

TEXTE

09/2012

Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung

Zusammenfassender Abschlussbericht

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 206 43 200/01
UBA-FB 001524

Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung

Zusammenfassender Abschlussbericht

von

Peter Builtjes

TNO Earth, Environment and Life Sciences, Utrecht (Niederlande)

Wolfram Jörß

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin

Rainer Stern

Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie, Troposphärische
Umweltforschung, Berlin

Jochen Theloke

Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung,
Stuttgart

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4268.html>
verfügbar. Hier finden Sie noch weitere Anhänge.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung
der Studie:

TNO Earth, Environment
and Life Sciences
P.O.Box 80015
3508 TA Utrecht, The Netherlands

Institut für Zukunftsstudien
Institut für Zukunftsstudien
Schopenhauerstr. 26
14129 Berlin

Universität Stuttgart
Institut für Energiewirtschaft
und Rationelle Energieanwendung
Heßbrühlstraße 49a
70565 Stuttgart

Freie Universität Berlin
Institut für Meteorologie
Troposphärische Umweltforschung
Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10
12165 Berlin

Abschlussdatum:

Dezember 2010

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>
<http://fuer-mensch-und-umwelt.de/>

Redaktion:

Fachgebiet II 4.1 Grundsatzfragen der Luftreinhaltung
Johanna Appelhans

Dessau-Roßlau, März 2012

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001524	2.	3.
4. Titel des Berichts Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung (Zusammenfassender Abschlussbericht)		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Peter Builtjes, Wolfram Jörß, Rainer Stern, Jochen Theloke		8. Abschlussdatum Dezember 2010
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) TNO Earth, Environment and Life Sciences P.O.Box 80015, 3508 TA Utrecht, The Netherlands Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Heßbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung Schopenhauerstr. 26, 14129 Berlin Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie Troposphärische Umweltforschung Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10, D-12165 Berlin		9. Veröffentlichungsdatum 30.03.2012
		10. UFOPLAN-Nr. 206 43 200/01
		11. Seitenzahl 148
		12. Literaturangaben 78
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau		13. Tabellen und Diagramme 62
		14. Abbildungen 28
15. Zusätzliche Angaben Dieser Bericht ist der zentrale Abschlußbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“ (UFOPLAN FKZ 206 43 200/01).		
16. Zusammenfassung Im PAREST-Projekt wurden Emissionsreferenzszenarien bis 2020 für Feinstaub (PM10 und PM2.5) und die Aerosol-Vorläufer-substanzen SO ₂ , NO _x , NH ₃ und NMVOC für Deutschland und Europa erstellt. Mit Hilfe chemischer Transportberechnungen wurde gezeigt, dass die im Referenzszenario berücksichtigten gesetzlichen Maßnahmen nicht ausreichen werden, um bis zum Jahre 2020 überall in Deutschland eine Einhaltung der Grenzwerte für PM10 und NO ₂ und des Zielwertes für PM2.5 zu gewährleisten. In einem zweiten Schritt wurden für Deutschland weitere, in der bereits beschlossenen umweltpolitischen Gesetzgebung noch nicht berücksichtigte, emissionsmindernde Einzelmaßnahmen und deren Kosten identifiziert und zu Maßnahmenbündeln zusammengefasst. Die immissionsseitigen Auswirkungen der einzelnen Maßnahmenbündel wurden jeweils mit chemischen Transportberechnungen bestimmt. Auch mit diesen zusätzlichen Maßnahmenbündeln wird es aber kaum möglich sein, die PM10-, PM2.5-, NO ₂ und O ₃ -Konzentrationen bis 2020 so weit abzusenken, dass eine Einhaltung der Europäischen Luftqualitätsgrenzwerte in Deutschland unter allen meteorologischen Bedingungen gewährleistet werden kann. Am ehesten kann dieses Ziel durch die Umsetzung des Klimaschutzszenarios in Kombination mit dem Maßnahmenbündel MFR 2020 erreicht werden.		
17. Schlagwörter: Feinstaub-Reduktionsstrategien, technische, nichttechnische Maßnahmen, Kosteneffektivität, chemische Transportberechnungen		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 001524	2.	3.
4. Report Title Particle Reduction Strategies (Final Report)		
5. Author(s), Family Name(s), First Name(s) Peter Builtjes, Wolfram Jörß, Rainer Stern, Jochen Theloke		8. Report Date May 2010
6. Performing Organisation (Name, Address) TNO Earth, Environment and Life Sciences P.O.Box 80015, 3508 TA Utrecht, The Netherlands Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Heßbrühlstraße 49a, 70565 Stuttgart Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung Schopenhauerstr. 26, 14129 Berlin Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie Troposphärische Umweltforschung Carl-Heinrich-Becker-Weg 6-10, D-12165 Berlin		9. Publication Date 30.03.2012
		10. UFOPLAN-Ref. No. 206 43 200/01
		11. No. of Pages 148
		12. No. of Reference 78
7. Funding Agency (Name, Address) Umweltbundesamt (Federal Environment Agency) Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau		13. No. of Tables, Diagrams 62
		14. No. of Figures 28
15. Supplementary Notes This report is the final report of the R&D project “Particle Reduction Strategies” (UFOPLAN FKZ 206 43 200/01– „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“).		
16. Abstract : In the PAREST-project, emission reference scenarios until 2020 were constructed for fine particles (PM10 und PM2.5) as well as for the aerosol precursors SO ₂ , NO _x , NH ₃ and NMVOC, both for Germany and Europe. Chemical transport model (CTM) calculations showed that the current legislation measures included in the reference scenario are not ambitious enough to fulfil the requirements of the European Air Quality Directive (2008/50/EG) in 2020, neither for PM nor for ozone and NO ₂ . In a second step additional abatement measures, which go beyond current legislation, were identified. The emission abatement potential of these measures in relation to the reference scenario as well as their implementation costs were quantified. The air quality impact of these additional measures was also analysed with CTM applications. The results showed that even with these additional measures it will be difficult to fulfil the requirements of the European Air Quality Directive for PM10, PM2.5, NO ₂ and O ₃ under all meteorological conditions. The climate policy scenario in combination with the MFR 2020 scenario comes closest to these requirements.		
17. Keywords: Particle reduction strategies, technical, non-technical measures, cost analysis, chemical transport models		
18. Price	19.	20.

