstraße (B 31) und der Talstraße in Richtung Tunnelmündung West des Schützenallee隧nells im Stadtteil Oberau. Die vierspurige Schwarzwaldstraße wird durch einen Mittelgrünstreifen getrennt und zählt zu den Hauptstraßen Freiburgs (siehe Abbildung 4.15).

MESSPUNKTBESCHREIBUNG

Verkehrsmessstation Freiburg Schwarzwaldstraße



Ansicht



Lageplan

Daten der Messstation

Stationscode	DEBW122
Standort/Straße	Schwarzwaldstraße 76
Stadt/Gemeinde	Freiburg, Stadtteil Oberau
Stadt-/Landkreis	Freiburg, Stadt
Regierungsbezirk	Freiburg

Koordinaten

Geographische Koordinaten			
geographische Länge	7° 51' 39"	geographische Breite	47° 59' 23"
Gauß-Krüger Koordinaten			
Rechtswert	3414975	Hochwert	5317380

Umgebungsbeschreibung

Topographie	Ebene
Bebauung	Innenstadt

Gebietsnutzung	Verkehr, Wohnen, Handel, Versorgung
Emissionsquelle	Verkehr
Straßentyp	große breite Straße
Verkehrsstärke	54 400 Kfz/Tag (aus aktuellen Verkehrszählungen: 01.01.-31.12.2008)

Gemessene Komponenten

Komponenten	NO ₂ , PM10, Benzol, Ruß
-------------	-------------------------------------

Abbildung 4.15.: Messpunkt Freiburg - Schwarzwaldstraße [38a]

Im Jahr 2008 konnte die Immissionsgrenze von 40 µg/m³ im Jahresmittel mit 69 µg/m³ nicht eingehalten werden. Die Anzahl der Überschreitungen des 1h-Mittelwertes von 200 µg/m³ lag mit nur einer Überschreitung unter den maximal erlaubten 18 Überschreitungen pro Kalenderjahr (siehe Tabelle 4.5.).

Stations-code	Messpunkt/Messstation	Mess-jahr	NO ₂			JMW in µg/m ³ 3)
			max. 1h-MW in µg/m ³	Anzahl der 1h-MW über 200 µg/m ³ 1)	über dem Beurteilungswert im Messjahr 2)	
Verkehrsmessstation						
DEBW122	Freiburg Schwarzwaldstraße *	2008	215	1	0	69
DEBW122	Freiburg Schwarzwaldstraße *	2007	201	1	0	68
DEBW122	Freiburg, Schwarzwaldstraße	2006	194	0	0	74
DEBWS07	Freiburg, Schwarzwaldstraße	2005	214	2	0	74
DEBWS07	Freiburg, Schwarzwaldstraße	2004	-	-	-	<u>86</u>
DEBWS07	Freiburg, Schwarzwaldstraße	2003	-	-	-	<u>93</u>

Tabelle 4.5.: Messergebnisse in Freiburg [38a]

JMW: Jahresmittelwert; MW: Mittelwert

1) Überschreitungsanzahl des 1h-Mittel von 200 µg/m³ im Kalenderjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Grenzwert ab 2010

2) Überschreitungsanzahl der 1h-Beurteilungswerte im jeweiligen Messjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Beurteilungswert für 2008: 220 µg/m³, für 2007: 230 µg/m³, für 2006: 240 µg/m³, für 2005: 250 µg/m³, für 2004: 260 µg/m³, für 2003: 270 µg/m³

3) unterstrichener Wert: Messungen mit Passivsammler

Am untersuchten Messpunkt in Freiburg betragen die Verursacheranteile an der Immissionsbelastung für NO₂ für den großräumigen Hintergrund 12%, bei den Quellengruppen kleine und mittlere Feuerungsanlagen, industrielle Quellen, Offroad-Verkehr und sonstige Quellen 21% und für den Straßenverkehr 67%. In Abbildung 4.16. sind die Anteile der einzelnen Verursacher dargestellt.

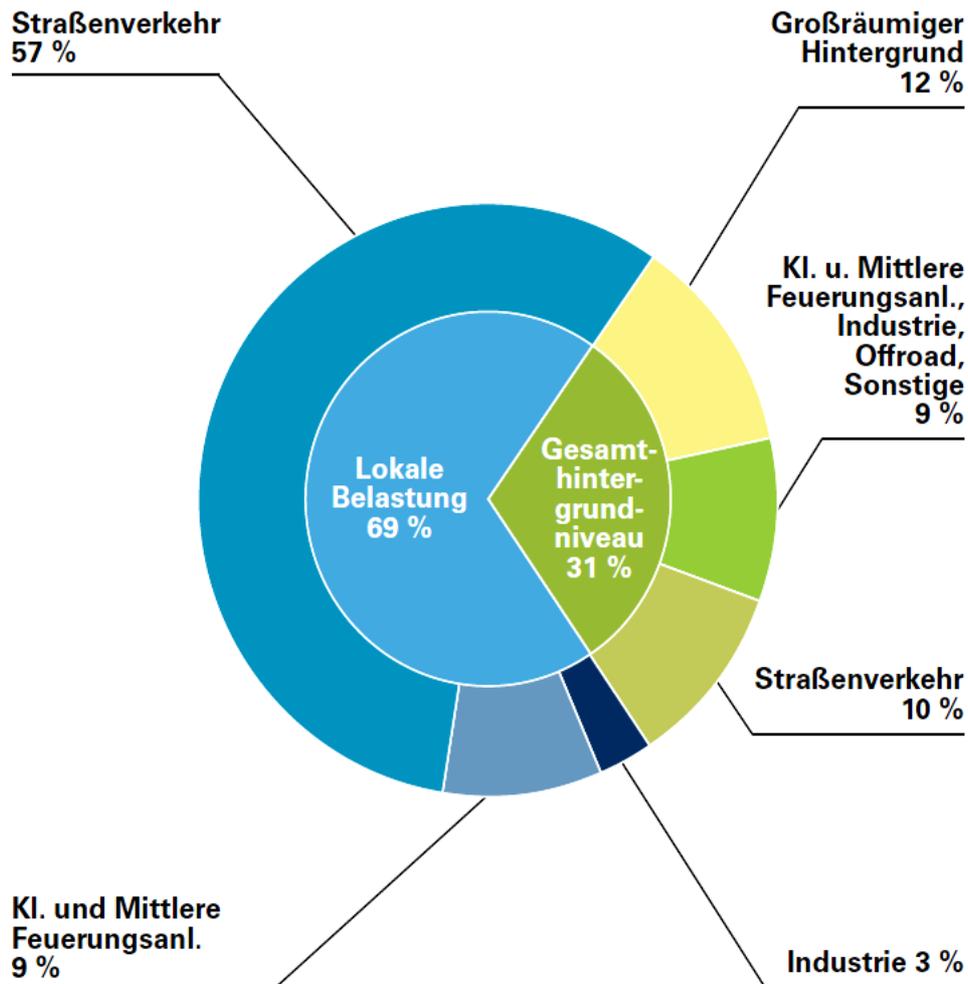


Abbildung 4.16.: Verursacher der NO₂-Immissionsbelastung am Messpunkt Freiburg, Schwarzwaldstraße im Jahr 2008 [38a]

4.4.4. Regierungsbezirk Tübingen

Der Regierungsbezirk Tübingen mit ca. 1,8 Mio. Einwohnern liegt im Südosten von Baden-Württemberg und umfasst den Stadtkreis Ulm sowie acht Landkreise auf einer Fläche von 8918 km². Abbildung 4.17. zeigt farblich markiert die Gebiete Reutlingen, Tübingen und Ulm, in denen die NO₂-Immissionsgrenzwerte im Jahr 2008 überschritten wurden [38a].

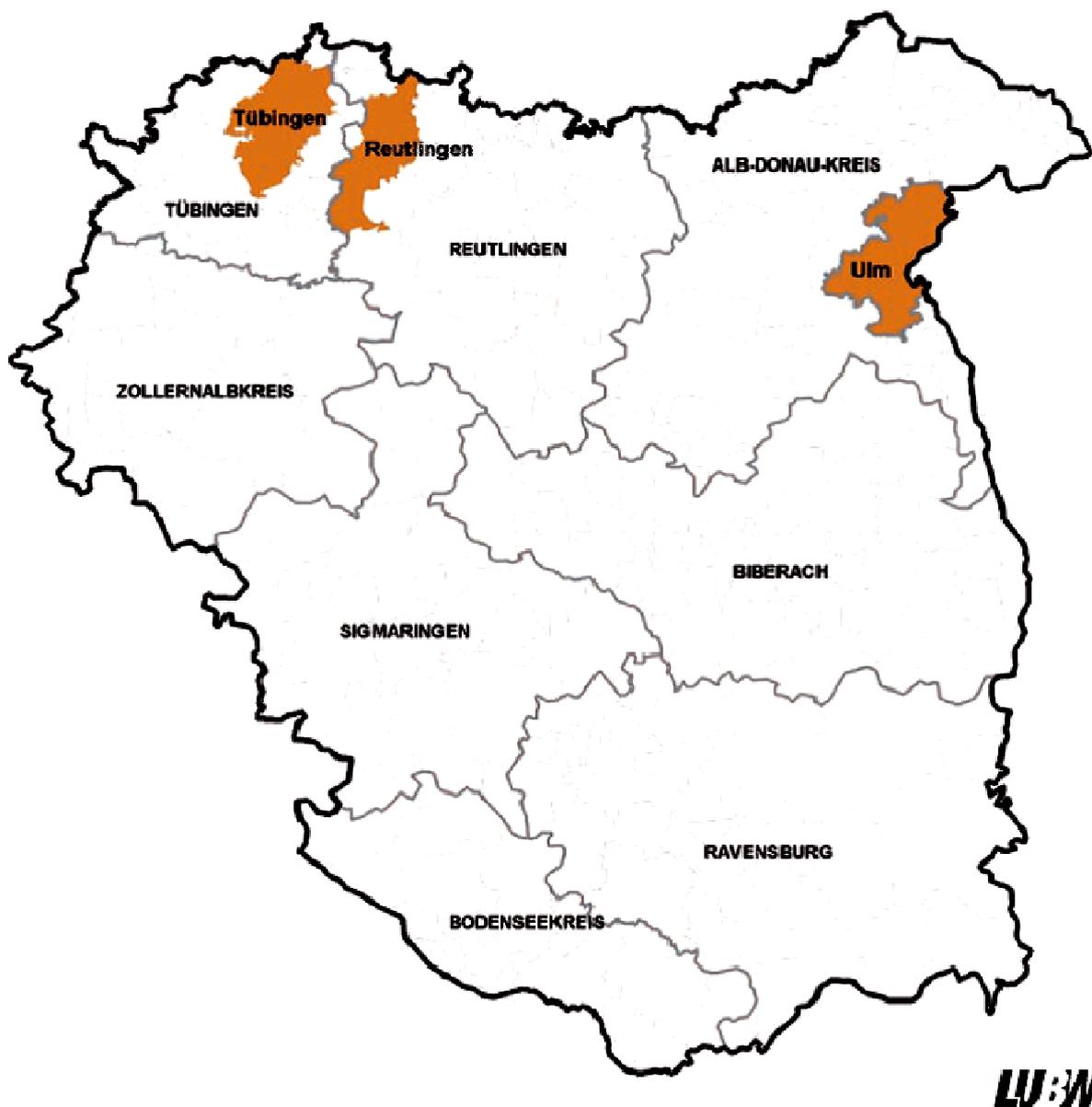


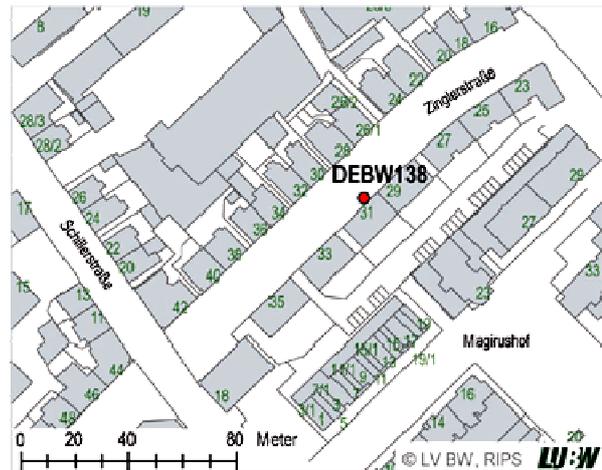
Abbildung 4.17.: Geographische Lage der Überschreitungsbereiche im Regierungsbezirk Tübingen im Jahr 2008 [38a]

4.4.4.1. Messort Ulm - Zinglerstraße

Der Messort Ulm - Zinglerstraße liegt direkt in der Innenstadt an der B 311. Die dreispurige Einbahnstraße wird von mehrstöckigen Wohngebäuden begrenzt (siehe Abbildung 4.18).

MESSPUNKTBESCHREIBUNG

Messpunkt Ulm, Zinglerstraße



Ansicht

Lageplan

Daten der Messstation

Stationscode	DEBW138
Standort/Straße	Zinglerstraße 31
Stadt/Gemeinde	Ulm
Stadt-/Landkreis	Ulm, Stadt
Regierungsbezirk	Tübingen

Koordinaten

Geographische Koordinaten			
geographische Länge	9° 59' 5"	geographische Breite	48° 23' 44"
Gauß-Krüger Koordinaten			
Rechtswert	3572907	Hochwert	5362334

Umgebungsbeschreibung

Topographie	Ebene
Bebauung	Innenstadt
Gebietsnutzung	Verkehr, Wohnen
Emissionsquelle	Verkehr
Straßentyp	Straßenschlucht
Verkehrsstärke	20 000 Kfz/Tag

Gemessene Komponenten

Komponenten	NO ₂ (passiv), PM10
-------------	--------------------------------

Abbildung 4.18.: Messpunkt Ulm - Zinglerstraße [38a]

Der im Jahr 2008 gemessene NO₂-Jahresmittelwert von 63 µg/m³ lag auf einem ähnlichen Niveau wie in den Vorjahren und überschritt den ab 2010 geltenden NO₂-Grenzwert von 40 µg/m³ (siehe Tabelle 4.6.).

Stations-code	Messpunkt/Messtation	Mess-jahr	NO ₂			JMW in µg/m ³ ³⁾
			max. 1h-MW in µg/m ³	Anzahl der 1h-MW über 200 µg/m ³ ¹⁾	über dem Beurteilungswert im Messjahr ²⁾	
Spotmesspunkt						
DEBW138	Ulm, Zinglerstraße	2008	–	–	–	<u>63</u>
DEBW138	Ulm, Zinglerstraße	2007	–	–	–	<u>61</u>
DEBW138	Ulm, Zinglerstraße	2006	–	–	–	<u>65</u>

Tabelle 4.6.: Messergebnisse in Ulm [38a]

JMW: Jahresmittelwert; MW: Mittelwert

1) Überschreitungsanzahl des 1h-Mittel von 200 µg/m³ im Kalenderjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Grenzwert ab 2010

2) Überschreitungsanzahl der 1h-Beurteilungswerte im jeweiligen Messjahr; maximal sind 18 Überschreitungen zulässig; Beurteilungswert für 2008: 220 µg/m³, für 2007: 230 µg/m³, für 2006: 240 µg/m³, für 2005: 250 µg/m³, für 2004: 260 µg/m³, für 2003: 270 µg/m³

3) unterstrichener Wert: Messungen mit Passivsammler

In der Ursachenanalyse 2008 für NO₂ betrug der Anteil des großräumigen Hintergrundes in Ulm 13% und der Straßenverkehr insgesamt bei 58%. Die Quellengruppen kleine und mittlere Feuerungsanlagen, industrielle Quellen, Offroad-Verkehr und sonstige Quellen haben zusammen einen Anteil von 29% (siehe Abbildung 4.19.).

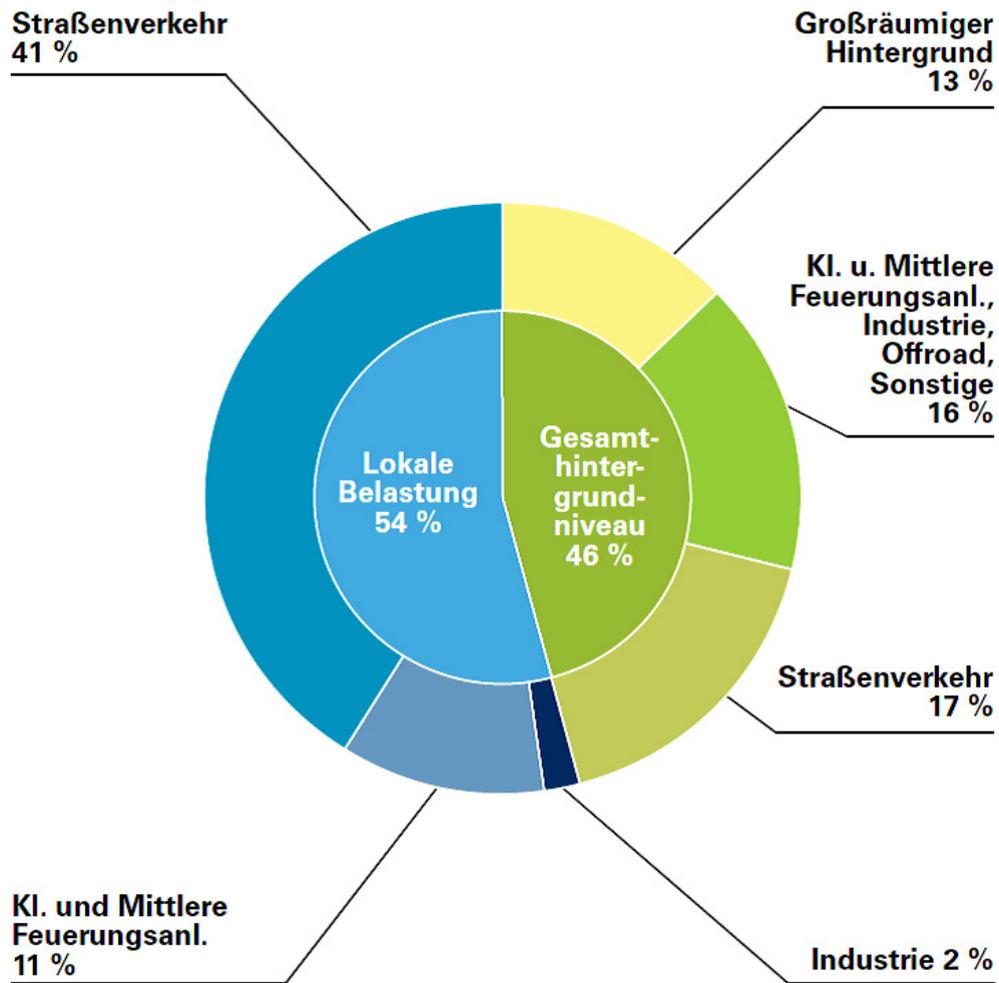


Abbildung 4.19.: Verursacher der NO₂-Immissionsbelastung am Messpunkt Ulm, Zinglerstraße im Jahr 2008 [38a]

4.5. Maßnahmen zur Verbesserung der Luftqualität

Die Regierungspräsidien der einzelnen Regierungsbezirke sind für die Erstellung und Durchführung von Luftreinhalte-/Aktionsplänen verantwortlich. Der überwiegende Teil der ergriffenen Maßnahmen bezieht sich auf den Verkehrssektor, der in Kapitel 5 behandelt wird. Die im Folgenden vorgestellten allgemeinen Instrumente tragen nur einen geringen Teil zur Reduktion des Stickstoffdioxids bei jedoch erfordert die Höhe der Überschreitungen jedwedes Mittel. In allen Städten und Gemeinden Baden-Württembergs werden sie, abhängig von den lokalen Gegebenheiten, angewandt.

4.5.1. Industrie und Gewerbe

Das Bundesimmissionsschutzgesetz [7b] und die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft [8] regeln im Detail die Emissionsmengen von Betrieben. Durch sie kann vor allem eine Sanierung bzw. Stilllegung von Altanlagen erreicht werden, die im Vergleich zu neuen Anlagen ein Vielfaches an Emissionen verursachen. Die weitere Verschärfung der Grenzwerte und neue technische Lösungen werden auch in Zukunft einen Rückgang der Immissionen bewirken, wobei das auszuschöpfende Potential aus technischen und mengenmäßigen Gründen begrenzt ist [38a, 47, 48].

4.5.2. Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV)

Ein weiterer zentraler Baustein des Maßnahmenkataloges ist die Verlagerung von Fahrten des motorisierten Individualverkehrs auf den ÖPNV um Emissionen wirksam zu vermindern. Die Städte und Gemeinden sind dazu angehalten die Attraktivität des ÖPNV zu steigern und gleichzeitig das Angebot zu erweitern.

Unter anderem sind in diesem Zusammenhang von den Verkehrsbetrieben und den öffentlichen Stellen die „Umweltfahrkarten“ entwickelt worden. Die kommunalen Stellen bezuschussen die Fahrkarten um durch die geringeren Fahrtkosten eine Reduktion des Individualverkehrs zu erreichen [38a, 47, 48].

4.5.3. Kleinf Feuerungsanlagen

Nach dem Vorbild von Industrie und Gewerbe sind nach dem gleichen Prinzip durch das Bundesimmissionsschutzgesetz [7b] und die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft [8] die Optimierung von Kleinf Feuerungsanlagen durch die privaten Haushalte vorgeschrieben. Hinzu kommt noch die Sensibilisierung der Öffentlichkeit über die Auswirkungen von Holzverbrennung und die Erstellung von Bebauungsplänen, welche Kleinf Feuerungsanlagen verbieten.

4.5.4. Sonstige Maßnahmen

Zu den sonstigen Maßnahmen zählt ein Verbrennungsverbot von Gartenabfällen. Pflanzliche Abfälle dürfen aufgrund von Verordnungen der Landesregierung über die Beseitigung pflanzlicher Abfälle außerhalb von Abfallbeseitigungsanlagen nur noch unter bestimmten Voraussetzungen verbrannt werden. Die kontrollierten Bedingungen der Verbrennung bzw. die Abgasnachbehandlung bewirken eine Reduktion der Emissionen [38a, 47, 48].

Ein weiteres Konzept ist die Verbesserung der Baustellenlogistik. Hierunter versteht man unter anderem die Lenkung und Verringerung des Baustellenverkehrs. Ein geringerer Maschineneinsatz, die Vermeidung von Lkw-Leerfahrten und die Bewahrung von Grünflächen bei der Bautätigkeit tragen alle zur Minderung der NO₂-Belastungen bei [38a, 47, 48].

Das österreichische Umweltministerium startete ein Pilotprojekt auf Baustellen mit verschiedenen Maßnahmen. Durch ein Bonus-Malus-System wurde der Anteil an Lkws mit Euro III und höheren Abgasnormen auf 85% gesteigert und gleichzeitig die zurückgelegten Lkw-Kilometer um 75% gesenkt. Positiv wirkten sich auch die Abfallsortierung und das Recycling vor Ort aus, die eine Absenkung der Lkw-Fahrten um 35% realisierten [61].