KURZDARSTELLUNG DES PAREST-PROJEKTS

Hauptziel des PAREST-Projekts (PAricle REduction STRategies) war es, weitere emissionsmindernde Maßnahmen zur Reduzierung der Feinstaubbelastung in Deutschland zu identifizieren, um die gegenwärtig noch auftretenden Überschreitungen der PM₁₀-Grenzwerte und des in der europäischen Luftqualitätsrichtlinie (2008/50/EG) festgelegten PM_{2.5}-Zielwertes zukünftig vermeiden zu können.

In einem ersten Schritt wurde geprüft, ob die immissionsseitigen Vorgaben der Europäischen Luftqualitätsrichtlinie mit der bestehenden Gesetzgebung eingehalten werden können. Dazu wurde ausgehend vom Basisjahr 2005 für Deutschland, und auch für Europa, ein Emissionsreferenzszenario für die Jahre 2010, 2015, 2020 modelliert. In diesem Szenario wurde die voraussichtliche Entwicklung der anthropogenen Aktivitäten (Endenergieverbrauch in stationären und mobilen Quellen, Lösemiteleinsatz, Wirtschafts- und Mineraldüngereinsatz) in Deutschland projiziert und die Implementierung bereits beschlossener gesetzlicher Maßnahmen bis zum Jahr 2020 berücksichtigt.

Mit Hilfe chemischer Transportberechnungen wurde gezeigt, dass die im Referenzszenario berücksichtigten gesetzlichen Maßnahmen nicht ausreichen werden, um bis zum Jahre 2020 überall in Deutschland eine Einhaltung der Grenzwerte für PM₁₀ und des Zielwertes für PM_{2.5} zu gewährleisten. Auch die Vorgaben für Ozon und NO₂ werden voraussichtlich nicht einzuhalten sein. Dies gilt insbesondere unter meteorologischen Bedingungen, die zu erhöhten Luftschadstoffkonzentrationen führen.

In einem zweiten Schritt wurden für Deutschland weitere, in der bereits beschlossenen umweltpolitischen Gesetzgebung noch nicht berücksichtigte, emissionsmindernde Einzelmaßnahmen identifiziert. Das Emissionsminderungspotenzial dieser Maßnahmen wurde einschließlich deren Umsetzungskosten (inkl. Nutzenverlusten) quantifiziert. Die Maßnahmen beschreiben eine umfangreiche Palette noch möglicher technischer und nicht-technischer Maßnahmen zur weiteren Reduzierung der Emissionen in Deutschland. Der Fokus lag auf Maßnahmen, die primäre Feinstaubemissionen (PM₁₀ und PM_{2.5}) sowie Aerosolvorläufersubstanzen mindern. Betrachtet wurde das noch mögliche Emissionsminderungspotenzial in den Sektoren Kleinf Feuerungen, Großfeuerungen, Industrieprozesse, Straßenverkehr, Andere mobile Quellen, Lösemittelanwendung und Landwirtschaft. Es wurden insgesamt 75 Einzelmaßnahmen charakterisiert und anschließend zu 30 Maßnahmenbündeln zusammengefasst. Zusätzlich wurden auch ein Klimaschutzszenario und dessen Kombination mit technischen und nicht-technischen Minderungsmaßnahmen modelliert.

Neben diesen konkreten, realistischen Maßnahmen wurden auch hypothetische Szenarien untersucht. Es wurde ein Szenario definiert, in dem in allen Holzfeuerungen (Kleinf Feuerungsanlagen) der Brennstoff Holz durch Öl ersetzt wurde. In einem weiteren Szenario wurde der Konsum von tierischem Eiweiß dem geschätzten tatsächlichen Bedarf der Bevölkerung angepasst.

Die immissionsseitigen Auswirkungen der einzelnen Maßnahmenbündel wurden jeweils mit chemischen Transportberechnungen bestimmt. Es zeigte sich, dass es allein auf Basis der definierten Maßnahmenbündel nicht möglich sein wird, die PM₁₀- und PM_{2.5}-Konzentrationen noch so weit abzusenken, dass die Grenzwerte der Europäischen Luftqualitätsrichtlinie unter allen meteorologischen Bedingungen eingehalten werden können. Dies gilt auch für das schärfste untersuchte realistische Szenario, das Klimaschutzszenario in Kombination mit dem

Maßnahmenbündel MFR 2020 („Maximum Feasible Reduction“, die über das Referenzszenario 2020 hinaus maximal mögliche Emissionsminderung).

Ein großes Potenzial zur Senkung der PM10-Immissionen bieten die NH₃-Emissionen der Landwirtschaft, die bis zum Jahre 2020 im Referenzszenario leicht zunehmen und im MFR-Szenario mit einer nur circa 17%-igen Minderung belegt werden. Die Wirkung einer NH₃-Emissionsminderung auf die PM10-Konzentrationen steigt mit zunehmender Emissionsminderungsrate erheblich, d.h. nicht-linear, an. Verstärkte Minderungen der Emissionen dieses Stoffes sind daher ein effektives Mittel zur Senkung der PM10-Konzentrationen.

Hypothetische Szenarien wie der Ersatz von holzbefeuerten Öfen durch Ölfeuerungen sowie die mit einer deutlichen Reduktion des Konsums von tierischem Eiweiß einhergehenden Produktions- und Emissionsrückgänge in der Landwirtschaft erwiesen sich in der Modellierung als sehr viel effektiver hinsichtlich einer Minderung der Feinstaubkonzentrationen als die meisten der hier betrachteten Maßnahmenbündel.

Die Einbeziehung einer Kostenanalyse zeigte, dass es unter den aus der heutigen Einschätzung als umsetzbar betrachteten Maßnahmen keine gibt, die auf der einen Seite eine hohe Kosteneffektivität besitzt (niedrige Kosten pro µg geminderter PM10-Masse) und auf der anderen Seite ein hohes absolutes PM10-Minderungspotenzial (große Auswirkung auf die Immissionen) besitzt. Dies gilt unabhängig davon, ob Nutzenverluste, d.h. Komfort- und Zeitverluste, berücksichtigt werden oder nicht.

Fazit:

Alle betrachteten Maßnahmenbündel tragen dazu bei, der zukünftigen Einhaltung der Grenzwerte ein Stück näher zu rücken. Insbesondere einige der ohne großen technischen Aufwand umsetzbaren Maßnahmen im Verkehrsbereich und der Landwirtschaft sind dabei mit geringen oder gar keinen Kosten verbunden, wenn man eventuelle Zeit- und Komfortverluste außer Acht lässt. Allein auf der Basis der hier betrachteten Maßnahmenbündel wird es aber kaum möglich sein, die PM10- und PM2.5-Konzentrationen bis 2020 so weit abzusenken, dass eine Einhaltung der Europäischen Luftqualitätsgrenzwerte in Deutschland unter allen meteorologischen Bedingungen gewährleistet werden kann. Am ehesten kann dieses Ziel durch die Umsetzung des Klimaschutzszenarios in Kombination mit dem Maßnahmenbündel MFR 2020 erreicht werden.