Kapitel 5

Stickstoffdioxidemissionen des Verkehrs

5.1. Bedeutung des Verkehrs

Ziel der vorangegangenen Kapitel war es die Mechanismen, Zusammenhänge und Ursachen der Luftverschmutzung durch Stickoxide zu ermitteln. Im Folgenden wird der mit Abstand größte Emittent, der Verkehr, mit einem dominanten Anteil von annähernd 50% an den anthropogenen Schadstoffemissionen genau analysiert. Differenziert man die Verursacherguppen nach Verkehrsbereichen (siehe Abbildung 5.1.) und bezieht diese auf deren spezifische Kraftstoffverbräuche und damit Emissionen (siehe Tabelle 5.1.), so hat der Straßenverkehr mit ca. 88% der NO_x -Emissionen zentrale Bedeutung [38b].

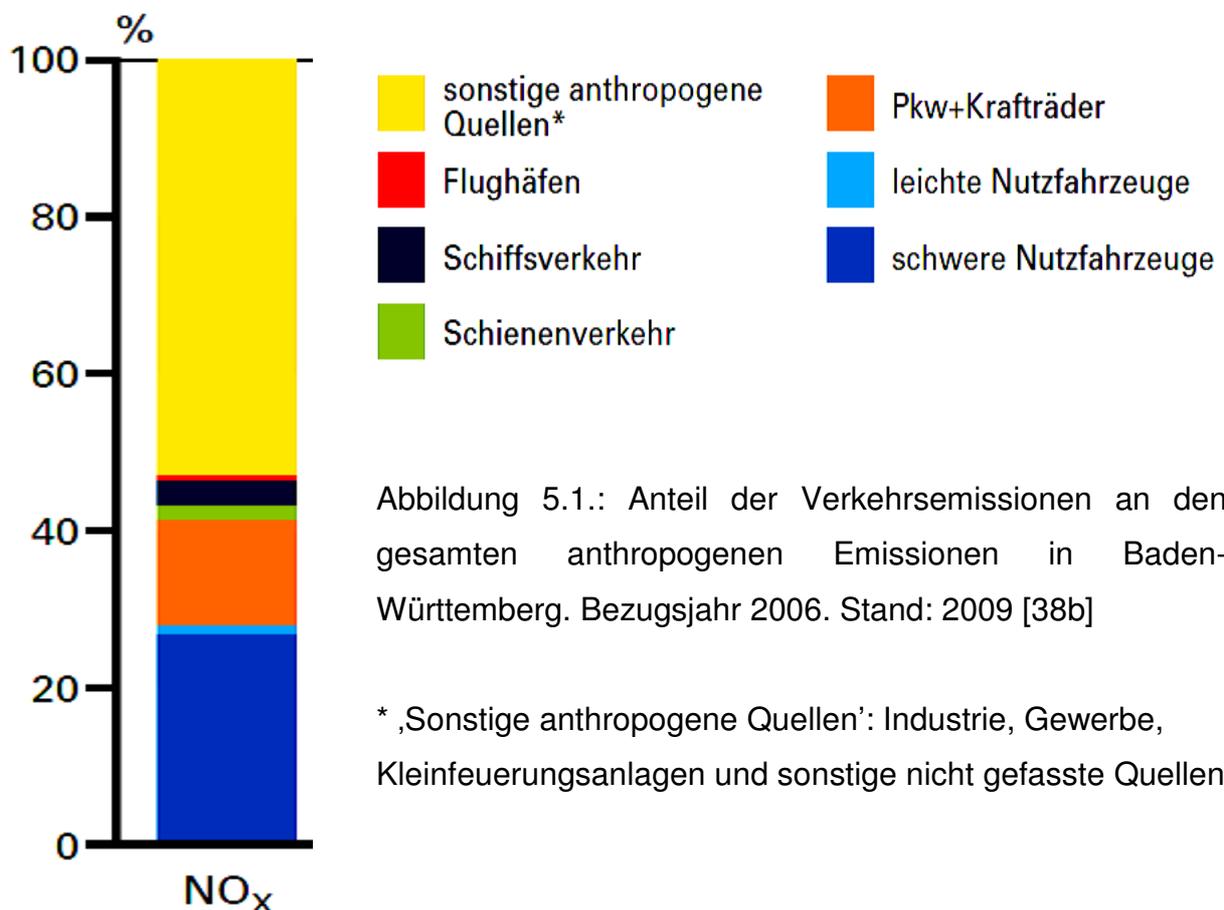


Abbildung 5.1.: Anteil der Verkehrsemissionen an den gesamten anthropogenen Emissionen in Baden-Württemberg. Bezugsjahr 2006. Stand: 2009 [38b]

* ‚Sonstige anthropogene Quellen‘: Industrie, Gewerbe, Kleinfeuerungsanlagen und sonstige nicht gefasste Quellen

	Straßen- verkehr	Schiffs- verkehr ²⁾	Flug- verkehr ³⁾	Schienen- verkehr	Summe
Angaben in Prozent					
Kraftstoffverbrauch	96,3	1,7	1,1	0,9	100
Stickstoffoxide (NO _x)	87,7	6,8	1,6	4,0	100

Tabelle 5.1.: Anteile der Verkehrsbereiche am Kraftstoffverbrauch und an den Verkehrsemissionen in Baden-Württemberg 2006. Stand: 2009 [38b]

2) einschließlich Schiffsverkehr auf den Teilen des Bodensees und des Rheins, die nicht dem Hoheitsgebiet von Baden-Württemberg zuzuordnen sind

3) Bodennaher Bereich bis 3 000 ft (ca. 1000 m) Flughöhe

5.2. Entwicklung der NO₂-Belastung

Trotz insgesamt rückläufiger NO_x-Emissionen des Verkehrs (siehe Abbildung 5.2.) werden an Hauptverkehrsstraßen meist nur sehr geringe Abnahmen und teilweise sogar Zunahmen der NO₂-Konzentrationen gemessen (siehe Abbildung 5.3.).

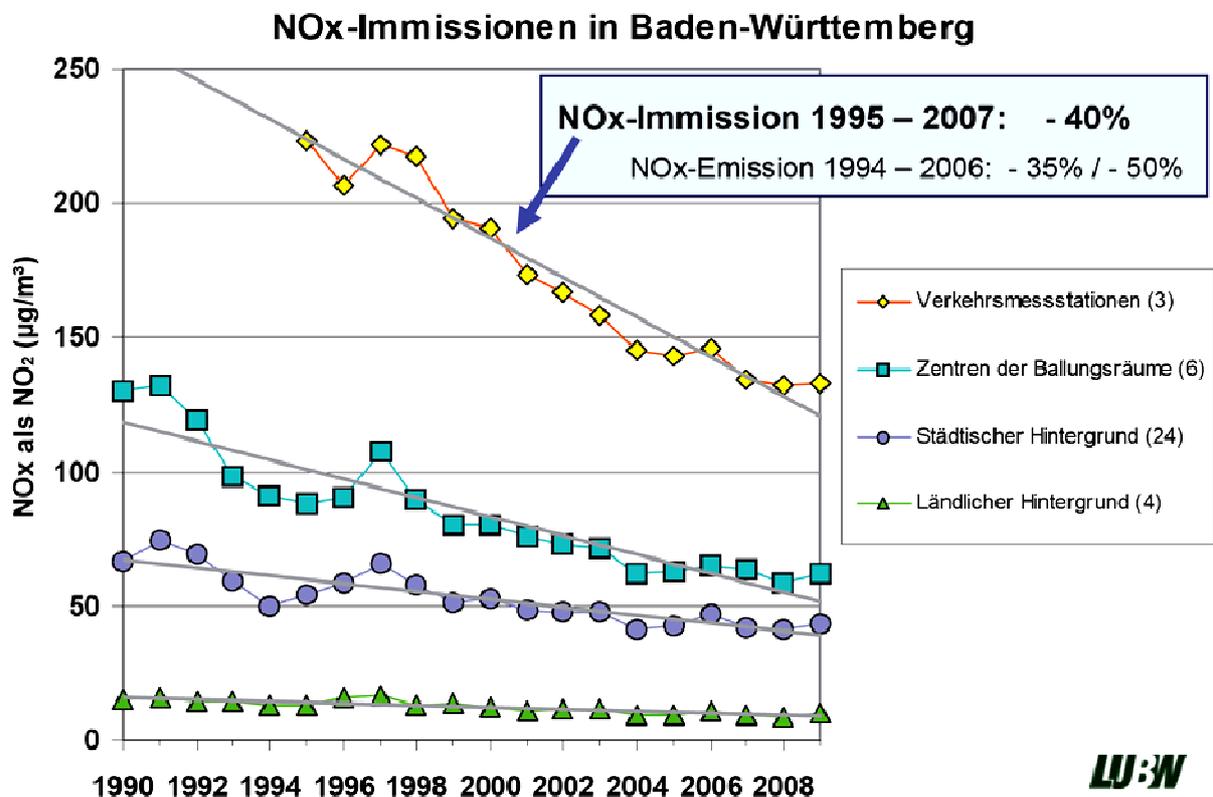


Abbildung 5.2.: Entwicklung der Stickstoffoxid (NO_x)-Immissionen; Jahresmittelwerte von 37 Stationen, 1990 -2009 [38c]

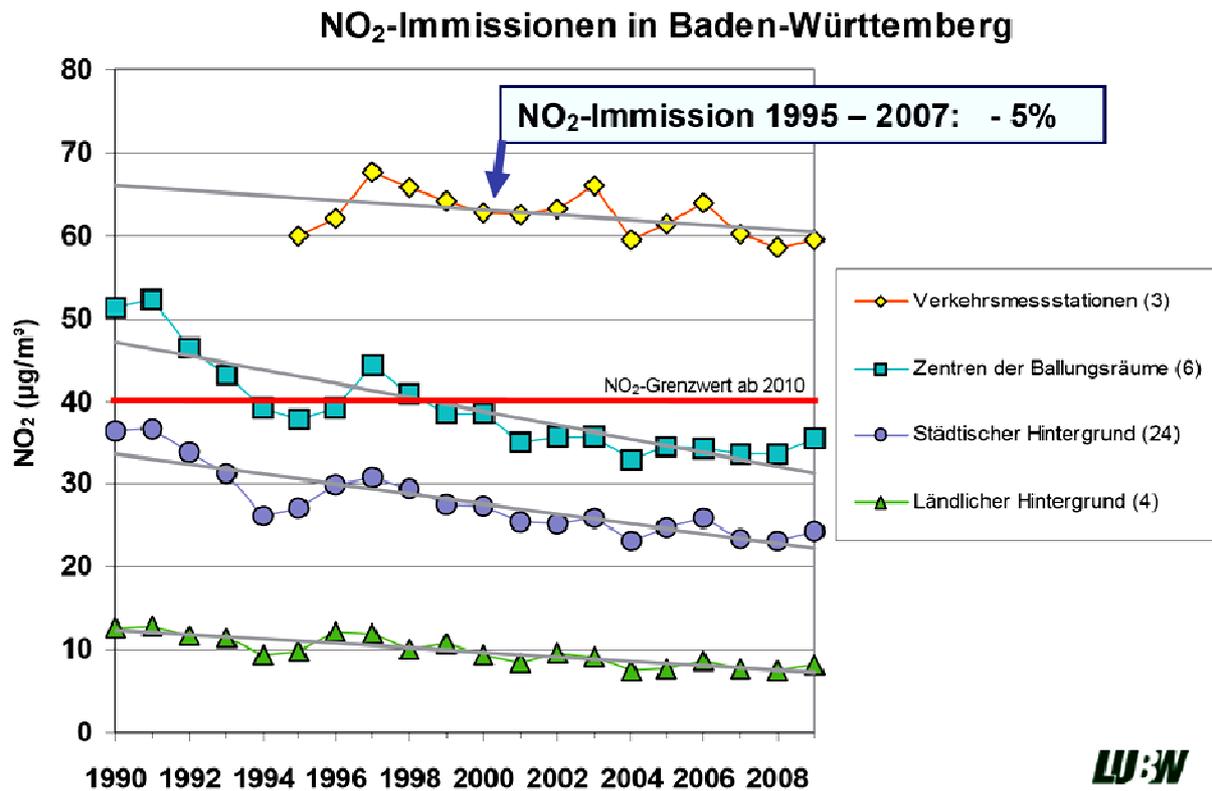


Abbildung 5.3.: Entwicklung der Stickstoffdioxid (NO₂)-Immissionen; Jahresmittelwerte von 37 Stationen, 1990 -2009 [38c]

Die Ursache dieser Entwicklung ist im Wesentlichen auf drei Gründe zurückzuführen.

Der erste Grund liegt in der Zunahme der Fahrzeuge mit Dieselmotoren in der gesamten Fahrzeugflotte, die im Vergleich zu Benzin-Pkw einen signifikant höheren NO_x-Ausstoß aufweisen (siehe Abbildung 5.4.).

Bisher werden 87% der Fahrleistungen von Pkws erbracht, die gleichzeitig für 32% der NO_x-Emissionen verantwortlich sind. Steigt der Anteil der Dieselfahrzeuge im Privatbereich, so steigt, aufgrund der unterschiedlichen Emissionsprofile zwischen Diesel- und Ottomotoren, auch der Stickoxidausstoß. Staatliche Förderung und geringer Kraftstoffverbrauch sind Gründe für die deutliche Zunahme privater Dieselpkw in den letzten Jahren [38b, 38c].

Schwere Nutzfahrzeuge, die ausschließlich mit Dieselmotoren ausgerüstet sind, tragen nur einen Anteil von ca. 8% zu den Fahrleistungen bei, emittieren jedoch 65% der Stickoxide. Die steigende Nachfrage nach Gütertransporten und rückläufige Lagerhaltung bedingen sowohl mehr Fahrten als auch eine größere Anzahl an Lkw.

Die Veränderungen in diesem Bereich zeigen die größten Auswirkungen auf die Stickoxidemission.

Leichte Nutzfahrzeuge haben ein vergleichbares Emissionsniveau zu Pkw-Dieseln und erreichen ab Euro 5 sogar denselben Wert. Eine differenzierte Betrachtung nach Fahrleistungen und Stickoxidanteil ist aus diesem Grund schwierig, jedoch wird auch in diesem Bereich künftig der Transportbedarf steigen und damit die Anzahl dieser Dieselfahrzeuge erhöhen [38b, 38c].

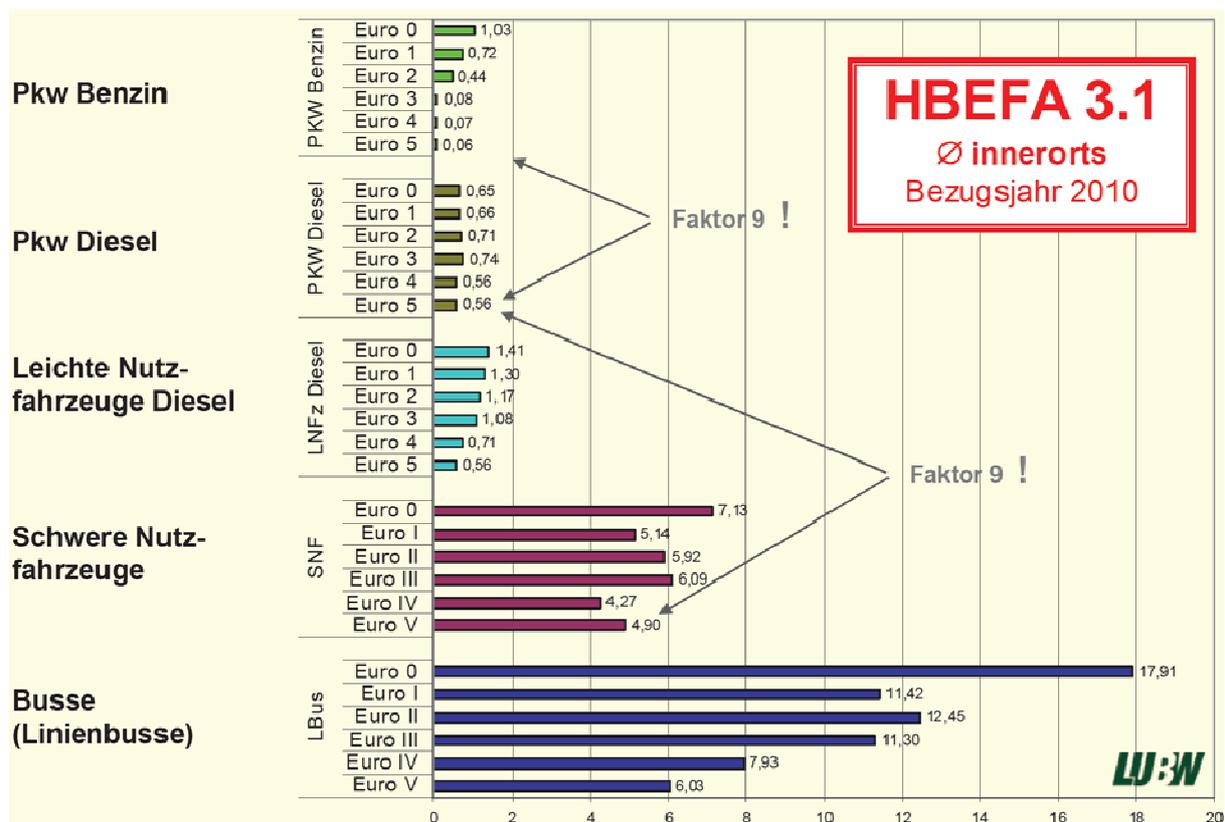


Abbildung 5.4.: Emissionsfaktoren für Stickstoffoxide (NO_x) in g/km nach Emissionskonzept [38c]

HBEFA = Handbuch Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs

Der zweite Grund liegt im Einsatz von Oxidationskatalysatoren bei der Abgasnachbehandlung. In Abbildung 5.4. wird deutlich welche beachtlichen Reduktionen im Schadstoffausstoß durch die Einführung der Abgasnormen Euro 0 bis Euro 5 gerade bei Benzin-Pkw, aber auch bei Diesel-Pkw und Lkw erreicht worden sind. Der Vergleich zwischen Benzin- und Diesel-Pkw der Stufe Euro 5 zeigt, dass die realen NO_x-Emissionen von Diesel-Pkw immer noch mehr als das 9-fache über der NO_x-Emission der Benzin-Pkw liegen. Die NO_x-Emissionen schwerer Nutzfahrzeuge lassen besonderen Handlungsbedarf erkennen, da sie um noch einen weiteren

Faktor 9 über den Diesel-Pkw liegen. Die technische Lösung zur Abgasnachbehandlung und damit die Erreichung der Euronormen war auf einzelne Schadstoffe fokussiert und ließ ein Gesamtkonzept außer Acht. Dies hatte zur Folge, dass durch die Einführung der Oxidationskatalysatoren für Diesel-Pkw ab der Stufe Euro 3 nicht nur eine Minderung der unverbrannten Kohlenwasserstoffe und des Kohlenmonoxid im Abgas realisiert wurde, sondern dass ca. ein Drittel der NO-Emissionen in NO₂ umgewandelt wurde. Im Anschluss an die Abgasnachbehandlung werden bereits 50% als primäres Stickstoffdioxid emittiert im Gegensatz zu Otto-Motoren, die ca. 5% der Stickstoffoxide in Form von primärem NO₂ ausstoßen. Bei schweren Nutzfahrzeugen mit CRT-Systemen, einer Kombination aus Oxidationskatalysator und Diesel-Partikelfilter, werden sogar bis zu 60% der Stickoxide als direktes NO₂ emittiert [38b, 38c].

Die Störung des in Kapitel 3.2. beschriebenen Gleichgewichts der photochemischen Reaktion kann als dritter Grund erhöhter NO₂-Emissionen betrachtet werden. Stark rückläufige NO-Emissionen an den Verkehrsmesspunkten führen zu einem verringerten Ozonabbau. Aus höheren Ozonkonzentrationen resultiert dann eine Verschiebung des Gleichgewichtes hin zu NO₂. Der Einfluss dieses Effektes ist jedoch schwer zu bestimmen und ist im Vergleich zum direkt emittierten NO₂ auch von untergeordneter Bedeutung [38b]. Abbildung 5.5. zeigt die Verteilung der NO₂-Beiträge separiert nach den einzelnen Fahrzeugkategorien.

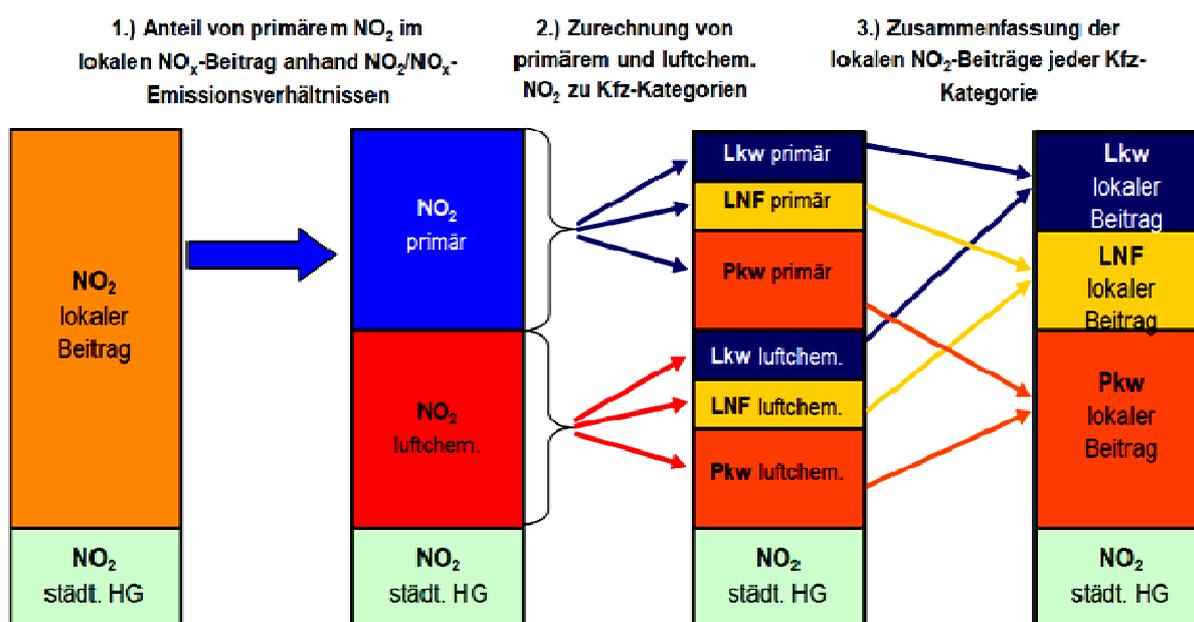


Abbildung 5.5.: Ermittlung der Beiträge einzelner Kfz-Kategorien zur

5.3. Maßnahmen zur Senkung der Abgasemissionen

Der Verkehrssektor wurde als Hauptemittent von Stickoxiden ermittelt, weshalb die Maßnahmen zur Senkung der Emissionen hauptsächlich auf diesen fokussiert sind. Dieses Kapitel präsentiert die verkehrsbeeinflussenden und technischen Lösungen, die in diesem Zusammenhang entwickelt wurden.

5.3.1. Umweltzone

Die Realisierung der in Kapitel 3 beschriebenen Umweltzone soll die Verkehrsströme in der Art beeinflussen, dass die lokalen und im besten Fall die absoluten Emissionen abnehmen. Die bundesweit, gesammelten Erkenntnisse zeigen, abhängig vom Einzelfall, entweder einen Rückgang der Verkehrsmenge oder aber zumindest einen Rückgang der Schadstoffkonzentration. Legt man anspruchsvolle Umweltkriterien zu Grunde, d.h. definiert man einen flächenmäßig großen Stadtbereich für den ausschließlich Fahrzeuge mit grüner Plakette zugelassen sind (siehe Abbildung 5.6.), so können verschiedene Effekte beobachtet werden [2, 39, 50].

Im Individualverkehr findet eine Veränderung der Flottenzusammensetzung durch technische Nachrüstung oder Austausch der Altfahrzeuge statt. Das heißt der Anteil an Kfz mit grüner Plakette steigt stark an, wohingegen die Rate aller anderen Schadstoffgruppen (1 = keine Plakette, 2 = rote Plakette, 3 = gelbe Plakette) rapide sinkt. Außerdem steigert die Umweltzone die Attraktivität des ÖPNV und hilft in Verbindung mit dem Umweltticket bei der Reduktion der Gesamtemissionen.

Im Bereich von Industrie und Gewerbe hat die notwendige Modernisierung der Fahrzeuge ebenfalls eine Verbesserung der Abgasemissionen zur Folge. Der zweite Effekt, ausgelöst durch den finanziellen Aufwand für die erforderliche Neuanschaffung bzw. Nachrüstung, führt zu einer Erhöhung der Transportkosten. Die Kostensteigerung wirkt indirekt auf die Verkehrsmenge, da Lieferfahrten teurer werden und daher optimiert werden müssen. Je teurer eine Fahrt wird, desto größer ist der Anreiz Leerfahrten zu vermeiden. Durch bessere Planung wird die Anzahl der Fahrten reduziert und damit sowohl das Verkehrsaufkommen als auch die Gesamtemission reduziert.

In verschiedenen Studien wurde das Potential der Umweltzone sowohl abgeschätzt als auch durch konkrete Messungen bestimmt, mit dem Ergebnis, dass die Wirkung

direkt von der Entschiedenheit der Beschränkungen abhängt. Je schneller Fahrzeuge der Schadstoffgruppen 1, 2 und 3 bei Pkw sowie 0, I und II bei Lkw Fahrverbote für die Umweltzonen erhalten desto größer ist die Reduktion.

In realistischen Szenarien, d.h. politisch und gesellschaftlich durchsetzbar, kann von einer Reduktion der NO₂-Belastung allein durch die Umweltzone von ca. 15% ausgegangen werden [2, 39, 50].

In Abbildung 5.6. ist als Beispiel die Umweltzone Stuttgart zu sehen, für die ab dem 1. Juli 2010 die Einfahrt nur noch mit gelber und grüner Plakette gestattet ist. Voraussichtlich wird ab dem 1. Januar 2012 die Regelung weiter verschärft und es werden nur noch grüne Plaketten zugelassen.

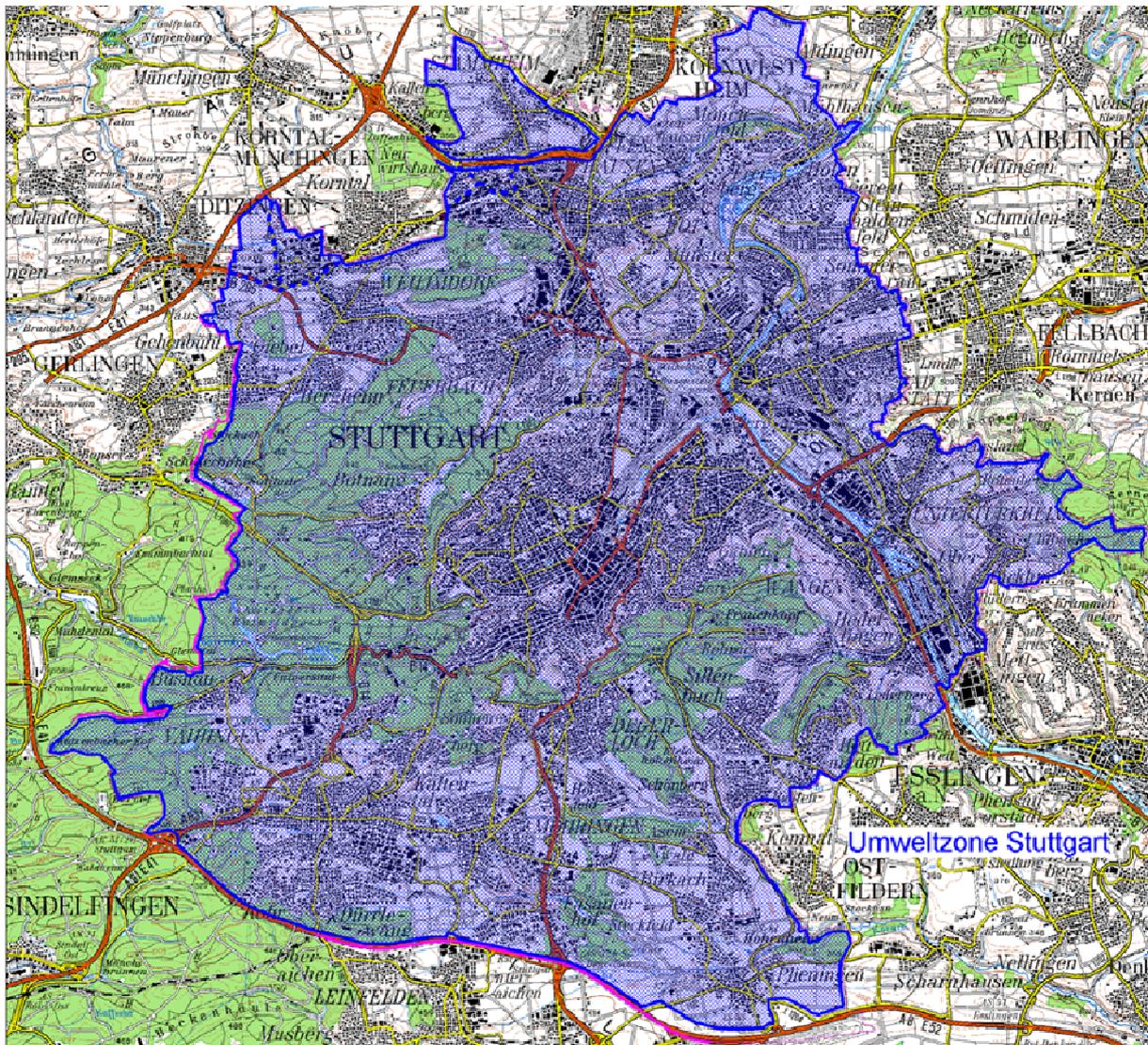


Abbildung 5.6.: Umweltzone Stuttgart [2]

5.3.2. Geschwindigkeitsreduzierung

Der emissionsmindernde Effekt einer Geschwindigkeitsreduzierung konnte aufgrund der vorliegenden Daten des Handbuches der Emissionsfaktoren des Straßenverkehrs erst ab 75 km/h validiert werden.

Legt man eine durchschnittliche Pkw-Flotte bei freier Fahrt auf der Autobahn zugrunde, so ergibt sich nach Abbildung 5.7. eine ausgeprägte Abhängigkeit von Geschwindigkeit und NO_x-Emission. Im Bereich von 75 - 145 km/h geht mit zunehmender Geschwindigkeit ein erheblicher Anstieg der Emission einher. Die Steigerung des Tempos um 50% bewirkt eine knapp 65%-ige Erhöhung des Stickoxidausstoßes. Damit stellen Geschwindigkeitsbeschränkungen auf Autobahnen eine geeignete Maßnahme zur Reduzierung der Schadstoffemissionen dar [38b].

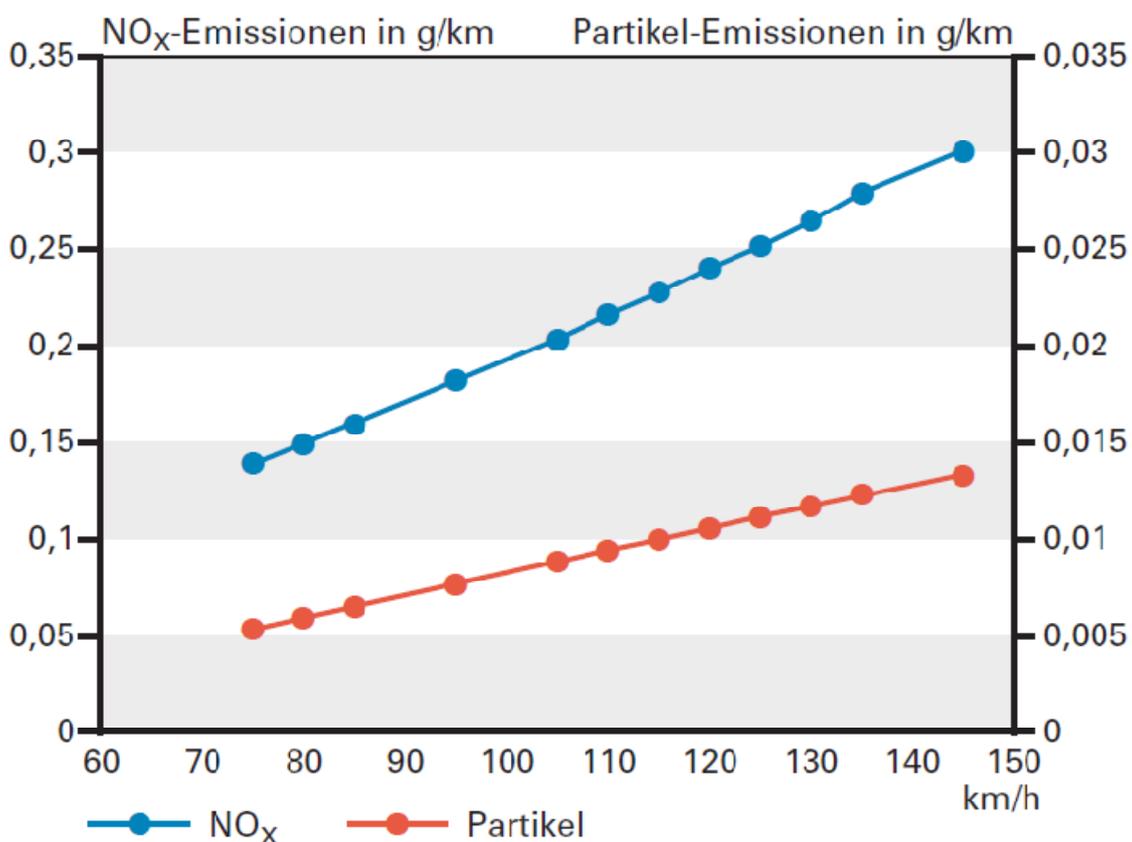


Abbildung 5.7.: Pkw-Emissionen auf Bundes-Autobahnen (BAB) bei konstanter Geschwindigkeit, Bezugsjahr 2008 [38b]

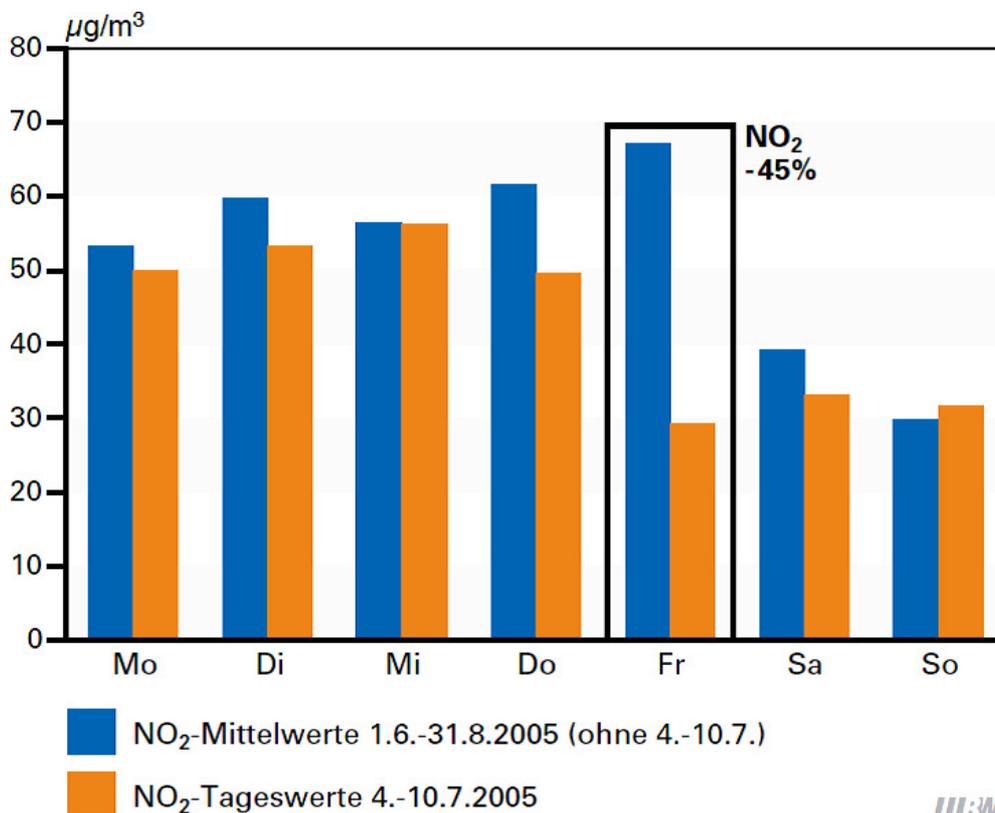
Die Bewertung eines innerörtlichen Tempolimits ist bisher nur auf einzelne Erprobungen zurückzuführen und deshalb mit großer Unsicherheit behaftet. Die Absenkung der Geschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h birgt vermutlich ein Einsparungspotential von 10% [50].

5.3.3. Generelles Fahrverbot

Dem Thema generelles Fahrverbot kommt im Zusammenhang mit den Luftreinhalte- und Aktionsplänen zur Erreichung der Emissionsgrenzwerte eine besondere Bedeutung zu.

Einen Anhaltspunkt über das Potential liefert die 12-stündige vollständige Sperrung zahlreicher Hauptverkehrsstraßen anlässlich der Tour de France am Freitag, den 8. Juli 2005 in der Karlsruher Innenstadt. Die Messstation „Karlsruhe-Straße“ befindet sich direkt am abgesperrten Bereich und kann daher den Vergleich mit den mittleren Tageswerten des Sommerquartals ohne die Tourwoche bieten.

Abbildung 5.8. zeigt, dass durch die Straßensperrung ein Rückgang von 45% des Stickstoffdioxids und sogar 70% des Stickstoffmonoxids erreicht werden konnte [38b].



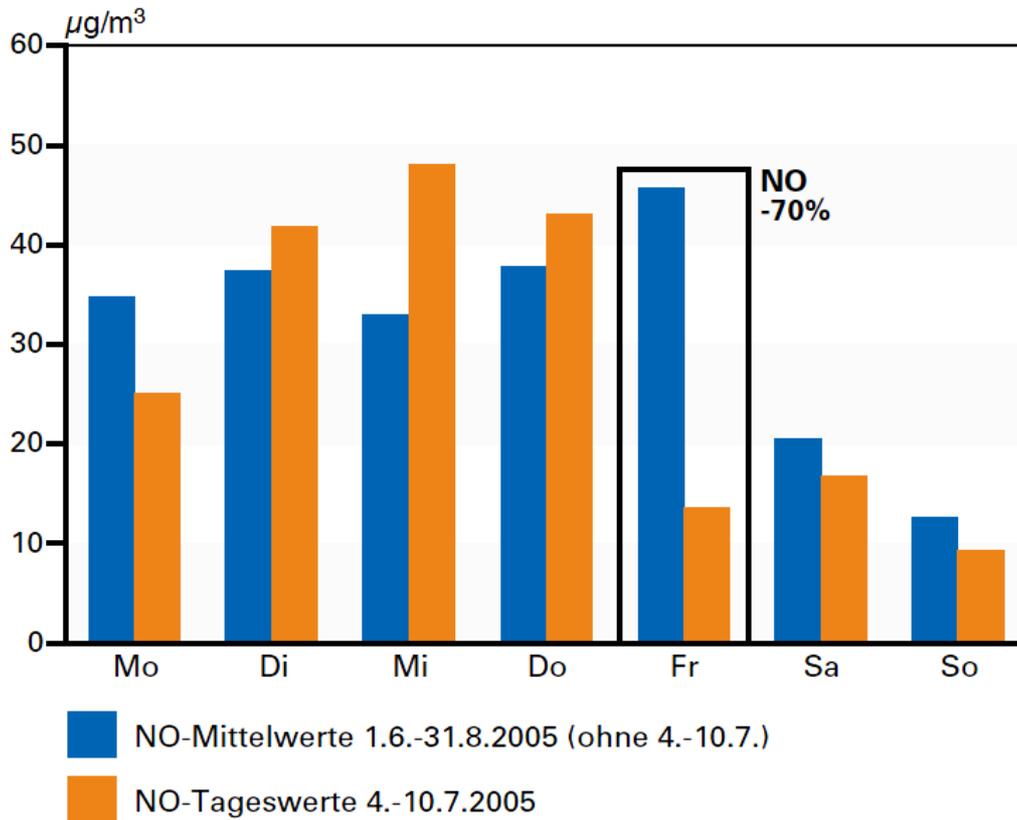


Abbildung 5.8.: Auswirkung einer 12-stündigen Straßensperrung auf die NO₂- und NO Konzentrationen an der Station ‚Karlsruhe-Straße‘.

Linke Säule: Mittlere Konzentration für die Wochentage im Sommerquartal (1.6.-31.8.2005)

Rechte Säule: Tageswerte in der Woche 4.-10.7.2005.

Die Straßensperrung war am Freitag, dem 8.7.2005 [38b].

In einer anderen Versuchskonfiguration wurden ebenfalls massive Schadstoffeinsparungen beobachtet, die jedoch auf ein Lkw-Durchfahrtsverbot abzielte und nicht auf eine Vollsperrung. Dadurch konnte lokal ein Rückgang des Lkw-Verkehrs um 15% gemessen werden, was eine Senkung des Stickstoffdioxids um ca. 20% zur Folge hatte. Dem Risiko einer räumlichen Verlagerung anstatt einer Reduktion der Schadstoffe kann mit flächendeckenden Umweltzonen und gesetzlich verbindlichen Abgasgrenzwerten entgegen gewirkt werden [2, 39, 50].

Die Ergebnisse zeigen, dass Fahrverbote ein adäquates Mittel zur Einhaltung der ab 2010 gültigen Grenzwerte sind. Die wirtschaftlichen und sozialen Folgen dieses Instrumentes müssen an dieser Stelle aber kritisch betrachtet werden.

Es ist kaum absehbar welche finanziellen Verluste und gesellschaftlichen Auswirkungen eine solche Maßnahme mit sich bringt. Einen Eindruck über die vielfältigen Wirkweisen der Mobilitätseinschränkung geben das Sonntagsfahrverbot im Zuge der Ölkrise von 1973 und die stellenweise chaotischen Zustände, die durch die Vulkanaschewolke über Europa im April 2010 ausgelöst wurden.

Die verantwortlichen Entscheidungsträger schwanken bei der Festlegung der Restriktionen zwischen Wirkungslosigkeit und Übertreibung. Die Maßnahme ist im Idealfall so ausgelegt, dass sie so wirksam wie nötig aber so wenig einschränkend wie möglich ist.

5.3.4. Verbesserung des Verkehrsflusses

Die Verstetigung des Verkehrsflusses hilft ebenso bei der Minderung der Emissionen, da Fahrsituationen wie Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge reduziert werden. Den geringsten Schadstoffausstoß weisen Motoren im stationären Betrieb ohne Lastwechsel auf, so dass es Ziel der Verkehrsplanung sein muss diesen Zustand so lange wie möglich aufrecht zu erhalten.

Im Jahr 2005 ermittelte der ADAC in einem Praxistest mit Fahrzeugen der Mittelklasse (Euro 3 und Euro 4) die in Abbildung 5.9. gezeigten Ergebnisse. Abhängig von der Abgasklasse lassen sich durch den „Grüne Welle Effekt“ Reduktionen für Stickoxide zwischen 40% und 60% erzielen [1].

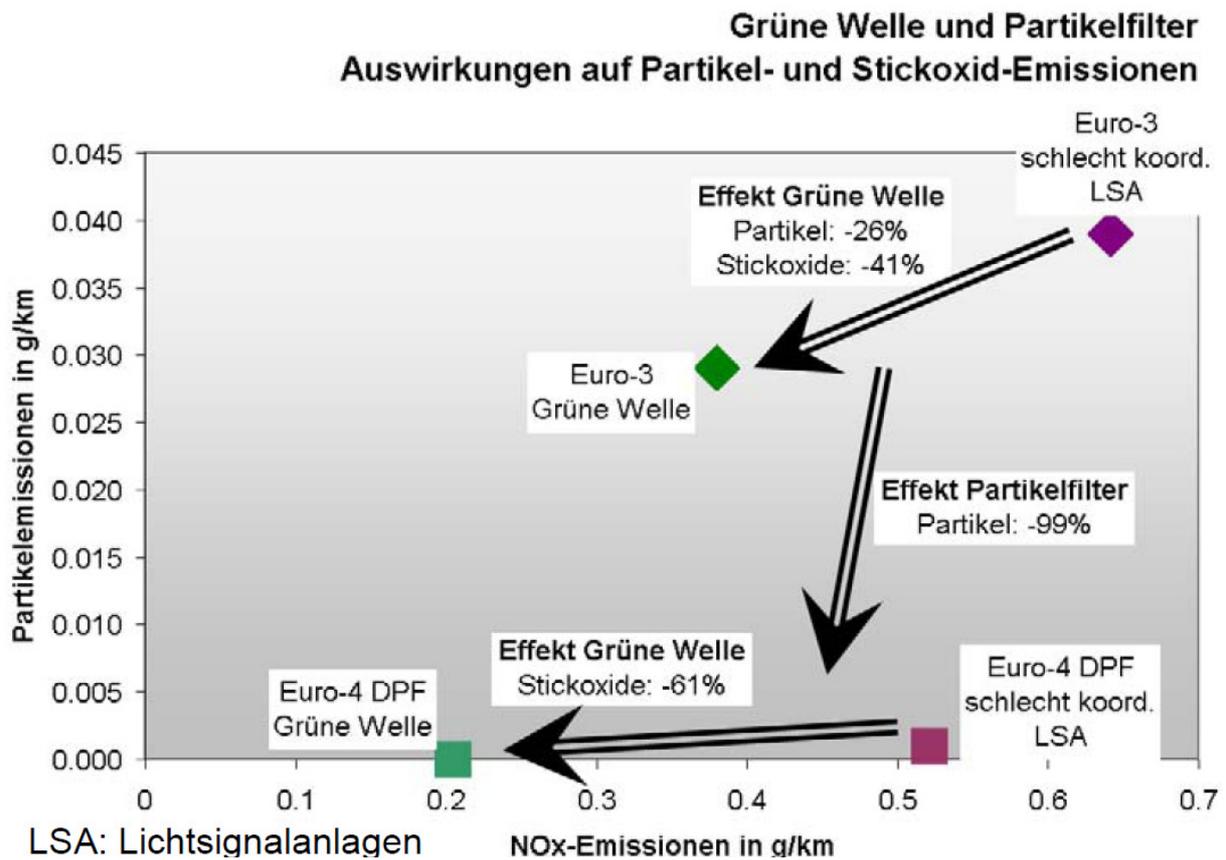


Abbildung 5.9.: Auswirkungen der Verkehrsverflüssigung, Stand: 2005 [1]

Aus diesem Grund gibt es erste Überlegungen einer immissionsabhängigen Verkehrssteuerung, die aber vor allem aus Quantifizierungsgründen schwierig ist. Soll der Verkehrsfluss in einem größeren Gebiet bezüglich des Schadstoffausstoßes optimiert werden, so sind dabei viele Nebenbedingungen zu berücksichtigen. Dazu zählt unter anderem die Bedeutung der örtlichen Belastungen, denn es ist nicht zielführend die Gesamtemission zu senken und dabei die Spitzenkonzentrationen auf beispielsweise Wohngebiete zu verlagern.

Die größten Probleme liegen im Ausbau und der Beschleunigung des ÖPNV, die sich konträr zum Verkehrsfluss verhalten. Wird die Priorität der Verkehrssteuerung auf die öffentlichen Verkehrsmittel gelegt, so schränken sie den Fluss des Individualverkehrs ein. Die Unterbrechungen führen beispielsweise zu längeren und häufigeren Standzeiten an Ampeln oder Bahnübergängen, die dann höhere Emissionen bewirken. Es muss deshalb genau beachtet werden welche Maßnahmen den Gesamtnutzen maximieren [2, 50].

5.3.5. Nachrüstung / Neuanschaffung

Alle öffentlichen Stellen sind dazu verpflichtet ihren Fahrzeugbestand zu überprüfen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um ihren Emissionsausstoß ökonomisch vertretbar zu minimieren. Abhängig von der Wirtschaftlichkeit reicht dies von der Nachrüstung mit Abgasnachbehandlungssystemen bis zur kompletten Neuanschaffung von Fahrzeugen. Die Anordnung ist Teil aller Luftreinhalte- und Aktionspläne Baden-Württembergs, wird aber aus verschiedenen Gründen nur kleine Beiträge zur Erreichung der Grenzwerte leisten können. Zum einen ist die Größe der Fahrzeugflotte im Verhältnis zum Individualverkehr gering und zum anderen ist der finanzielle Aufwand dieser Maßnahme für viele Städte und Kommunen nicht zu bewältigen [2, 47, 50].

5.3.6. Einführung Euro 6/VI

In diesem Abschnitt soll ein Szenario dargestellt werden, bei dem sämtliche Fahrzeuge die aktuell strengsten Abgasstandards Euro 6/VI erfüllen und welche Auswirkungen dies auf die Schadstoffbelastung hätte.

Die Modellierung bezieht sich auf die Messstation Stuttgart - Am Neckartor, geht von einem gleichbleibenden Verkehrsaufkommen aus und berechnet die Entwicklung bis zum Jahr 2020. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass es zukünftig keine weitere Verschärfung der Abgasgrenzwerte mehr geben wird und somit irgendwann nur noch Fahrzeuge der Grenzwertstufen Euro 6 bzw. Euro VI im Straßenverkehr fahren [29].

Die Ergebnisse dieses Szenarios sind in Abbildung 5.9. dargestellt.

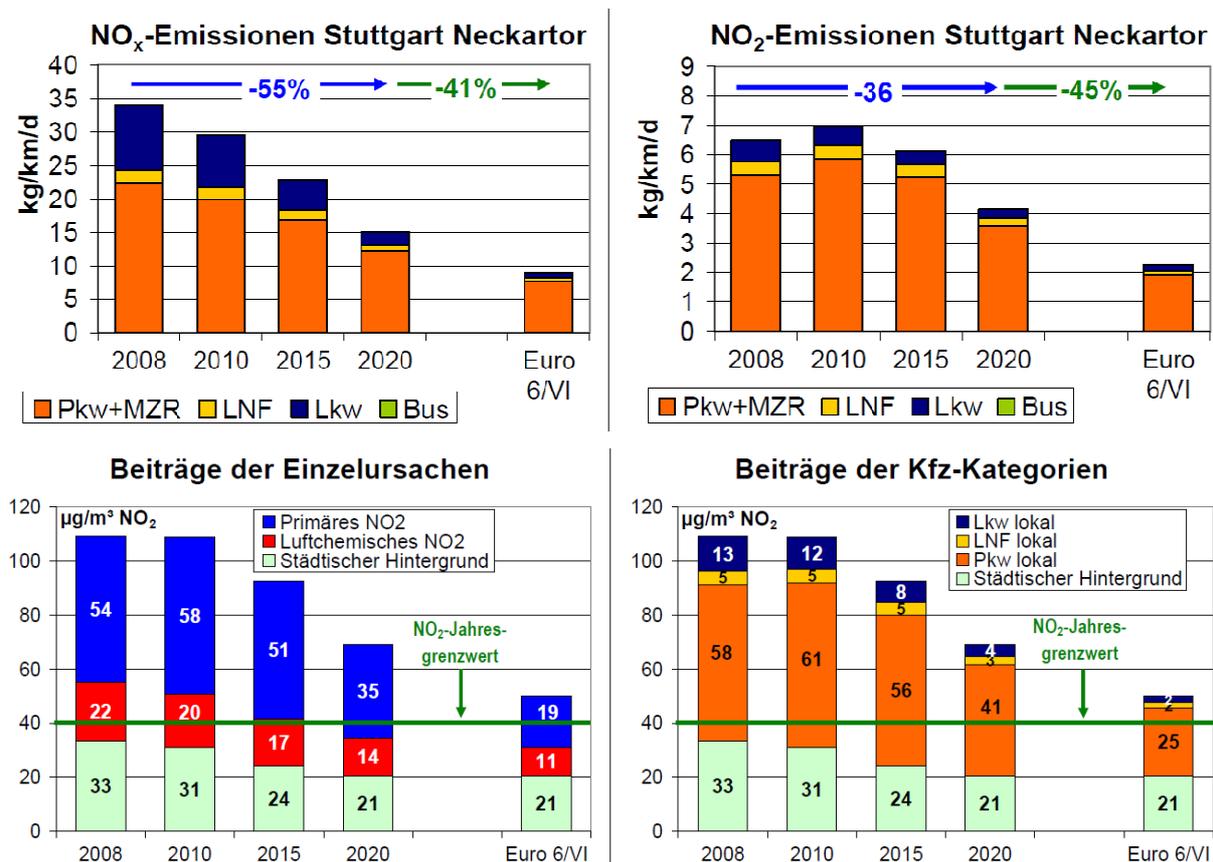


Abbildung 5.9.: NO_x- und NO₂-Emissionen an der Messstation Stuttgart-Neckartor in den Jahren 2008 bis 2020 und unter Annahme einer reinen Euro 6/VI-Flotte [29]

Im Falle einer reinen Euro-6/VI-Flotte würden die NO_x-Emissionen um 41% zurückgehen. Der NO₂-Jahresmittelwert würde mit 45% ebenfalls stark fallen, aber nicht den vorgegebenen Grenzwert von 40 µg/m³ erreichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass selbst in ambitionierten Szenarien die angestrebten Ziele verfehlt werden und weiterhin großer Handlungsbedarf besteht.

Die schnellstmögliche Einführung der Euro 6/VI und deren Weiterentwicklung sowie flächendeckende Umweltzonen, die zur Erneuerung der Fahrzeugflotte zwingen, erscheinen die erfolgversprechendsten Lösungsansätze zur Erreichung der Grenzwerte [29].

Kapitel 6

Einsatz des SCR-Verfahrens am Beispiel der AdBlue Technologie

6.1. Stand der Technik

Neben den bisher beschriebenen verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen wird in diesem Kapitel eine der technischen Lösungen, das SCR-Verfahren mittels Harnstoff, zur Reduktion von Stickoxiden vorgestellt.

Bei der SCR-Katalyse dient Ammoniak (NH_3) als Reduktionsmittel, welches bedingt durch seine Aggressivität und Giftigkeit nicht als solches, sondern in Form einer harmlosen Substanz verwendet wird, die das NH_3 erst im Abgasstrom freisetzt. Die europäische Automobilindustrie verwendet einheitlich eine 32,5%ige, wässrige Lösung von Harnstoff als Reduktionsmittel, welche unter dem Namen „AdBlue“ bekannt ist. Der Einsatz der SCR-Technologie bringt den Vorteil, dass durch optimale Motoreinstellung der Kraftstoffverbrauch und mit ihm alle Schadstoffe außer den Stickoxiden minimiert werden [15].

In Abbildung 6.1. ist schematisch ein kombiniertes System zur Abgasnachbehandlung mittels SCR-Technologie dargestellt. Zunächst durchströmt das motorische Rohabgas einen Oxidationskatalysator, in dem unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid und Partikel möglichst vollständig und NO teilweise zu NO_2 oxidiert werden. Das optimale Mischungsverhältnis von NO zu NO_2 liegt für die folgende Katalyse bei 1:1 (siehe Kapitel 2.5.1. Die Chemie der SCR-Reaktion - Gl. 2.15.). Im nächsten Schritt dosiert eine Pumpe aus einem separaten Tank AdBlue in den heißen Abgasstrom, wo es zu NH_3 und CO_2 hydrolysiert. In der eigentlichen selektiven Reduktion reagiert dann das NH_3 mit dem NO/ NO_2 -Gemisch zu Stickstoff und Wasser, also zu normalen Bestandteilen unserer Atemluft. Im letzten Schritt müssen unverbrauchte NH_3 -Anteile in einem Sperrkatalysator nahezu vollständig umgesetzt werden. Aufgrund des Gefährdungspotentials von Ammoniak, das deutlich über dem der Stickoxide liegt, muss jeglicher NH_3 -Schlupf verhindert

werden, auch wenn zuvor entstandener Luftstickstoff deshalb wieder rückreagiert [15].

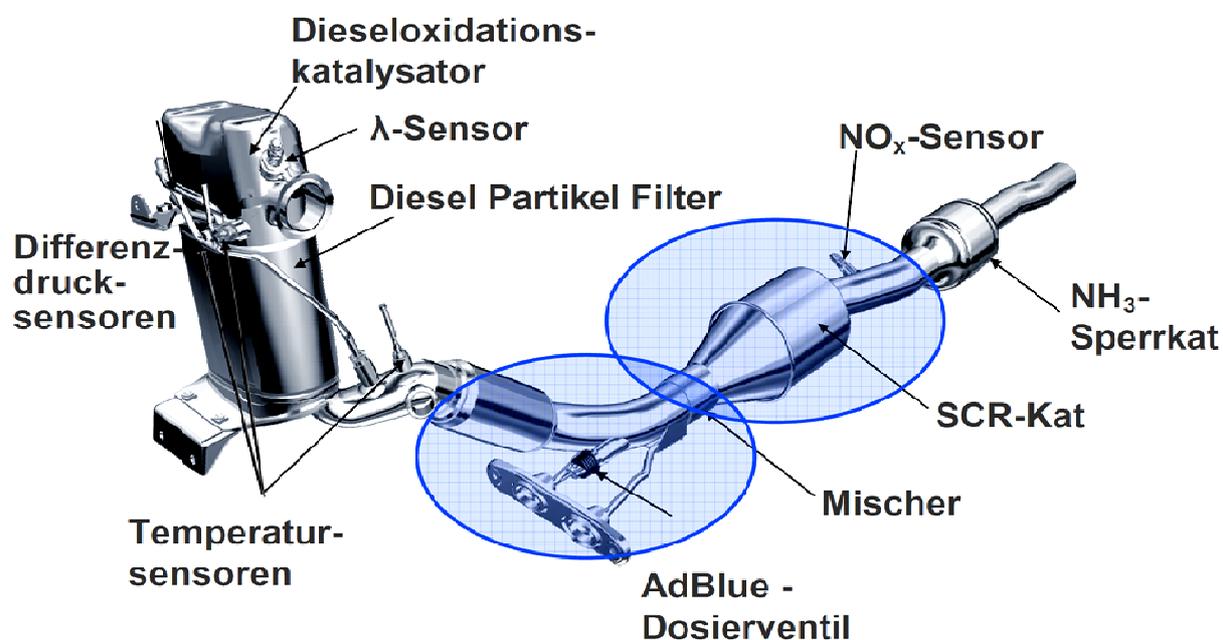


Abbildung 6.1.: Darstellung eines kombinierten Systems zur Abgasbehandlung auf Basis der SCR-Methode [63]

Die Auswahl dieser Technologie gründet auf einer Reihe von Vorteilen, die momentan von keiner anderen bekannten Methode übertroffen werden.

Der größte Nutzen wird aus einer optimierten Motoreinstellung gezogen, die eine ganze Reihe von positiven Effekten nach sich zieht. Die magere Betriebsweise, d.h. bei der motorischen Verbrennung herrscht Luftüberschuss $\lambda > 1$ (siehe Abbildung 2.5.), führt zu einem geringeren Kraftstoffverbrauch aber gleichzeitig zu deutlich gesteigerten NO_x-Emissionen. Im sauerstoffreichen Abgas oxidieren bevorzugt CO und HC wohingegen eine Reduktion der Stickoxide praktisch nicht mehr stattfindet [27]. Durch das Gesamtkonzept (Motorsteuerung incl. Abgasnachbehandlung) sinkt sowohl der Kraftstoffverbrauch um ca. 5% als auch der Anteil aller Schadstoffe. Zur Erreichung der strengen Abgasnormen Euro 5 und 6 werden zunächst CO und HC durch die Verbrennungscharakteristik des Motors optimal eingestellt und anschließend die Stickoxide katalytisch durch das SCR-Verfahren gemindert. Desweiteren ist die SCR/Harnstofftechnologie mit jedem Motor kompatibel und unabhängig von der Qualität des Kraftstoffes.

Das Verfahren bietet eine kostengünstige Lösung hinsichtlich Umweltschutz und Leistungsfähigkeit, da es für den vollständigen Lebenszyklus eines Fahrzeugs konzipiert ist und nahezu wartungsfrei arbeitet [15].

6.2. Harnstoff

Aufgrund der Bedeutung des Harnstoffes für die SCR-Technik werden an dieser Stelle die wichtigsten Eigenschaften der Substanz vorgestellt.

Harnstoff ist eine farb- und geruchslose, kristalline Substanz, die in großen Mengen synthetisch aus Ammoniak und Kohlendioxid gewonnen wird (siehe Abbildung 6.2.) [58].

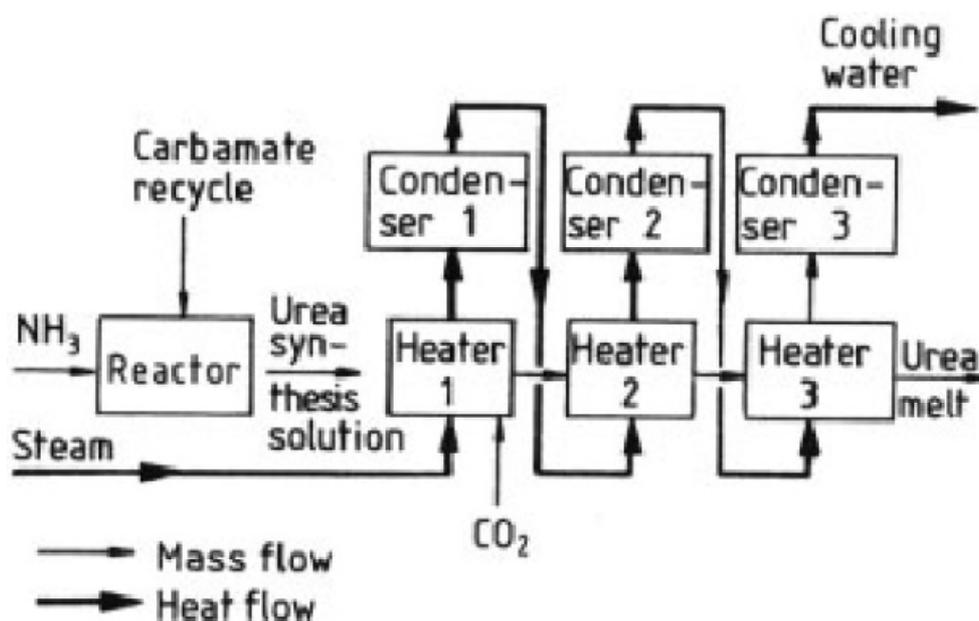


Abbildung 6.2.: Blockfließbild einer Harnstoff-Anlage nach dem Self-Stripping Verfahren [58]

Harnstoff sowie seine wässrigen Lösungen (z.B. AdBlue) sind keine Gefahrstoffe im Sinne der Gefahrstoff-Verordnung, da sie von geringer akuter Toxizität sind. Bei Haut- und Augenkontakt wirken sie weder reizend, sensibilisierend, krebserregend noch mutagen. Da Harnstoff schwach wassergefährdend und biologisch leicht abbaubar ist, besteht keinerlei Kennzeichnungspflicht nach dem Chemikaliengesetz. Er unterliegt nicht der Störfallverordnung und stellt nur ein geringes Gefährdungspotenzial für Mensch und Umwelt dar [15].

6.3. AdBlue

Nach EU-Chemikalien-Richtlinie 67/548/EU ist AdBlue eine 32,5%ige Lösung von technisch reinem Harnstoff in demineralisiertem Wasser, die in jeder Hinsicht ungefährlich ist. Das Mischungsverhältnis wurde aus chemischen Gründen gewählt, da hier der Kristallisationspunkt mit minus 11 °C sein Minimum erreicht. Die Reinheit der Lösung muss ebenso gewährleistet sein, um Schäden am Katalysator zu vermeiden. Die europäischen Harnstoffhersteller haben eine „Richtlinie zur Qualitätssicherung“ erstellt, in der die empfohlenen Bedingungen für Umschlag, Transport und Lagerung der wässrigen Harnstofflösung beschrieben werden, um die AdBlue-Qualität von der Produktion bis zum Vertrieb an den Endverbraucher sicherzustellen [10].

Abbildung 6.3. zeigt den Verlauf des AdBlue-Bedarfs der nach Schätzungen im Jahr 2010 bei 2,5 Mio. t liegen wird. Nach Herstellerangaben sind die Produktionskapazitäten mehr als ausreichend um auf jegliche Nachfrageänderung zu reagieren [15].

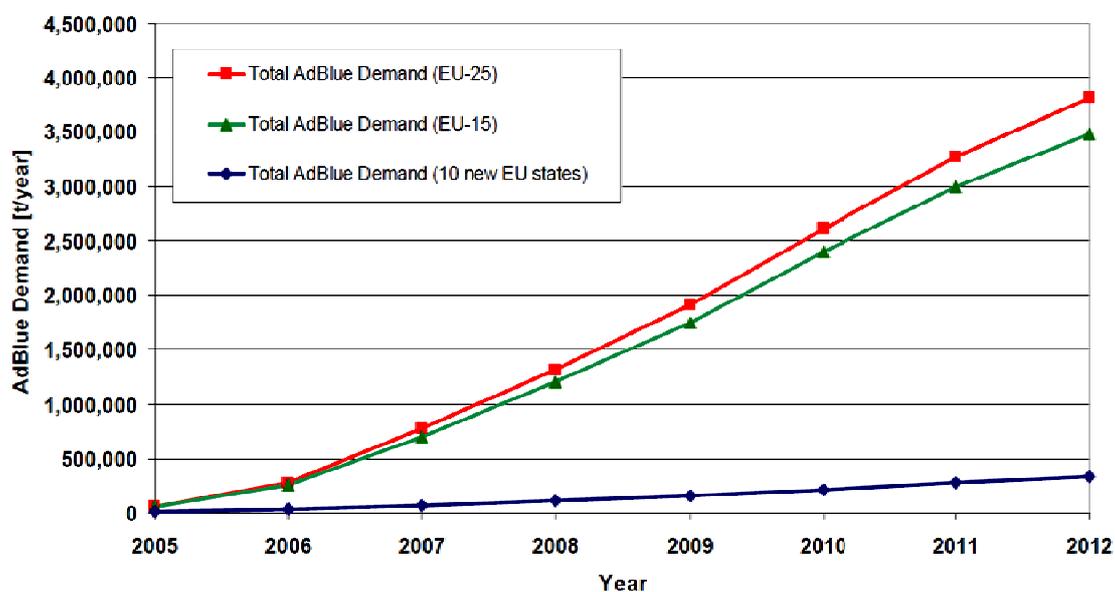


Abbildung 6.3.: AdBlue Bedarf in der Europäischen Union [15]

6.4. Minderungspotenzial

Das Minderungspotential der AdBlue Technologie ist im realen Betrieb von vielen verschiedenen Bedingungen abhängig. Im Folgenden werden für einzelne Fahrzeugkategorien die Versuchsbedingungen, Ergebnisse und Probleme der NO_x-Reduktion präsentiert, die den aktuellen Stand der Entwicklungen widerspiegeln.

6.4.1. Diesel-Pkw

Dem Diesel-Pkw kommt als größter Verursachergruppe der NO₂-Emissionen besondere Bedeutung zu. Das Unternehmen Bosch konnte in Testläufen folgende Ergebnisse erarbeiten [4].

Versuchsbeschreibung: Es werden Stickoxidmessungen an Standard Diesel-Pkw mit verschiedenen Abgassystemen in vorgegebenen Fahr-situationen durchgeführt.

Fahrzeugtyp: Kompaktklasse, 1400 kg, 100 kW, ca. 80 000 km

Fahrzyklus: Neuer europäischer Fahrzyklus (NEFZ)

Abgasklassen:

Nr.	Stufe	ANB	Technologie
1 = Serienmodell Bj. 2005	EU 4 Serie	DOC DPF	Pt Pt
2 = Serienmodell Bj. 2005 / ANB modifiziert	EU 4 Serie	DOC DPF	Pt / Pd Pt / Pd
3 = Demo - Fzg.	EU 5 (2010)	DOC DPF	Pt / Pd Pt / Pd
4 = Demo - Fzg. mit NO _x -ANB	EU 6 (2014)	DOC DPF SCR oder NSC DPF	Pt / Pd Pt / Pd - Pt / Pd / Rh Pt / Pd

Tabelle 6.1.: Spezifikation der Diesel-Pkw für die Testreihe von Bosch [4]

Legende:

Pt: Platin-Beschichtung	DOC: Diesel-Oxidations-Katalysator
Pd: Palladium Beschichtung	DPF: Diesel-Partikelfilter
Rh: Rhodium-Beschichtung	SCR: Selektive katalytische NO _x Reduktion
ANB: Abgasnachbehandlung	NSC: NO _x -Speicher-Katalysator

Versuchsergebnisse:

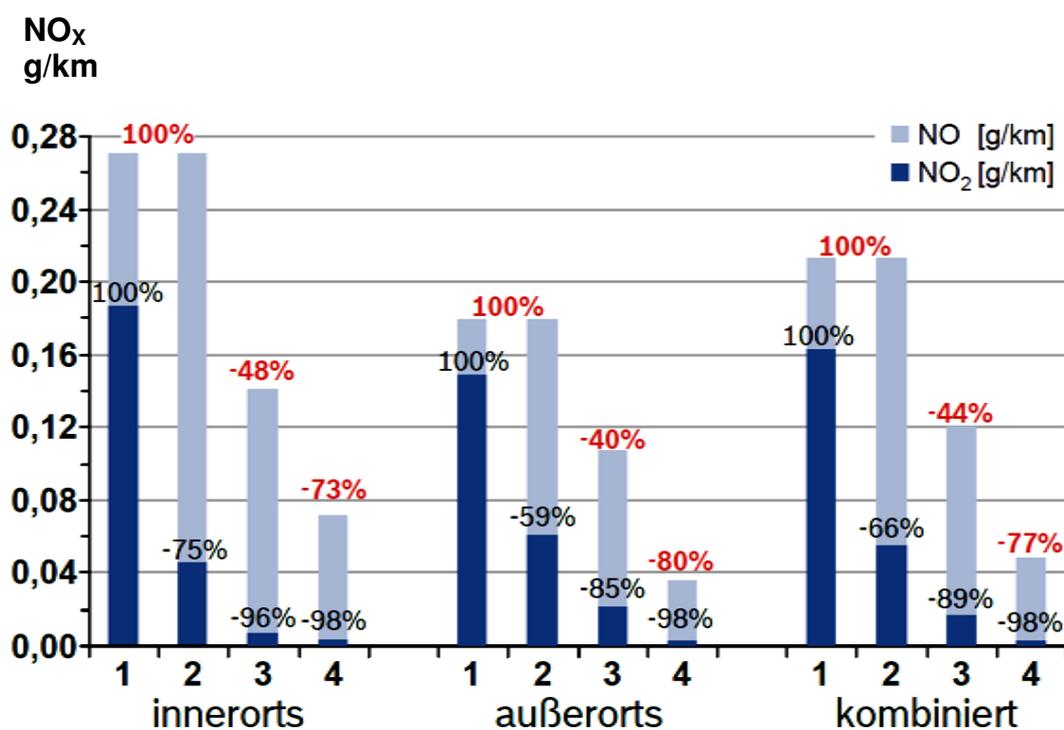


Abbildung 6.4.: Stickoxidmessungen für verschiedene Diesel-Pkw-Modelle (Nr. 1. - 4.) in verschiedenen Fahrsituationen [4]

Der Vorteil von Fahrzeugen der Euro 6 Abgasnorm mit NO_x-Abgasnachbehandlung (Nr. 4) gegenüber den heutigen Serienmodellen (Nr.1) liegt in einer 77%igen NO- und einer 98%igen NO₂-Reduktion. Als nachteilig erweist sich die Sicherstellung des flüssigen Zustandes von AdBlue. Um die Kristallisation des Harnstoffes und damit ein Verstopfen zu vermeiden, müssen Heizsysteme an Tank und den Leitungen installiert werden.

6.4.2. Leichte Nutzfahrzeuge (INfz)

Im Bereich der leichten Nutzfahrzeuge wurden Versuche von der Firma Emitec durchgeführt. Die Daten beziehen sich auf einen Mercedes Sprinter der Euro IV Klasse (siehe Abbildung 6.5.).



Abbildung 6.5.: Mercedes Sprinter Pritschenwagen (INfz) [16]

Die serienmäßige Abgasanlage des INFz wurde durch eine SCR-Abgasnachbehandlungsanlage mit integrierter Heizung erweitert (siehe Abbildung 6.6.).

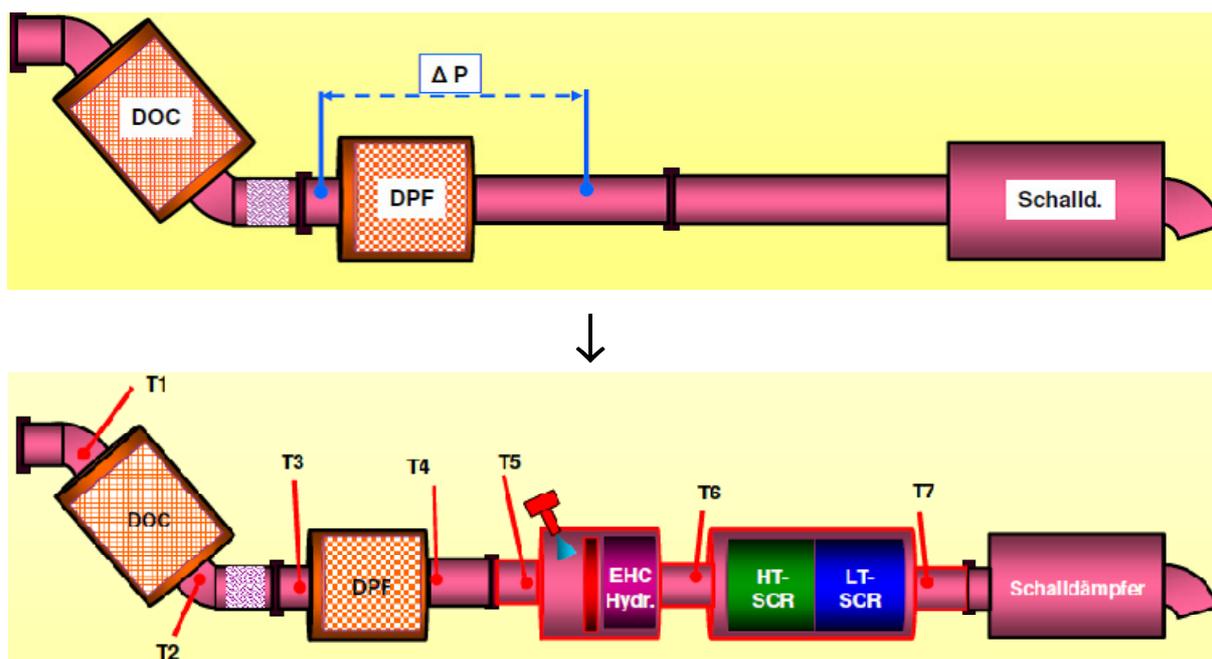


Abbildung 6.6.: Umbau der Abgasanlage des Mercedes Sprinter [16]

Im Unterschied zum Pkw, bei dem nur der flüssige Aggregatzustand der AdBlue-Lösung garantiert sein muss, sinkt bei INfz, durch den Abstand des SCR-Systems zum Motor, die Abgastemperatur. Das hat zur Folge, dass ein kritischer Temperaturwert von 160°C unterschritten wird, bei dem Bestandteile aus dem Abgas auskristallisieren und durch Belagbildung das Abgasrohr und im Besonderen die Kanäle des Katalysators verstopfen. Zum Schutz wird dann die AdBlue-Dosierung gestoppt, wodurch auch die SCR-Katalyse unterbrochen wird. Um die Reduktion der Stickoxide dauerhaft zu gewährleisten, wird ein beheizter Katalysator der EHC (= Electrically Heated Catalyst) verwendet [16].

Im Neuen europäischen Fahrzyklus - Test (NEFZ) wurde zum Vergleich beim unbeheizten System eine NO_x-Reduktion von 32% erreicht, wohingegen das beheizte System eine Minderung von 70% aufweist. Der gravierende Unterschied ist allein darauf zurückzuführen, dass im unbeheizten System ca. 75% der Testzeit aufgrund zu geringer Abgastemperaturen kein AdBlue zudosiert werden konnte.

Im Abschließenden Artemis URBAN Testlauf, der nach Herstellerangaben den realen Fahrbetrieb besser abbildet als der NEFZ, erzielte das beheizte System im Vergleich zur Serienausstattung eine Reduktion von 87% (siehe Abbildung 6.7.). Er zeichnet sich vor allem durch schnellere Beschleunigungsvorgänge und höhere Geschwindigkeiten aus, durch die eine höhere Abgastemperatur und damit eine größere Stickoxidminderung erreicht werden.

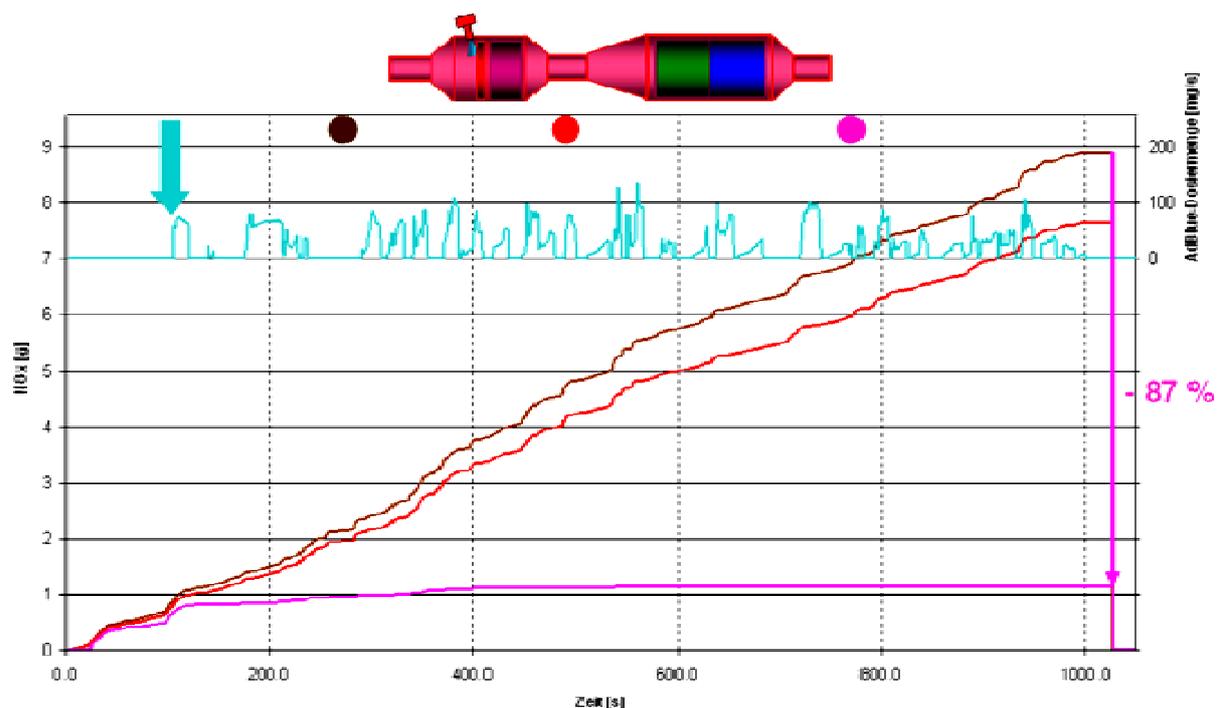


Abbildung 6.7.: NO_x-Emissionsmessung mit beheizter SCR-Anlage im Artemis URBAN Fahrzyklus [16]

6.4.3. Schwere Nutzfahrzeuge (sNfz)

Messungen der Technischen Universität Graz ergaben, dass bei schweren und leichten Nutzfahrzeugen die gleiche Problematik zugrunde liegt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.8. dargestellt [53].

Versuchsbeschreibung: Es werden Stickoxidmessungen an Standard Lkw mit verschiedenen Abgassystemen in vorgegebenen Fahr-situationen durchgeführt.

Fahrzeugtyp: Sattelzug, 40 t, 50% beladen

Fahrzyklus: Common ARTEMIS Driving Cycle (CADC)

Versuchsergebnisse:

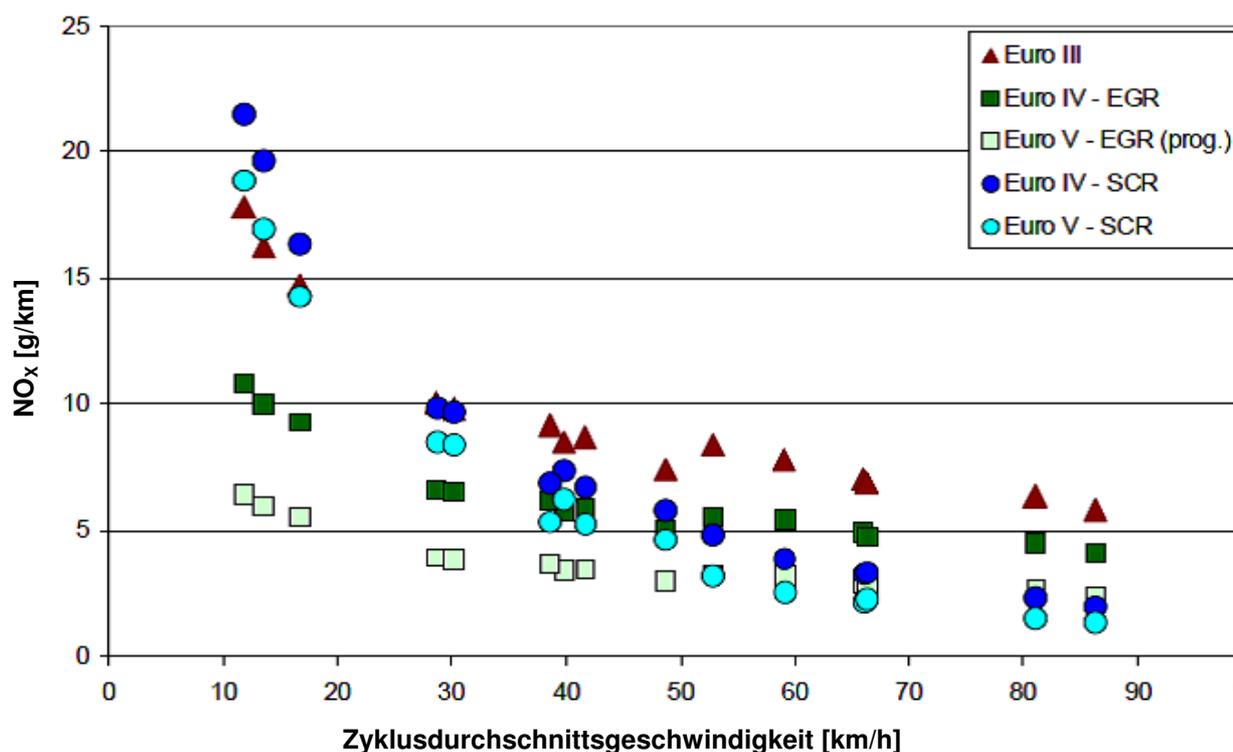


Abbildung 6.8.: NO_x-Messungen bei sNfz verschiedener Abgasklasse nach dem CADC [53]

Die Messungen zeigen eine deutliche Temperaturabhängigkeit der SCR-Katalyse. Bei niedrigen Geschwindigkeiten wird im CADC nur eine geringe Motorlast abgerufen und dadurch steigt auch die Abgastemperatur nur geringfügig. An den Messungen der Euro IV und V ist zu sehen, dass erst ab einer Geschwindigkeit von 20 - 30 km/h

die Temperatur ausreicht, um die Emission unter die der Euro III zu drücken. Im niedrigen Temperaturbereich arbeitet die SCR-Katalyse schlecht bis gar nicht, spielt aber mit steigender Temperatur eine tragende Rolle.

Nach Herstellerangaben von MAN sollen durch kombinierte Abgassysteme Minderungsraten für Stickoxide von 90% erreicht werden. Abbildung 6.9. zeigt den angestrebten technischen Weg von MAN zur Erreichung der Euro VI Norm bei möglichst geringem Anstieg des Kraftstoffverbrauches, der durch die CO₂-Emissionen abgebildet wird. Hierbei wird ein Motor der höchsten Entwicklungsstufe mit Euro V durch höheren Einspritzdruck (EP) modifiziert und mit einem SCR-System sowie Dieselpartikelfiltern (DPF) ausgerüstet [41].

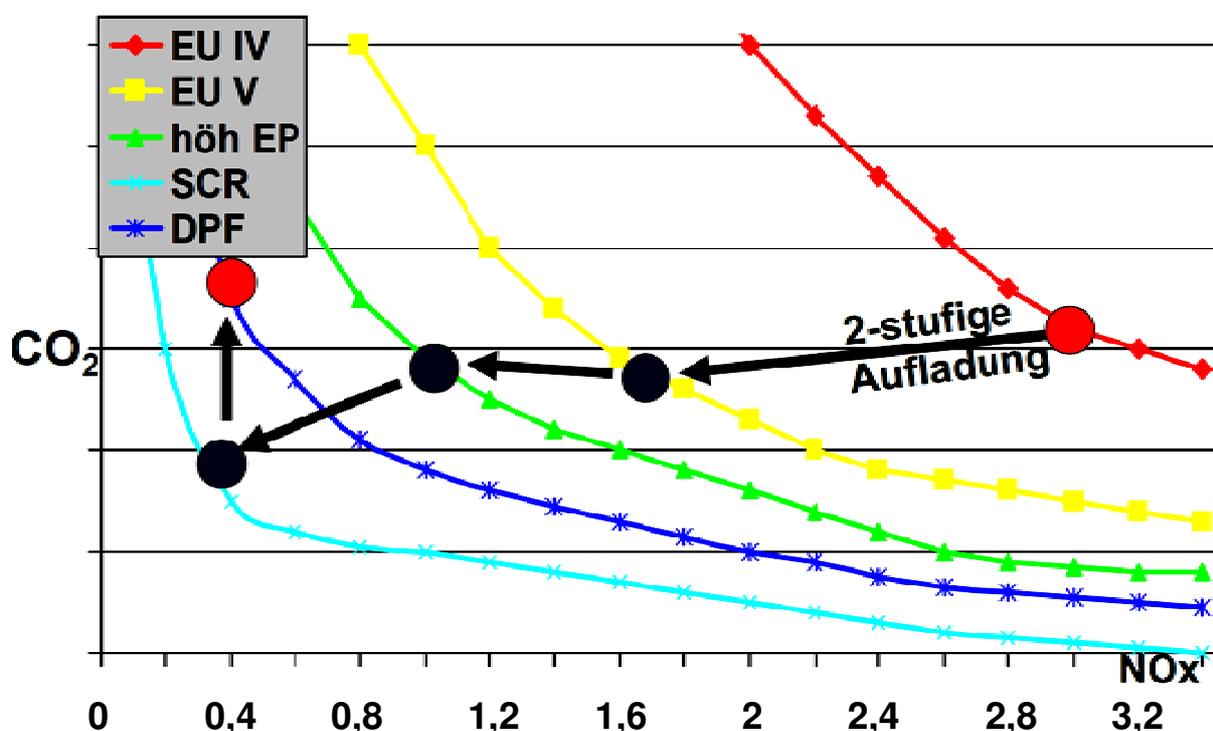


Abbildung 6.9.: Abhängigkeit von NO_x [g/kWh] zu CO₂ [41]

6.4.4. Busse

Der TÜV Nord rüstete für seine Testmessungen einen Gelenkbus der Abgasnorm Euro III mit einem SCRT-System der Firma HJS nach. Dabei handelt es sich um eine Kombination aus Rußpartikelfilter (CRT-System) und dem gängigen SCR-System auf Harnstoffbasis (siehe Abbildung 6.10.) [56].

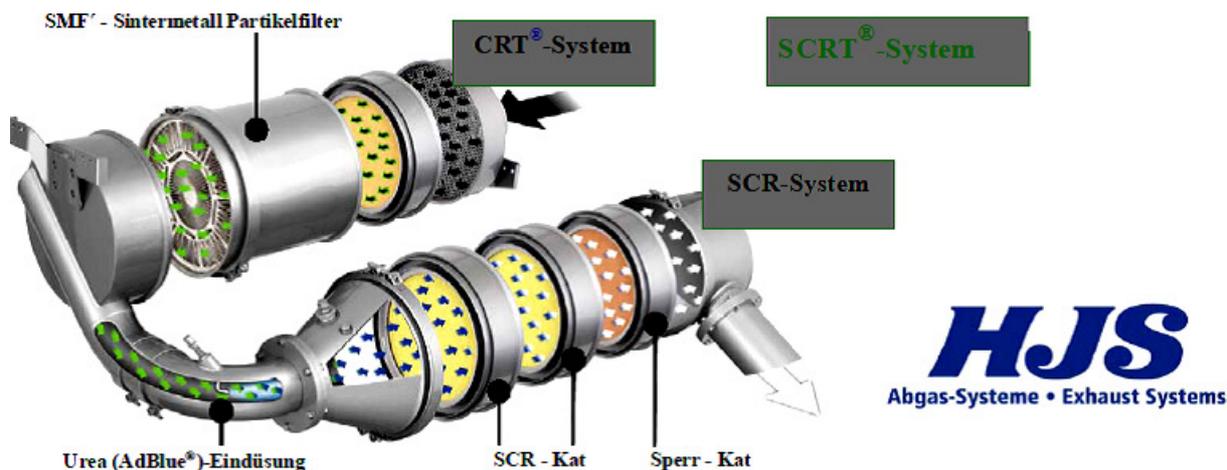


Abbildung 6.10.: Schema des SCRT-Systems von HJS [56]

Die Wirksamkeit wurde zuerst am Motorenprüfstand und danach auf ausgewählten Teststrecken in Düsseldorf, Hagen und Stuttgart überprüft. Dem Mercedes CapaCity Gelenkbus mit 220 kW Leistung fehlte in dieser Modellreihe der Oxidationskatalysator, weshalb das SCRT-Abgasnachbehandlungskonzept gewählt wurde, welches diesen bereits integriert hat.

In Abbildungen 6.11. sind die Ergebnisse des Motorprüfstandes für den stationären europäischen Fahrzyklus (ESC = European Stationary Cycle) dargestellt. Der Unterschied zwischen der grünen und der gelben Säule besteht darin, dass der Motor im gelben Fall stärker belastet wurde, was durch den höheren CO₂-Ausstoß belegt wird. Die höhere Lastabfrage bewirkte einen Anstieg der Abgastemperatur und damit eine bessere NO_x-Reduktion. Es konnten Reduktionsraten von 37% bis 67% realisiert werden [56].

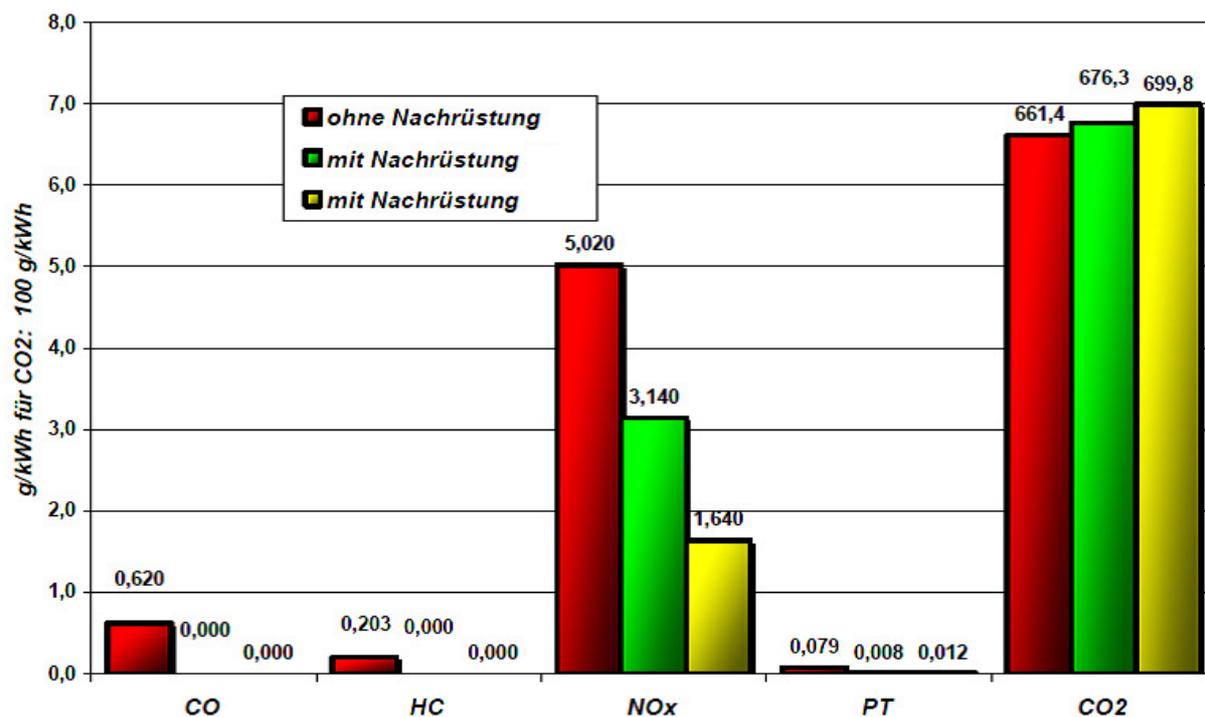


Abbildung 6.11.: Ergebnisse ESC-Messung für verschieden Lastzustände (Gelenkbusmotor) [56]

Abbildung 6.12. zeigt zum Vergleich dieselben Messungen für den instationären europäischen Fahrzyklus (ETC = European Transient Cycle). Die Reduktionsraten liegen mit 40% bis 68% auf demselben Niveau.

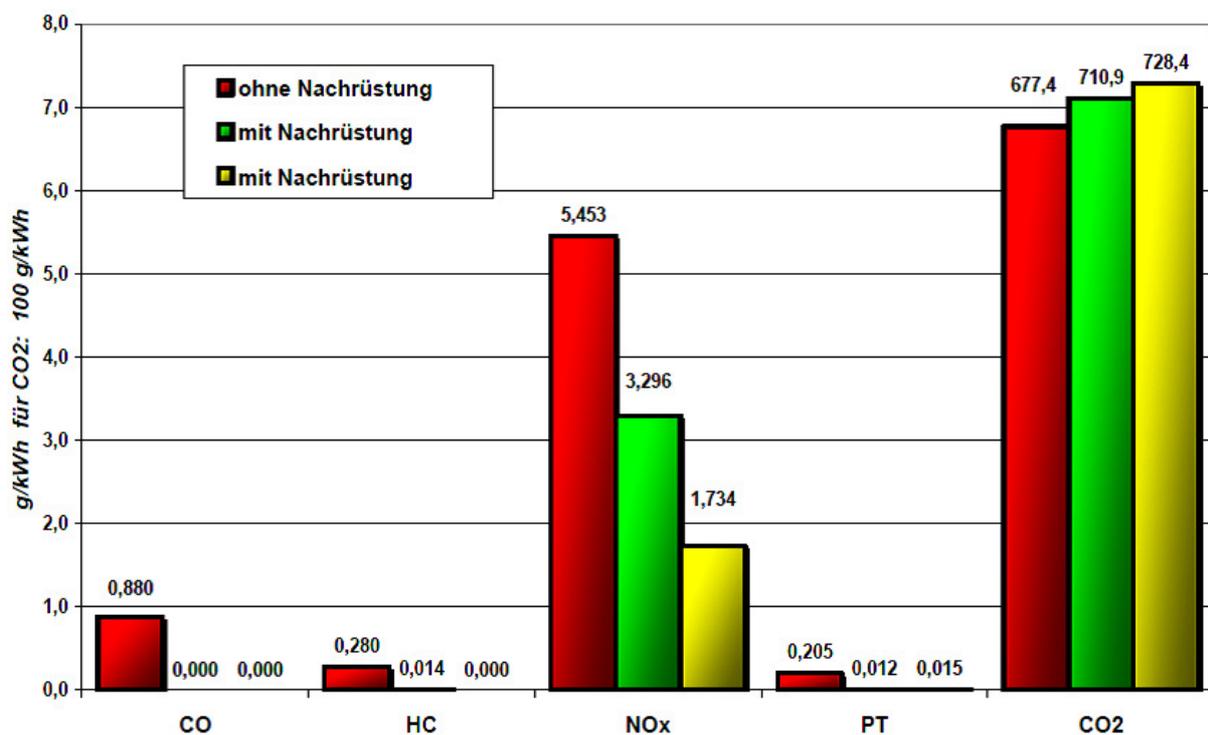


Abbildung 6.12.: Ergebnisse ETC-Messung für verschieden Lastzustände (Gelenkbusmotor) [56]

Im Vergleich zu den am Teststand unter definierten Bedingungen durchgeführten Messungen zeigt sich im Realbetrieb auf den ausgewählten Teststrecken ein differenziertes Bild. In Anlehnung an die INfz zeigten die Ergebnisse eine gravierende Temperaturabhängigkeit. Die NO_x-Reduktionsraten schwankten abhängig vom Profil der Fahrstrecke, von der Uhrzeit der Fahrt (Berufsverkehr oder freie Fahrt) und dem Wetter. Senken die Einsatzparameter die Abgastemperatur unter den kritischen Temperaturwert von 160°C, so schaltet sich die Harnstoffdosierung ab und das SCR-System arbeitet nicht mehr. Im Einzelfall sind große Schwankungsbreiten gerade bei Beschleunigungsvorgängen von bis zu 90% in der NO_x-Reduktion beobachtet worden [56].

Um die Funktionalität des Systems zu gewährleisten sind verschiedene Möglichkeiten denkbar. Im konkreten Einzelfall ist es notwendig auf den Strecken ein Temperaturprofil zu erstellen, das Auskunft über das Reduktionspotential gibt. Anhand dieser Informationen kann dann über die Nachrüstung mit aktuell verfügbarer Technik entschieden werden.

Die andere Möglichkeit besteht in der Temperaturregelung durch eine Heizung. Dies ist aber an erhebliche technische Probleme geknüpft, da hier, anders als bei leichten Nutzfahrzeugen, keine elektrisch beheizten Katalysatoren mehr zum Einsatz kommen können. Die geforderte elektrische Leistung ist so hoch, dass die Einbußen an Motorleistung den Effekt der NO_x-Reduktion erheblich minderten und außerdem einen deutlich gestiegenen Kraftstoffverbrauch und damit CO₂-Ausstoß bewirkten. Diskutiert wurde auf der Fachtagung am 3. und 4. März 2010 in Heidelberg: „Herausforderung NO₂-Immissionen - Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen“, die Idee des Einsatzes kleiner Brenner zur Heizung des Katalysators, allerdings ist eine derartige Technik momentan weder verfügbar noch absehbar Serienreif [1, 4, 16, 29, 41, 53, 56].

6.5. Kosten

Die Kosten für das SCR-System als Teil der Abgasnachbehandlung müssen wie die meisten Umwelttechnologien differenziert betrachtet werden.

Der finanzielle Wert sauberer Luft ist nicht quantifizierbar, weshalb andere Kriterien, wie die Erhaltung menschlicher Gesundheit und lebenswerter Umweltumgebung herangezogen werden. Aus diesen Motiven heraus wurden immer strengere Abgasgrenzwerte entwickelt, die durch aufwändigere Technik erreicht werden aber auch deutlich höhere Kosten bedingen. Abbildung 6.13. zeigt den Anstieg der Kosten für die Abgasnachbehandlung an den Gesamtkosten für Diesel-Pkw. Für ein Neufahrzeug der Euro 6 mit AdBlue Technologie entfällt bereits ca. 1/3 der Gesamtkosten auf die Abgasnachbehandlung. Der Preis für die AdBlue Technologie liegt, abhängig vom Fahrzeugsegment, zwischen 3000 € und 10000 € [4, 16, 41, 63].

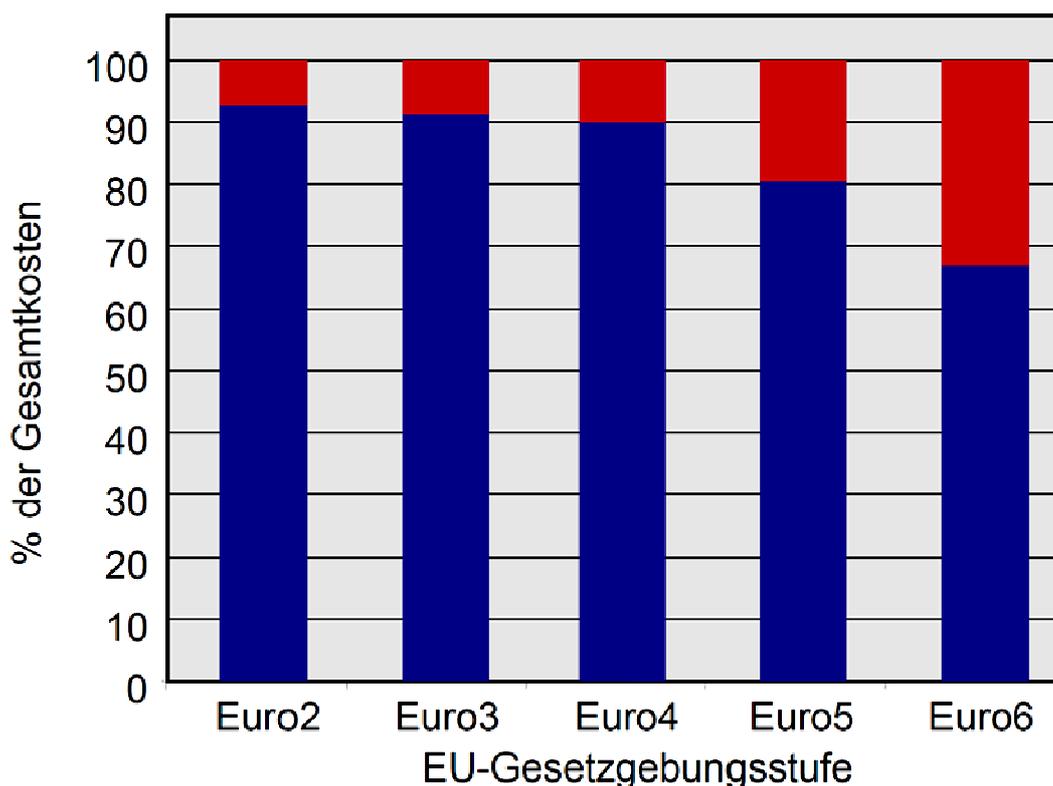


Abbildung 6.13.: Kostenanteil für die Abgasnachbehandlung bei Dieselmotoren [63]

Im Bereich der Diesel-Pkw und leichten Nutzfahrzeuge muss bei der Wirtschaftlichkeit zwischen Neufahrzeug und Nachrüstung unterschieden werden. Bei Neuwagen ist der Einbau der Technik unproblematisch und mit Mehrkosten von 3000 €

zwischen Euro 5 und Euro 6 incl. AdBlue vertretbar. Anders stellt sich die Situation bei älteren Fahrzeugen dar, da die Nachrüstung sehr aufwändig und im Verhältnis zum Wagenwert (durchschnittlicher Restwert von 10000 € angenommen) extrem teuer ist.

Bei schweren Nutzfahrzeugen und Bussen steigt mit dem Abgasvolumenstrom auch die notwendige Größe der Abgasnachbereitungsanlage und die Kosten für das AdBlue-System erhöhen sich auf bis zu 10000 €.

Die Rentabilität der Technik hängt sowohl bei der Nachrüstung als auch beim Neukauf von verschiedenen Aspekten ab. Von der technischen Seite wird durch den optimierten Verbrennungsprozess eine Kraftstoffreduktion um 5% erreicht, welche einen klaren Kostenvorteil darstellt. Der zusätzliche Verbrauch von AdBlue ist kostenseitig vernachlässigbar, da er mit ca. 0,5 - 1,5 l auf 100 km bei einem Preis von 0,35 - 0,7 € pro Liter nicht ins Gewicht fällt. Darüber hinaus profitieren die Fahrzeuge mit SCR-Technik durch staatliche Zuschüsse, geringere Kfz-Steuern und vor allem im Lkw-Bereich durch die sinkenden Autobahnmautgebühren [15, 17, 63].

Zusammenfassend bedeutet dies, dass sich die zusätzliche Investition bei Neufahrzeugen innerhalb einer vorhersehbaren Leistungsdauer amortisiert. Die Frage der Nachrüstung bei Gebrauchtfahrzeugen muss im Einzelfall entschieden werden, denn sie hängt stark von Wert und der veranschlagten Restleistung ab.

Kapitel 7

Umweltbilanz

7.1. Grundlagen der Umweltbilanz

Die Umsetzung der SCR-Abgasnachbehandlungstechnik ist nicht nur an finanzielle Aspekte gebunden, sondern wirkt sich auch in erheblichem Umfang auf die Umwelt aus. In diesem Kapitel wird der Umwelteinfluss des Verfahrens bilanziert und mit den CO₂-Emissionen quantifiziert, die sich am aktuellen Zielwert der Europäischen Union von 130g CO₂/km ab 2012 orientieren [19b].

In den vorliegenden aggregierten Datensätzen sind die Umweltbelastungen sowohl aus den jeweils zugehörigen Vorprozessen ab der Rohstoffgewinnung, als auch aus der Produktion der Betriebsmittel berücksichtigt. Sie beschreiben die durchschnittliche Ist-Situation von Neuanlagen der neunziger Jahre aus Sicht der Endverbraucher in Westeuropa. Die erhobenen Grunddaten sind im Lauf der Jahre sowohl angepasst als auch aktualisiert worden und stellen für das Jahr 2010 im Rahmen der Messgenauigkeit eine belastbare Größe dar [43a]. Die Datensätze sind mit Vorketten-Datensätzen verbunden, in denen alle Vorleistungen, inklusive Transport, bis zur Quelle dargestellt sind. Im Rahmen dieser Arbeit kann allerdings nur an geeigneter Stelle die Tiefe der Informationskette umrissen werden. Alle verwendeten Daten wurden mit dem GEMIS - Softwaretool des Öko-Institutes e.V., dem Institut für angewandte Ökologie, ermittelt und bearbeitet. Das 1987 entwickelte „Globale Emissions-Modell Integrierter Systeme“ (GEMIS) beruht, je nach Anwendung, auf unterschiedlichen Methoden und ist in hohem Maße zeit- und ortsabhängig [21, 22, 23, 24].

Bei den betrachteten Daten handelt es sich in der Regel um Multi-Output-Prozesse, für welche zur Modellierung in GEMIS die Methode der Systemerweiterung angewandt wurde. Bei diesem Vorgehen werden Datensätze, in denen alle Inputs, alle Outputs und alle Umweltaspekte eines Multi-Output Prozesses ausgewiesen sind, als „Brutto“ bezeichnet. Zur Berechnung der relevanten Nettoprozesse müssen

zunächst Bonus-Prozesse ermittelt und dann subtrahiert werden. Bonus-Prozesse gelten als substituierte Nebenprodukte und rein rechnerische Größen, die einen der Outputs auf herkömmliche Weise bereitstellen. Aufwendungen für Produktionsmittel werden üblicherweise als Stoffflüsse im Input interpretiert, wobei diese als absolute Werte gelten und nicht auf funktionelle Einheiten bezogen sind. Dagegen werden Umweltaspekte, die durch die Bereitstellung der Produktionsmittel verursacht werden, über die Kriterien Leistung, jährliche Auslastung und Lebensdauer explizit auf die funktionellen Einheiten bezogen [43a, 43b, 43c].

Multi-Output Prozesse werden häufig mit Allokationsverfahren erstellt, da die Zuteilung von Emissions- und Energiebeiträgen zu der „eigentlichen Quelle“ von großer Bedeutung ist. Die folgende Tabelle 7.1. zeigt, wie hierbei im Einzelnen verfahren wurde [20].

Kategorien	Koppelprodukte	Was	Kriterium
fossile Energie	Erdöl/ kommerzialisertes Erdgas	Emissionen Bohrlochtests	unterer Heizwert
	Erdöl/ kommerzialisertes Erdgas	Fackel und andere Verluste	unterer Heizwert
	Erdöl und Erdölprodukte/ restl. Güter	Flächen- und Energiebedarf Hafenanlagen	Gewicht
	Binnentankschiff/ Binnenfrachter	Bauaufwand Kanäle	Transportleistung
	Raffineriegas/ Propan/ Butan/ Naphta/ Benzin/ Kerosin/ Diesel/ Heizöl EL/ Heizöl Petro/ Heizöl S/ Bitumen	Gewicht	Material-, Bauauf-, Energieaufwand / Verbrauch Betriebsstoffe / Prozessemissionen Luft und Wasser / Abfälle / Flächenbedarf
	Heizkessel unterschiedlicher Leistung	Bauaufwand, Verpackung und Abfälle	k. A.
	Strom/ Wärme	Energie- und Stoffflüsse	alles um den Strom
	Erdgas/ Natural Gas Liquids	gesamte Aufwendungen und Emissionen der Gasaufbereitung	unterer Heizwert
	Strom/ Wärme	Energie- und Stoffflüsse von Wärmekraftwerken	Exergie
	Kohle/genutztes Grubengas	Energie- und Stoffflüsse im Bergbau	Kohleabbau; alles um die energ. Ressourcen; nach unterem Heizwert resp. Gewicht
Kohle/genutztes Grubengas	Entnahme von Grubengas		
Koks/ Kokerei/ Teer/ Benzol	Energie- und Stoffflüsse in der Kokerei	unterer Heizwert, Gewicht und Erlös	

	angereichertes Uran, Flusssäure Uran, Plutonium, konditionierte Abfälle Abfälle aus KKW, Medizin, Forschung	Energie- und Stoffflüsse der Anreicherung Energie- und Stoffflüsse der Wiederaufarbeitung Energie- und Stoffflüsse der Zwischenlagerung	alles um das angereicherte Uran alles um die Abfallkonditionierung nach Volumina
regenerative Energie	Wasserkraft	Energie- und Stoffflüsse	alles um die Wasserkraft
Rohstoffe	Rohstofffunktion Erholungsfunktion des Waldes	Energie- und Stoffflüsse Waldpflege	alles um die Rohstoffe
Betriebs- mittel	Strom / Wärme	Energie- und Stoffflüsse	Preise, Energie, Exergie
Verkehr	Transport	Straßen- und Schieneninfrastruktur	nach Bruttotonnenkilometern

Tabelle 7.1.: Allokationskriterien innerhalb der Hauptprozesse der Energiesysteme [43a]

Neben den zentralen Kategorien der Energiesysteme werden im Folgenden noch einige andere wichtige Kriterien des Gesamtprozesses berücksichtigt.

Der Transport findet erneut Einzug in die Betrachtungen, da die Bereitstellung von Produktionsmitteln bis hin zur Lieferung der Waren an den Endkunden für jedes Produkt unerlässlich ist. Es wurden typische Transportdistanzen verwendet (vgl. Tabelle 7.2.), die aus Gründen der Vergleichbarkeit für alle Energiesysteme gelten.

Material	Dichte [kg/m ³]	Verbrauch in Europa [km]	
		Bahn	LKW 40 t
Stahl/Guss	7900	200	100
Kies/Sand	2000		20
Zement	3150	100	50
Beton	2200		20
Flachglas	2500	600	100
Kupfer	8900	200	100
Aluminium	2700	200	100
Kunststoffe	900 -1400	200	100

Tabelle 7.2.: Dichten und Standard-Transportdistanzen (vom Herstellungsort bis zum Endverbrauch), für Kleinverbraucher/Haushalte wird generell zusätzlich 50 km Lieferwagen verrechnet [43a]

Aufwendungen für die Infrastruktur sind auf Ebene der ausgewählten Basismaterialien (z.B. Beton, Stahl) bilanziert. Es bleibt festzuhalten, dass der Einsatz von Maschinen und Vorprodukten mit 50% des Primärenergiegehaltes der Konstruktionsmaterialien berücksichtigt wird.

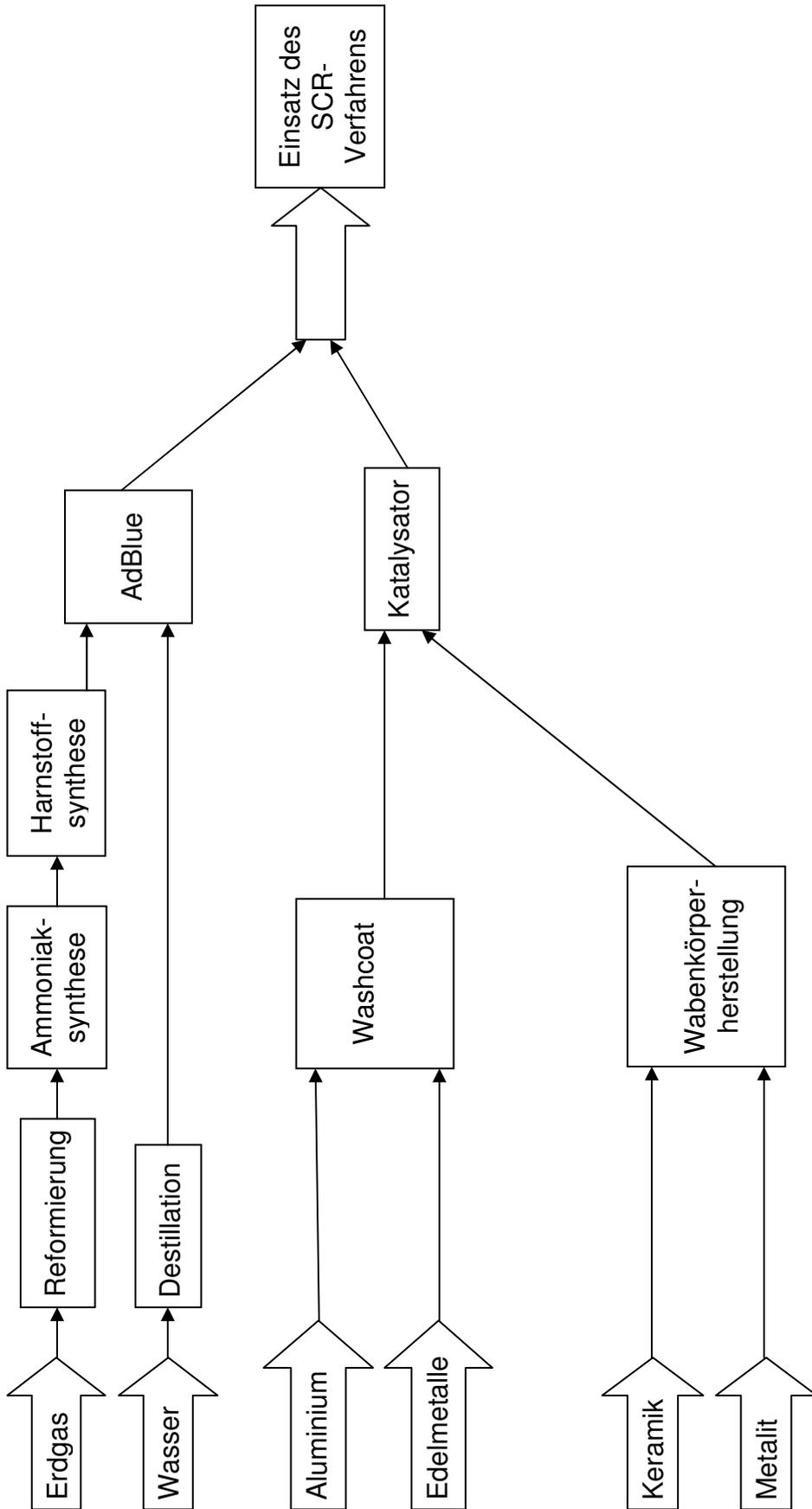
Für alle Energiesysteme gilt, dass der Büro- und Verwaltungsaufwand bei Planung, Bau, Betrieb und Abbruch der Systeme keine Berücksichtigung findet.

Desweiteren kommen noch Wasser und Luft als Umweltgrößen zum Tragen. Wasser wird ausschließlich als Produktionsmittel auf der Inputseite (z.B. Kühlwasser) angesehen, auch wenn es den Produktionszyklus als Abwasser wieder verlässt. Luft hingegen wird grundsätzlich nicht berücksichtigt, obwohl sie gerade bei Verbrennungsprozessen in nicht unerheblichem Umfang einfließt.

Zum Schluss werden noch Unfälle in die Berechnungen mit einbezogen. Die entstandenen Umweltschäden durch Unglücke sind ab einer Grenzhäufigkeit von $1 \cdot 10^{-3}$ pro Giga Watt berücksichtigt. Diese Grenzwahrscheinlichkeit, die als Anzahl der Unfälle pro erzeugter Energieeinheit gemessen wird, schließt allerdings aufgrund ihrer Seltenheit große Kernkraftwerks- und Öltanker-Unfälle aus [43a, 43b, 43c].

Die vorliegende Arbeit zeigt zunächst den Verfahrensverlauf in einem Fließbild und geht dann im Einzelnen auf die relevanten Größen ein. Hierbei ist zu beachten, dass die angegebenen Größen immer den Output einer Prozesskette darstellen und die Emissionen alle bisherigen Arbeitsschritte einschließen. Zum Schluss wird sowohl für einen PKW (ca. 2t) sowie für einen LKW (ca. 40t) als auch für einen Bus/leichtes Nutzfahrzeug der zusätzliche CO_2 - und NO_x -Ausstoß durch das SCR-Verfahren berechnet.

7.2. Fließschemata des SCR-Verfahrens



In diesem Fließbild sind die wichtigsten Prozessschritte von der Rohstoffquelle bis zum Einsatz im Fahrzeug dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Zwischenschritte abhängig von der Datengrundlage analysiert.

7.2.1. Erdgas

Den Rohstoff für das gesamte Verfahren stellt das Erdgas dar. Zur Herstellung der AdBlue-Harnstofflösung müssen diverse Arbeitsschritte durchlaufen werden, welche in der Erdgasförderung ihren Anfang nehmen. Die Bereitstellung von Erdgas erfolgt ebenfalls wieder über mehrere Arbeitsvorgänge, auf die im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht eingegangen werden kann. Das eingesetzte Erdgas besteht aus einer Mischung aus verschiedenen Quellen, die sich aus der Onshore-Gas-Förderung in Deutschland und Pipeline-Lieferungen aus Norwegen, Russland und den Niederlanden zusammensetzen [43d].

Zur Berechnung der weiteren Prozessschritte wird aus diesem Gas-Mix ein Energiewert ermittelt der als rechnerische Größe das Äquivalent von 1 Terra Joule verkörpert und in dem bereits sämtliche Transport- und Verdichtearbeit enthalten ist [43e].

Input:	Erdgas-DE	0,15	TJ
	Erdgas-NL	0,15	TJ
	Erdgas-NO	0,303	TJ
	Erdgas-RU	0,372	TJ
	LNG (Verflüssigung)	0,025	TJ
Output:	Erdgas-DE-KW-2000	1	TJ
Emission:	CO ₂	4849	kg
	NO _x	23,7	kg

7.2.2. Harnstoff

Der Harnstoff wird in der chemischen Industrie in großem Umfang hergestellt, da er in vielen verschiedenen Bereichen, wie beispielsweise der Düngemittel- oder auch der Kunststoffproduktion, Verwendung findet. Das zentrale Einsatzedukt einer konventionellen Harnstoff-Anlage stellt das Ammoniak dar [58]. Aufgrund der Relevanz und des hohen Energieverbrauches der Ammoniaksynthese wird an dieser Stelle die Bedeutung des Zwischenproduktes herausgestellt.

In integrierten Ammoniakanlagen wird zuerst aus Erdgas (siehe Abschnitt 7.2.1.) im Steam-Reformer unter Zusatz von Dampf, Luft und Wärme ein Synthesegas erzeugt. Das gereinigte Synthesegas wird im Haber-Bosch-Prozess bei 300 bar zu Ammoniak umgesetzt [57].

Input:	Erdgas-DE-KW-2000	$20,5 \cdot 10^{-6}$	TJ
	Prozesswärme	$9 \cdot 10^{-6}$	TJ
	Wasser (Stoff)	0,5	kg
Output:	NH ₃	1	kg
Emission:	CO ₂	1,98	kg
	NO _x	0,00138	kg

Die Bilanz wurde auf die Produktion von 1 kg NH₃ bezogen wobei 22,1 MJ Erdgas /kg NH₃ als brutto-Feed eingesetzt und mit netto 0,5 kg Dampf im Reformer umgesetzt werden. Die notwendige Prozesswärme wird aus 10,6 MJ Erdgas/kg NH₃ und 2,7 MJ Spülgas/kg NH₃ gewonnen. Die Emission allein aus der Ammoniaksynthese beläuft sich auf 1,24 kg CO₂ / kg NH₃ [20, 43f].

Den Berechnungen der Daten zur Harnstoff-Produktion liegt das Snamprogetti Ammonia- and Self-Stripping Verfahren zugrunde [58]. Tabelle 7.3. gibt einen Überblick über die wichtigsten Schritte des Kreislauf-NH₃-Stripping-Verfahrens, das im Vergleich zum konventionellen Lösungs-Kreislauf-Verfahren einen deutlich verbesserten Wirkungsgrad aufweist [60c].

Verfahrensschritte	Stufen und Reaktionsbedingungen	
Reaktor	NH ₃ /CO ₂ -Verhältnis	3,5
	Temperatur	170 °C
	Druck	150 Bar
Strippung mit NH ₃ und Rückführung bei Hochdruck	HD-Stripper (NH ₃ wird über den Stripper oder Selbststripper eingespeist)	
	HD-Kondensator	
Carbamat-Zersetzung	Vorgeschalteter Zersetzer	
	Zersetzer 1	17 Bar
	Zersetzer 2	4,5 Bar
Carbamat-Rückführung	Kondensation	
NH ₃ -Rückführung	Kondensation	
Abluft (aus der Zersetzung)	Behandlung in einem 2-stufigen Wäscher, NH ₃ -Lösungen werden rückgeführt	
Formgebung	Vakuum-Zersetzer	Kondensatbehandlung (Desorption, Hydrolyse mit 25 Bar-Dampf, Hydrolyse mit 70 Bar-Dampf)
	Eindampfung	
	Prilling	

Tabelle 7.3.: Beispiel eines Kreislauf-NH₃-Stripping-Verfahrens [60c]

Hauptmerkmal des häufig eingesetzten Verfahrens ist die Abtrennung großer Teile des nicht umgesetzten Carbamats aus der Reaktionslösung durch Freisetzung des überschüssigen NH₃ (self-stripping) in einem Hochdruckstripper. Es ermöglicht eine nahezu vollständige Rückführung der Rohstoffe und durch die Zersetzung bei niedrigen Drücken sowie die Wiederverdichtung eine beträchtliche Energieeinsparung von 30% im Vergleich zu konventionellen Verfahren [60c].

Die notwendigen Edukte- und Prozessbetriebsmittel sind für diesen Anlagentyp spezifisch und auf die Herstellung von 1 kg Harnstoff im Jahr 2010 bezogen. Neben dem Ammoniak ist ebenfalls CO₂ ein Edukt. Dies hat zur Folge, dass in der Emissions-Bilanz CO₂ abgezogen wird. Für jedes produzierte Kilogramm Harnstoff werden 0,735 kg CO₂ benötigt [43c].

Input:	NH ₃	0,568	kg
	CO ₂	0,735	kg
	Elektrizität	75,6*10 ⁻⁹	TJ
	Prozesswärme	3,75*10 ⁻⁶	TJ
	Wasser (Stoff)	80	kg
Output:	Harnstoff [(NH ₂) ₂ CO]	1	kg
Emission:	CO ₂	0,743	kg
	NO _x	0,00128	kg

7.2.3. AdBlue

Als AdBlue wird eine wässrige 32,5%ige Harnstofflösung bezeichnet, deren Eigenschaften in DIN 70070 [14] festgelegt sind. Der noch flüssige, reine Harnstoff aus der Produktionsanlage wird direkt in Großtanks geleitet und mit demineralisiertem Wasser versetzt. Das Wasser unterliegt strengen Kontrollen und garantiert dadurch die Anforderungen an die Lösung [17].

Um die CO₂-Bilanz weiter zu vervollständigen müssen die Emissionen bei der Destillation des Wassers berücksichtigt werden, wohingegen der Mischprozess vernachlässigt werden kann. An dieser Stelle wird 3fach-destilliertes Wasser zugrunde gelegt, da dieses auch in anderen Prozessen mit sehr hohen Qualitätsanforderungen Verwendung findet [43g].

Input:	Wasser (Trinkwasser)	1	kg
	Prozesswärme	7,5*10 ⁻⁶	TJ
Output:	Wasser (3fach-destilliert)	1	kg
Emission:	CO ₂	0,457	kg
	NO _x	0,000608	kg

Für die folgende Betrachtung wird nun die CO₂- und die NO_x-Emission bezogen auf einen Liter AdBlue berechnet.

AdBlue - Stoffdaten [14]

Dichte: 1,09 g/cm³ = 1,09 kg/l

Harnstoffkonzentration: 32,5% (Gewicht)

	Stoffanteil (Masse)	CO ₂ -Emission	NO _x -Emission
Harnstoff	0,3851 kg/l	0,2861 kg/l	0,00049 kg/l
Destilliertes Wasser	0,7049 kg/l	0,3221 kg/l	0,00043 kg/l
AdBlue	1,09 kg/l	0,6082 kg/l	0,00092 kg/l

Tabelle 7.4.: Emissionen bei der Herstellung von AdBlue

7.2.4. Katalysator

Die Herstellung von Katalysatoren ist durch die notwendigen Prozesse und Materialien sowohl aufwändig als auch teuer (siehe Kapitel 2.5.2 SCR-Katalysatoren). Aufgrund der hohen Lebensdauer von durchschnittlich 200.000 km ist jedoch ihr Anteil an den Gesamtemissionen nur gering.

Das Geschäftsgeheimnis führender Katalysatorhersteller verbietet die Herausgabe genauerer Informationen über die Verfahren. Die erhaltenen Daten sind nur als Größenordnungen zu sehen und können nicht verifiziert werden.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Bestandteile und Arbeitsschritte bei der Katalysator Herstellung auf die CO₂-Bilanz abgeschätzt. Durch die Ungenauigkeit und den Mangel an Daten wird eine sinnvolle Überschätzung angenommen, um den Einfluss zu maximieren.

Daten für einen Referenzkatalysator

Volumen	:	1 l
Gewicht	:	1 kg
Washcoat	:	99% Aluminiumoxid, 1% (Rhodium/Platin/Palladium)

Wabenkörper:

Der Wabenkörper aus hochtemperaturfester Keramik stellt den größten Teil des Katalysators dar und wird durch eine Refraktär⁴-Keramik repräsentiert, die auch in Hochöfen Verwendung findet [43h].

Input:	Ziegel	3,03	kg
Output:	Refraktär-Keramik	1	kg
Emission:	CO ₂	0,575	kg
	NO _x	0,00136	kg

⁴ refraktär = Materialeigenschaft: hohe thermische und mechanische Beständigkeit

Im Folgenden werden auf Grundlage der vorliegenden Daten einige Annahmen über Herstellung und Materialauswahl des Katalysatorwashcoats getroffen, um damit eine Einschätzung über die verursachten Emissionen zu liefern. Bei Standard SCR-Katalysatoren besteht der Washcoat ausschließlich aus Aluminium- oder Vanadiumoxid. Im Unterschied dazu wird beim vorliegenden Referenzkatalysator von Aluminiumoxid mit Edelmetallzusätzen ausgegangen, weil die Entwicklung neuer SCR-Katalysatoren die Verwendung von Rhodium, Platin und Palladium zur Umsatzsteigerung mit einbezieht. Desweiteren liegen die Emissionen bei der Edelmetallgewinnung ca. 1000-fach höher als bei Aluminium und verändern deshalb die Schadstoffbilanz.

Washcoat:

Es sind keine Informationen über Aluminium- bzw. Vanadiumoxid verfügbar, deshalb wird an dieser Stelle von reinem Aluminium ausgegangen [43i]. Hierbei ist anzumerken, dass durch die Annahme von reinem Aluminium der Energieverbrauch grundsätzlich überschätzt wird, denn im Allgemeinen wird Aluminiumoxid im Herstellungsprozess direkt aus Aluminium-Mineralien gewonnen. Außerdem muss das reine Aluminium für die Verwendung im Katalysator noch oxidiert werden, was ebenfalls mit erheblichem Energieaufwand verbunden ist. Es können keine Aussagen über die Höhe und das Verhältnis der Energiebedarfe beider Wege getroffen werden. Die validierbaren Daten erlauben nur eine Betrachtung von reinem Aluminium und deshalb ist dadurch von höherem Energieverbrauch und damit größeren Emissionen auszugehen.

Input:	Aluminiumfluorid	0,018	kg
	Anoden-C	0,43	kg
	Bauxit	1,9	kg
	Elektrizität	$48,2 \cdot 10^{-6}$	TJ
	Prozesswärme	$3,83 \cdot 10^{-6}$	TJ
Output:	Aluminium	1	kg
Emission:	CO ₂	12,8	kg
	NO _x	0,0226	kg

Edelmetalle:

Die Emissionen der Edelmetalle [43j, 43k, 43l]:

	CO ₂ (kg)	NO _x (kg)
Rhodium (1 kg)	24600	40,1
Platin (1 kg)	12900	21,1
Palladium (1 kg)	3651	5,6

Tabelle 7.5.: Durchschnittliche Emissionen bei der Edelmetallförderung

Für den hier betrachteten Referenzkatalysator gilt folgende Gewichts zusammensetzung:

Material	Gewicht
Keramik	900 g
Aluminium	99,99 g
pro Edelmetal (Rhodium/Platin/ Palladium)	3,33 mg

Tabelle 7.6.: Zusammensetzung des Referenzkatalysators

Daraus ergibt sich die Emissionsbilanz für die Materialgewinnung zu:

	CO ₂ (g)	NO _x (mg)
Keramik	517,5	1224
Aluminium	1279,87	2259,77
Rhodium	81,92	133,53
Platin	42,96	70,26
Palladium	12,16	18,65
Gesamt	1934,41	3706,21

Tabelle 7.7.: Emissionsbilanz für die Materialgewinnung des Referenzkatalysators

Die benötigte Energie zur Aufbringung des Washcoats wird durch den gleichen elektrischen Input wie beim Harnstoff realisiert. Die Firma Umicore hat ihren Energiebedarf zur Beschichtung mit 10 kWh pro Liter Katalysatorvolumen angegeben, von dem im Folgenden Ausgegangen wird.

	CO ₂ (g)	NO _x (mg)
10 kWh elektrische Energie	6012	5868

Tabelle 7.8.: Emissionen bei der Beschichtung von Katalysatoren (Umicore)

Der gesamt Emissionsausstoß wird nun auf die Lebensleistung des Katalysators bezogen und alle nicht berücksichtigten Rohstoffe, Produktionsschritte und Energiebedarfe mit einem Unsicherheitsfaktor von 50% versehen.

	CO ₂ (g/km)	NO _x (mg/km)
Katalysator	0,0397	0,0479
Unsicherheitsfaktor	0,01985	0,02395
Gesamt	0,05955	0,07185

Tabelle 7.9.: Gesamtemissionsbilanz für den Referenzkatalysator

7.3. Kohlenstoffdioxid- und Stickoxidbilanz

In diesem Kapitel soll aus den gewonnenen Daten die zusätzliche CO₂- und NO_x-Emission durch den Einsatz der SCR-Technologie anhand von verschiedenen Referenz-Fahrzeugen gezeigt werden. Hierbei werden alle Daten der Produktion bis zum Einsatz berücksichtigt.

Es wird über alle Fahrzeuggruppen angenommen, dass der Verbrauch an Harnstofflösung ca. 5% des Dieserverbrauchs entspricht [17]. Bei der Hydrolyse des Harnstoffs in Ammoniak wird das zuvor gebundene CO₂ wieder frei und fließt ebenfalls in die Bilanz mit ein. Die Emissionen der Katalysatoren werden ebenfalls mit einbezogen, können allerdings nur unter Vorbehalt (vgl. Abschnitt 7.3.) betrachtet werden. Die Umrechnung des durchschnittlichen Kraftstoffverbrauches (l/100km) in Kohlenstoffdioxid (g/km) für Diesel erfolgt durch die Formel [30]:

$$x \frac{\text{g}}{\text{km}} = y \frac{\text{l}}{100 \text{ km}} * 26,5 \frac{\text{kg}}{10 \text{ l}} \quad (\text{Gl. 7.1.})$$

7.3.1. Pkw

Die vermessene repräsentative Flotte setzt sich aus Dieselfahrzeugen der Mittel- und Oberklasse mit der Abgasnorm Euro 6 incl. SCR-Technik zusammen [1].

Referenz-Pkw (Diesel)

Gewicht:	2	t
Leistung:	80- 100	kW
Katalysatorvolumen:	2	l

		CO ₂ -Emission [g/km]	Anteil	NO _x -Emission [mg/km]
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	7	185,5	100%	-
AdBlue (Verbrauch) [l/km]	0,0035	2,1287	1,15%	3,22

AdBlue (Reaktion) [l/km]	0,0035	1,3478	0,73%	0
Katalysator	-	0,1191	< 0,1%	0,1437
Gesamt	-	189,0956	-	3,3637

Tabelle 7.10.: Gesamtemissionsbilanz für einen Referenz-Pkw (Diesel)

7.3.2. Lkw

Verschiedene Modelle von Mercedes-Benz (Nutzfahrzeuge) und MAN wurden im Praxistest erprobt und die folgenden Daten konnten verifiziert werden. Es wurden wiederum Durchschnittswerte gebildet um einen „Referenz-Lkw“ darzustellen [15].

Referenz-Lkw

Gewicht: 40 t
 Leistung: 250 - 350 kW
 Katalysatorvolumen: 20 l

		CO ₂ -Emission [g/km]	Anteil	NO _x - Emission [mg/km]
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	30	795	100%	-
AdBlue (Verbrauch) [l/km]	0,015	9,123	1,15%	13,8
AdBlue (Reaktion) [l/km]	0,015	5,7765	0,73%	0
Katalysator	-	1,191	< 0,15%	1,437
Gesamt	-	811,0905	-	15,237

Tabelle 7.11.: Gesamtemissionsbilanz für einen Referenz-Lkw

7.3.3. Bus / Leichte Nutzfahrzeuge

Busse und leichte Nutzfahrzeuge wurden ebenfalls unter realen Bedingungen getestet und zeigten aufgrund vergleichbarer Motorleistungen, Abgasmengen und bautechnischen Übereinstimmungen sehr ähnliche Messergebnisse. Dies ermöglicht die Gestaltung eines einheitlichen „Referenz-Fahrzeugs“ das beide Kategorien abdeckt [15, 56].

Referenz- Fahrzeug

Gewicht:	10	t
Leistung:	150 - 200	kW
Katalysatorvolumen:	15	l

		CO ₂ -Emission [g/km]	Anteil	NO _x - Emission [mg/km]
Kraftstoffverbrauch [l/100km]	20	530	100%	-
AdBlue (Verbrauch) [l/km]	0,01	6,082	1,15%	9,2
AdBlue (Reaktion) [l/km]	0,01	3,851	0,73%	0
Katalysator	-	0,89325	< 0,17%	1,07775
Gesamt	-	540,82625	-	10,27775

Tabelle 7.12.: Gesamtemissionsbilanz für ein Referenzfahrzeug

7.4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Umweltbilanz unterstützen stark die Position die SCR-Technologie in alle Abgasnachbehandlungssysteme zu integrieren. In den vorangegangenen Kapiteln wurden für alle relevanten Prozessschritte, wie sie im Fließbild 7.2. dargestellt sind, detaillierte Berechnungen der Schadstoffmengen durchgeführt. Es zeigte sich, dass selbst die emissionsträchtigen Rohstoffförderungen die Gesamtbilanz kaum belasteten. Allein die Zwischenschritte zur Herstellung eines Liters AdBlue führen zu ungefähr 600 g CO₂- sowie 0,92 g NO_x-Emissionen und zusätzlich setzt die Lösung das im Harnstoff gespeicherte Kohlenstoffdioxid in der späteren SCR-Reaktion (siehe 2.5.1. Die Chemie der SCR-Reaktion) wieder frei. Trotz dieser zunächst hoch erscheinenden Menge ergibt sich aus den weiteren Berechnungen, dass der anwachsende CO₂-Ausstoß pro km über alle Fahrzeugkategorien lediglich 2% der Emission des Kraftstoffverbrauches (siehe Tabelle 7.13.) entspricht. Die Zusatzemissionen, die durch den Katalysator verursacht werden, sind in der Gesamtbilanz vernachlässigbar, da sie über die Lebensdauer gemittelt weniger als 0,2% betragen.

Um die Ergebnisse einordnen und bewerten zu können werden im Folgenden die zusätzlichen Emissionen durch AdBlue mit den Minderungsraten für Stickoxid verglichen. Aus diesem Grund wird zunächst als Referenz ein NO_x-Mittelwert aus den Abgasnormen für Diesel-Pkw und Lkw gebildet (siehe Abschnitt 3.1.1 Euro-Abgasnormen), um die signifikante Minderungswirkung der Technologie aufzuzeigen. Die hypothetischen Fahrzeugflotten setzen sich mit jeweils 1/3 aus Fahrzeugen der verschiedenen Euronormen zusammen. In Tabelle 7.13. ist der aus den Grenzwerten der Euro 3, 4 und 5 für Diesel-Pkw und Euro III, IV und V für Lkw berechnete durchschnittliche Stickoxidausstoß sowie die zusätzlich Kohlenstoffdioxidemission der obigen Referenz-Fahrzeugen zu sehen.

	NO _x [g/km]	CO ₂ [g/km]
Diesel-Pkw	0,31	180
Lkw	3,5	800

Tabelle 7.13.: Durchschnittliche Emission von Diesel-Pkw und Lkw

Die Minderungsrate durch das SCR-System liegt bei ca. 90%. Das bedeutet für den angenommenen Fall, dass Diesel-Pkw absolut 0,279 g NO_x/km und Lkw 3,15 g NO_x/km einsparen können. Setzt man diesen Wert in Bezug zu den Zusatzemissionen aus der Gesamtbilanz (siehe Tabelle 7.10. und 7.11.), so lässt sich ein gravierender Reduktionsvorteil erkennen. Der um ca. 3 mg für Pkw und 15 mg für Lkw erhöhte Stickoxidausstoß erhöht die Gesamtemission um weniger als 1% und ist somit vernachlässigbar. Die Kalkulation bestätigt, dass sowohl für Kohlenstoffdioxid als auch für Stickoxid die Vorteile des SCR-Verfahrens die Nachteile bei Weitem überwiegen.

In Zukunft wird sich voraussichtlich der Kraftstoffverbrauch aller Fahrzeugklassen durch technische Entwicklungen weiter absenken und damit die CO₂-Emission reduzieren. Das bedeutet für die SCR-Technologie, dass ihr prozentualer Anteil an der Gesamtemission steigen wird, jedoch in nur sehr geringem Umfang. Für einen Diesel-Pkw mit einem theoretischen CO₂-Ausstoß von nur 130 g/km, was einem Verbrauch von ca. 4,9 l entspricht, stiege ihr Anteil nicht über 3%. In allen anderen Fahrzeugkategorien wäre der Einfluss trotz Effizienzverbesserung noch geringer, da diese motorbedingt einen höheren Kraftstoffverbrauch haben.

Kapitel 8

Fazit

Ziel der vorliegenden Diplomarbeit war es, die Problematik der Stickoxide aufzuzeigen und insbesondere das in den letzten Jahren gestiegene NO_2/NO_x -Verhältnis zu begründen. Es wurden Lösungsansätze zur Minderung differenziert betrachtet und im Anschluss eine Umweltbilanz herausgearbeitet, die den ökologischen Nutzen der SCR-Technologie darstellt.

Die Analysen dieser Arbeit haben gezeigt, dass die Stickoxidkonzentration auch in den kommenden Jahren zu den zentralen Problemen der Luftverschmutzung gehören wird. Vor allem der weitere Anstieg des Stickstoffdioxids bereitet Anlass zur Sorge, da dieser Luftschadstoff für eine Vielzahl von negativen Auswirkungen für Mensch und Umwelt verantwortlich ist.

Die Studien der Emissionskonzentrationen in Baden-Württemberg, die repräsentativ für Europa zu sehen sind, haben eindeutig belegt, dass die ab dem Jahr 2010 gültigen NO_2 -Jahresmittelwerte von $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und die Stundenmittelwerte von $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bei Weitem nicht eingehalten werden können. Die von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) durchgeführten Messungen erkannten, nach vielschichtiger Differenzierung, im Straßenverkehr den Hauptemittenten von Stickoxiden. Es zeigte sich, dass gerade der steigende Anteil an Dieselfahrzeugen negativen Einfluss auf die NO_x -Emissionen hat. Wirksame Maßnahmen zur Minderung können deshalb nur in diesem Sektor ergriffen werden, wobei sich die Schaffung von Umweltzonen und generellen Fahrverboten als einzig adäquate Mittel auftraten. Dabei ergab sich, dass soziale und ökonomische Folgen schwer einschätzbar sind und von daher einer genauen Überprüfung bedürfen.

Am Beispiel des Abgasnachbehandlungskonzeptes AdBlue wurde deutlich, dass die Technologie zur Einhaltung der Grenzwerte weitestgehend verfügbar ist. Trotzdem müssen weiterhin technisch bedingte Hürden überwunden werden um das SCR-

Verfahren zu optimieren und auf den Einzelfall anzupassen. Zwar kann gesagt werden, dass Minderungsraten in den einzelnen Fahrzeugkategorien zwischen 70% und 90% realisierbar sind, diese jedoch an ökonomische Einschränkungen geknüpft sind. Wie gezeigt wurde kann die Ausstattung von Neufahrzeugen mit AdBlue, abhängig von staatlicher Unterstützung, schnell rentabel sein, wohingegen die Nachrüstung von älteren Fahrzeugen sich nach den vorliegenden Daten kaum lohnen wird. Als Lösungsweg zeichnet sich eine Kostensenkung für die SCR-Technik seitens der Industrie und eine staatliche Zuwendung, ähnlich der Umweltprämie für Dieselpartikelfilter, ab.

Offen bleibt die zukünftige Möglichkeit neue Technologien zur Entstickung von sauerstoffreichen Abgasen zu entwickeln, die auf ähnlich breiter Serienbasis einsetzbar sind. Bisherige Alternativen, wie z.B. der NO_x-Speicherkatalysator, beschränken sich lediglich auf Nischen in der gesamten Dieselfahrzeugflotte.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Frage nach der ökologischen Rentabilität eindeutig beantwortet wurde, denn nach den Ergebnissen der Umweltbilanz sollte jedes Fahrzeug mit der SCR-Technologie ausgerüstet sein. Die Berechnungen belegen die großen Vorzüge der Reduktion gegenüber den zusätzlichen Emissionen. Es konnte gezeigt werden, dass die Umweltbilanz auch im Hinblick auf künftige Kraftstoffeinsparungen bezüglich CO₂ und NO_x nahezu neutral ist.

Die genaue Entwicklung der hier gezeigten Sachverhalte ist noch nicht absehbar, jedoch erscheint die kontinuierliche Reduktion der Stickoxide als gesichert. Der zeitlichen Rahmen der Minderung unterliegt vielen Randbedingungen, wird aber aufgrund des gesetzlichen Drucks voraussichtlich beschleunigt von statten gehen. Indes bleibt zu hoffen, dass die Reduzierung der Stickoxide durch die gezeigten Maßnahmen in sozial verträglicher und finanziell vertretbarer Weise erfolgt.

Kapitel 9

Literaturverzeichnis

- [1] ADAC; Kolke, Dr. Reinhard: Möglichkeiten der Stickoxidminderungen bei Fahrzeugen und notwendige Rahmenbedingungen; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010

- [2] Amt für Umweltschutz Stuttgart; Reuter, Dr. Uwe: NO₂-Belastung in Stuttgart – Situation, Maßnahmen, Fortschritte; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010

- [3] Binder, K.: Maßnahmen zur innermotorischen NO_x-Absenkung; 2. Dresdner Motorenkolloquium, Seite 113-120, 1997

- [4] Bosch; Krüger, Michael, DS/ENT Entwicklung Technologie; Strobel, Martin, DS/EAS Entwicklung Abgasnachbehandlung: Emissionsfortschritte durch Einspritzsysteme und Abgasnachbehandlung - Möglichkeiten zur NO_x-Reduktion; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010

- [5] Brinkmeier, C.; Opferkuch, F.; Tuttlies, U.; Schmeisser, V.; Bernnat, J.; Eigenberger, G.: Autoabgasreinigung - eine Herausforderung für die Verfahrenstechnik. Chemie Ingenieur Technik No. 9, 2005

- [6] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
 - a. Bearbeitungsliste des Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) zur TRGS 900 (Technische Regeln für Gefahrstoffe), Stand: 17.04.2008

- b. Bekanntmachung zu den Maximalen Arbeitsplatz-Konzentrationen (MAK) und zu den Biologischen Arbeitsstoff-Toleranzwerten (BAT) (MAK- und BAT-Werte-Liste), Stand: 13. März 2009
- [7] Bundes-Immissionsschutzgesetz
- a. 11. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Emissionserklärungen) in der Fassung der Bekanntmachung vom 5. März 2007 (BGBl. I S. 289)
 - b. 39. Verordnung (Verordnung über Luftqualitätsstandards und Emissionshöchstmengen – 39. BImSchV), Gesamtherstellung: H. Heenemann GmbH & Co., Buch- und Offsetdruckerei, Berlin; Vertrieb: Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft mbH, Berlin, 25.01.2010
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft), 24. Juli 2002
- [9] Cartus, T.; Holy, G.; Herzog, P.: Integration der NO_x-Adsorbertechnologie in zukünftige Otto- und Dieselmotorkonzepte; 19. Internationales Wiener Motorensymposium, Seite 343-365, 1998
- [10] CEFIC: Automotive Grade Urea - Quality Assurance Guidance Document, European Chemical Industry Council, URL: <http://www.petrochemistry.net/Product§or groups/Automotive grade urea>, Brüssel, 15.07.2004, (Abruf am 11.06.2010)
- [11] Centi G.; Militerno, S.; Perathoner, S.; Riva, A.; Brambilla, G.: J. Chem. Soc. Chem. Commun., 1991
- [12] Choi, H.; Ham, S.W.; Nam, I.S.; Kim, Y.G.: Ind. Eng. Chem. Res. 35, 1996
- [13] Clean Thinking, URL: <http://www.cleanthinking.de/cleantech-firmenportraet-namos-gmbh-dresden/4317/> (Abruf am 11.06.2010)

- [14] Deutsche Industrie Normen (DIN), URL: <http://www.din70070.com/> (Abruf am 11.06.2010)
- [15] Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.: DGMK Forschungsbericht 616-2, Autor Dr. Wolf-Peter Trautwein: AdBlue als Reduktionsmittel für die Absenkung der NO_x-Emissionen aus Nutzfahrzeugen mit Dieselmotor Teil 2: AdBlue-Erprobung in Labor- und Feldtesten AdBlue-Logistik, Hamburg, Februar 2005
- [16] Emitec; Holz, Oswald; Scheeder, Dr. Andreas; Brück, Rolf: SCR - Aufrüstung für leichte und schwere Nutzfahrzeuge zur Reduzierung der Stickoxidemissionen; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010
- [17] Euroblue, URL: <http://www.euroblueonline.de/html/index.php?idcat=10&sid=bf84c291325d5c14656b6a02675d3ac1> (Abruf am 11.06.2010)
- [18] euSDB - Der Suchindex für Sicherheitsdatenblätter, URL: <http://www.eusdb.de/de/search/results?producer=0&item=&term=Harnstoff&search=begin&cas=> (Abruf am 11.06.2010)
- [19] Europäische Union
- a. Richtlinie 2008/50/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 21. Mai 2008 über Luftqualität und saubere Luft für Europa, 2008
 - b. http://europa.eu/legislation_summaries/internal_market/single_market_for_goods/motor_vehicles/interactions_industry_policies/l32034_de.htm (Abruf am 11.06.2010)
- [20] Frischknecht, R., et al.: Ökoinventare von Energiesystemen, Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz; Gruppe Energie - Stoffe - Umwelt (ESU) Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich; Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul Scherrer Institut, Villigen/Würenlingen;

Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW), Projekt- und Studienfonds der Elektrizitätswirtschaft (PSEL), 1996

- [21] Fritsche, U.R.; Schmidt, K.: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.2, Handbuch, Darmstadt, August 2004
- [22] Fritsche, U.R.; Schmidt, K.: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.1, Handbuch, Darmstadt, Darmstadt, Januar 2003
- [23] Fritsche, U., et al.: Stoffstromanalyse zur nachhaltigen energetischen Nutzung von Biomasse, Verbundprojekt gefördert vom BMU im Rahmen des ZIP, Anhangband zum Endbericht, Projektträger: FZ Jülich, Mai 2004
- [24] Fritsche, U., et al.: Umweltanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen: Gesamt-Emissions-Modell integrierter Systeme (GEMIS) Version 2.1 - erweiterter und aktualisierter Endbericht, U. Fritsche u.a., i.A. des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten (HMUEB), veröffentlicht durch HMUEB, Wiesbaden, 1995
- [25] Fritz, A.; Pichton, V.: The current State of research on automotive lean NO_x catalysis; Applied Catalysis B: Environmental, Seite 1-25, 1997
- [26] Hagenlücken, C.: Autoabgaskatalysatoren. Expert-Verlag, 2001.
- [27] Holderbaum, Bastian: Dosierstrategie für ein SCR-System zur NO_x-Reduktion im Diesel PKW, Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2009
- [28] Holleman, Arnold F.; Wiberg, Egon: Lehrbuch der Anorganischen Chemie. 101. Auflage, Walter de Gruyter Verlag, Berlin – New York, 1995
- [29] Institut für Energie und Umweltforschung (IFEU) Heidelberg GmbH; Dünnebeil, Frank; Lambrecht, Udo; Schacht, Alexander: Auswirkungen zukünftiger NO_x- und NO₂-Emissionen des Kfz-Verkehrs auf die Luftqualität in hoch belasteten

- Straßen in Baden-Württemberg; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen
Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010
- [30] Innenministerium Baden-Württemberg: Energiesparend Fahren; 7. Aktualisierte
Auflage, Stuttgart, Oktober 2008
- [31] Jansen, Walter; Block, Anke; Knaack, Jürgen: Saurer Regen: Ursachen,
Analytik, Beurteilung.; Metzler Verlag, Stuttgart, 1987
- [32] Joos, Dr.-Ing. Franz: Technische Verbrennung, Springer-Verlag, Berlin
Heidelberg, 2006
- [33] Kind, W.: Beitrag zur NO_x-Verminderung im Abgas von Dieselmotoren durch
selektive katalytische Reduktion mit Harnstoff; Dissertation, Universität
Kaiserslautern, 1998
- [34] Klein, H.; Böhnke, H.; Hoffmann, M.; Lox, E.; Cartus, T.; Neunteufl, K.; Bürgler,
L.; Herzog, P.: NO_x-Abgasbehandlung für Diesel-PKW gelöst? Entschwefelung
von NO_x-Speicher-Katalysatoren; 22. Internationales Wiener Motoren-
symposium, Seite 192-215, 2001
- [35] Kyoto-Protokoll: Das Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der
Vereinten Nationen über Klimaänderungen; Hrsg. Sekretariat der Klimarahmen-
konvention mit Unterstützung des deutschen Bundesumweltministeriums;
Kyoto, 16. März 1998
- [36] Lahl, Dr. Uwe, BMU; Lambrecht, Dipl.-Physiker Udo, IFEU: Hohe NO₂-
Belastungen: Für Dieselabgase weiterhin Handlungsbedarf, Verband der
Automobilindustrie, Technischer Kongress 2008
- [37] Lies, K. H., et al.: Nicht limitierte Automobil-Abgaskomponenten; Volkswagen
AG Forschung und Entwicklung, 1998

- [38] Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
- a. Luftreinhalte- und Aktionspläne für Baden-Württemberg Grundlagenband 2008, Karlsruhe, August 2009
 - b. Umweltdaten 2009 Baden-Württemberg, Hrsg. Umweltministerium Baden-Württemberg, 1. Auflage, Stuttgart, November 2009
 - c. Scholz, Dr. Werner: NO₂-Immissionsbelastung in Deutschland und Baden-Württemberg, Referat 33 - Luftqualität
 - d. URL: <http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/18343/> (Abruf am 11.06.2010)
- [39] Landeshauptstadt Hannover Bereich Umweltschutz; Schmidt, Dirk: Erfahrungen der Stadt Hannover mit der Umweltzone; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010
- [40] Lütkemeyer, G.; Weinowski, R.; Lepperhoff, G.; Brogan, M. S.: Comparison of De-NO_x and Adsorber Catalysts to Reduce NO_x-Emissions of Lean Burn Gasoline Engines, SAE 962046, Technical Paper Series, 1996
- [41] MAN; Emmerling, Gerhard: Techniken zur Reduktion der NO_x-Emissionen bei LKW und Bus zur Erfüllung von Euro VI; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010
- [42] Marquardt, Prof. Dr. Hans; Schäfer, Prof. Dr. Dr. Siegfried G.: Lehrbuch der Toxikologie, 2. Auflage, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, 2004
- [43] Ökoinstitut e.V.: Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagement Instrumente (Probas), URL (Abruf am 11.06.2010):
- a. http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={A0917B38-69ED-467B-9EBC-E4FE79CB8131}&id=1&step=1&search=Harnstoff&b=1&PHPSESSID=qigtspxv&show_specificum=1&PHPSESSID

=qigtspvx

- b. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={0E0B274E-9043-11D3-B2C80080C8941B49}&id=1&step=1&search=Harnstoff&b=1>
- c. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={8D5EFEFE-05AE-4768-A71565D61809492F}&id=1&step=1&search=Harnstoff&b=1>
- d. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/procid.php?&prozessid={0E0B274E-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&id=1&step=1&search=Harnstoff&b=1&PHPSESSID=qigtspvx&prozessid={0E0B2723-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&style=procid&PHPSESSID=qigtspvx&prozessid={0E0B2BAA-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&style=procid&PHPSESSID=qigtspvx&prozessid={0E0B2AB6-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&style=procid&PHPSESSID=qigtspvx>
- e. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/procid.php?&prozessid={0E0B274E-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&id=1&step=1&search=Harnstoff&b=1&PHPSESSID=qigtspvx&prozessid={0E0B2723-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&style=procid&PHPSESSID=qigtspvx&prozessid={0E0B2BAA-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&style=procid&PHPSESSID=qigtspvx>
- f. http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/procid.php?&prozessid={0E0B274E-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&id=1&step=1&search=Harnstoff&b=1&PHPSESSID=qigtspvx&prozessid={0E0B2723-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&style=procid&PHPSESSID=qigtspvx&show_comment=1&PHPSESSID=qigtspvx
- g. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={95C7A2BB-3741-4025-8FDF-3C74BA964D81}&id=1&step=1&search=Wasser&b=1&PHPSESSID=qigtspvx>
- h. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={0E0B2CAF-9043-11D3-B2C8-0080C8941B49}&id=1&step=1&search=Keramik&b=1>
- i. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={58A77C5F-D54B-473E-BF6B-AF7A1147BDBC}&id=1&step=1&search=Aluminium&b=1>

- j. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={EDCF1ECC-97E7-4D61-9A68-F1FDCEC324CC}&id=1&step=1&search=Rhodium&b=1>
 - k. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={49E8A926-0581-4FC1-B3E5-232C32366C8A}&id=1&step=1&search=Platin&b=1>
 - l. <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/volltextsuche.php?&prozessid={CB688265-87B0-4B98-9C94-70362C411F15}&id=1&step=1&search=Palladium&b=1>
- [44] Patente; URL: <http://www.patent-de.com/20090312/DE19908173B4.html> (Abruf am 11.06.2010)
- [45] Pischinger, F.: Verbrennungsmotoren I und II; Vorlesungsumdruck, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1995
- [46] Reichl, Franz-Xaver: Taschenatlas Toxikologie, 3. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 2009
- [47] Regierungspräsidium Karlsruhe: Luftreinhalte-/Aktionsplan für den Regierungsbezirk Karlsruhe Teilplan Karlsruhe, Mai 2006
- [48] Regierungspräsidium Stuttgart: Luftreinhalte-/Aktionsplan für den Regierungsbezirk Stuttgart - Teilplan Schwäbisch Gmünd, Januar 2008
- [49] Schmitt, F.: Numerische Simulation der Bildung und der Reduktion von Stickoxiden in unterschiedlichen Anwendungsfällen; VDI Fortschrittsberichte Reihe 12, Nr. 359, Dissertation Universität Kaiserslautern, 1998
- [50] Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz Berlin, Abteilung III, Umweltpolitik; Lutz, Martin: NO₂ Belastung in deutschen Kommunen: Situation, Maßnahmen, Fortschritte, Probleme am Beispiel Berlin; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010

- [51] Spurk, P. C.; Pfeifer, M.; Gieshoff, J.; Lox, E.: Ein SCR-Katalysator auch für den Einsatz im Pkw; 10. Aachener Kolloquium FahrzeugundMotorentchnik, Seite 833-854, 2001
- [52] Stiech, G., Eiglmeier, C., Merker, G. P., Wirbeleit, F.: Möglichkeiten und Anwendung der phänomenologischen Modellbildung im Dieselmotor; MTZ Motortechnische Zeitschrift 60, 1999
- [53] Technische Universität Graz – Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik; Hausberger, Prof. Dr. Stefan; Rexeis, Dr. Martin; Zallinger, Dr. Ing. Michael: NO_x- und NO₂-Emissionen von aktuellen und zukünftigen Kraftfahrzeugen; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010
- [54] Teigeler, F.; Schmitt, F.; Enderle, C.; Wirbeleit, F.; Bockhorn, H.: Mechanismen der NO_x-Bildung und -Reduktion: Ansätze zur innermotorischen NO_x-Absenkung unter dieselmotorischen Bedingungen; 2. Dresdner Motorenkolloquium, Seite 158-162, 1997
- [55] Teigeler, M: Experimentelle Untersuchungen zur nicht-katalytischen Reduzierung der Stickoxidemissionen mit Kohlenwasserstoffen und Harnstoff am aufgeladenen Nutzfahrzeug-Dieselmotor, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1998
- [56] TÜV-Nord; Kleinebrahm, Martin: Emissionsmessungen an Bussen mit stickoxid-reduzierenden Nachrüstungen; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010
- [57] Ullmann: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Fifth Completely Revised Edition, Vol. A 3, Weinheim, 1985
- [58] Ullmann: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Fifth Completely Revised Edition, Vol. A 11, Weinheim, 1988

- [59] Umweltatlas Hessen, URL: http://atlas.umwelt.hessen.de/servlet/Frame/atlas/luft/ik/qualitaet/no2/no2_txt.htm (Abruf am 11.06.2010)
- [60] Umweltbundesamt Deutschland
- a. Entwicklung der Luftqualität in Deutschland, Fachgebiet II 4.2 "Beurteilung der Luftqualität", Dessau-Roßlau, Oktober 2009
 - b. URL: <http://www.umweltbundesamt.de/gesundheit/innenraumhygiene/Stickstoffdioxid.pdf> (Abruf am 11.06.2010)
 - c. Integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU), Merkblatt über die besten verfügbaren Techniken für die Herstellung Anorganischer Grundchemikalien: Ammoniak, Säuren und Düngemittel, August 2007
- [61] Umweltbundesamt Österreich, Nagel, Dr. Christian: NO₂ Maßnahmen in Österreich; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010
- [62] Vereinte Nationen, 15. Klimakonferenz: Vereinbarung von Kopenhagen (copenhagen accord), Kopenhagen, 18. Dezember 2009
- [63] Volkswagen; Schindler, Dr. Klaus-Peter: Ansätze der Automobilindustrie zur Reduktion der NO₂ – Emissionen; Tagung Herausforderung NO₂-Immissionen Gesetzgebung, Luftbelastung, Lösungen; Heidelberg, 3./4. März 2010
- [64] Warnatz, Prof. Dr. Dr. h. c. Jürgen; Maas, Prof. Dr. Ulrich; Dibble, Prof. Dr. Robert W.: Verbrennung – Physikalisch-Chemische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2001
- [65] Weisweiler, W.; Maurer, B.: Stickoxidverminderung in Abgasen von Diesel- und Mager-Otto-Motoren nach dem SCR-Verfahren; Dieselmotorentechnik 98, Band 553, Seite 92-117, Expert Verlag Renningen-Malmsheim, 1998

- [66] Weisweiler, W.; Walz, C.; Buchholz, F.; Schmitzer, S.; Müller, W.; Heilig, D.; Meyer, S.; Porten, G.: Stickoxidminimierung am Pkw-Dieselmotor bei optimalem Energieverbrauch (GD-Kat); VFI-Forschungsbericht, 1999
- [67] WHO: Air Quality Guidelines Global Update 2005, Seite 331-377, 2005
- [68] WHO: Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide, Seite 46-56, Report on a WHO Working Group, Bonn, Germany, 13–15 January 2003
- [69] Wiwio; Portal der Wirtschaftswoche: Jetzt kommt der Kat für den Truck, URL: <http://www.wiwo.de/unternehmen-maerkte/jetzt-kommt-der-kat-fuer-den-truck-359876/> (Abruf am 11.06.2010)
- [70] Wunsch, R.: Entwicklung eines Katalysator-Reduktionsmittel-Systems zur Stickoxidminderung in Abgasen aus Dieselmotoren. Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, 1996