SHORT DESCRIPTION OF THE PAREST PROJECT

The main target of the PAREST project (PAricle REduction STRategies) was the identification of combinations of emission abatement measures to further reduce particulate matter concentrations in Germany to avoid exceedances of the PM₁₀ threshold and to fulfil the PM_{2.5} target value defined by the European Air Quality Directive (2008/50/EC).

In the first place it has been analysed, if it is possible to meet the requirements of the European Air Quality Directive with current legislation measures. To assess this, emission reference scenarios for Germany and the European background for the base year 2005 and the years 2010, 2015 and 2020 have been developed. For compiling these scenarios the future development of anthropogenic activities (final energy consumption in stationary and mobile sources, solvent use, manure management and use of mineral fertilizers) and the implementation of current legislation measures until 2020 have been taken into account.

The modelling results using an Eulerian Chemistry Transport Model (CTM) showed that the current legislation measures included in the reference scenario are not ambitious enough to fulfil the requirements of the European Air Quality Directive (2008/50/EC) in 2020, neither for PM nor for ozone and NO₂. This is especially true under meteorological conditions which lead to increased air pollutant concentrations.

In the second place additional abatement measures, which go beyond current legislation, have been identified. Then, the emission abatement potential of these measures in relation to the reference scenario as well as their implementation costs (including utility losses) have been quantified. The analysed measures cover a large spectrum of technical and non-technical options for reducing emissions in Germany. The focus was on measures, which reduce primary particulate matter emissions (PM₁₀ and PM_{2.5}) as well as aerosol precursor emissions. Potential measures in the sectors small combustion, combustion in energy industries, industrial processes, on-road transport, other mobile sources and machinery, solvent and product use as well as agriculture have been analysed. In this way 75 single measures have been characterized and aggregated to 30 combined measures. In addition, a climate policy scenario and its combination with technical and non-technical abatement options have been modelled.

Besides these „real“ abatement options also a limited number of hypothetical scenarios have been analysed. In one scenario in all small combustion installations in Germany wood combustion has been replaced by oil combustion. Another scenario adapted the animal protein consumption to the real need, which is assumed for the German population.

The impact of specific combined measures on the modelled concentrations has been calculated with a CTM. The main conclusion was that even with additional measures it would not be possible to fulfil the requirements of the Air Quality Directive for PM₁₀ and PM_{2.5} under all meteorological conditions. This conclusion also holds for the strongest “realistic” scenario analysed, the climate policy scenario in combination with the „Maximum Feasible Reduction“ (MFR) scenario.

The reduction of ammonia emissions from agricultural activities has a considerable potential for reducing PM₁₀ concentrations in Germany. Ammonia emissions in the reference scenario increase slightly until 2020 and decrease by about 17% in the MFR scenario. The impact of an ammonia reduction on PM₁₀ concentrations increases considerably (in a non-linear way) with growing emission reduction rates. Thus, emphasizing reduction of ammonia is a very effective way for reducing PM₁₀ concentrations.

Hypothetical scenarios e.g. the replacement of wood by oil in small combustion installations and the considerable reduction in consumption of animal protein, which would lead to declining production and emission quantities, have shown to be more effective to reduce particulate matter concentrations than combined measures which are based on “real” options.

A cost analysis has shown that there is no “real” measure which on the one hand has a high cost-effectiveness (low costs per μg reduced PM10 mass) and on the other hand has an absolutely high potential for reducing PM10 concentrations. The result remains the same, if utility losses (esp. comfort and time losses) are taken into account.

Conclusion:

All analysed measures and scenarios make a contribution to come closer to fulfil the future threshold requirements of the Air Quality Directive. Especially for mobile sources and the agricultural sector some measures have been identified, which can be implemented without large technical effort and are related with low or no implementation costs (here utility losses were not taken into account). But even with additional measures it will not be possible to fulfil the requirements for particulate matter (PM10 and PM2.5) under all meteorological conditions. The climate policy scenario in combination with the MFR 2020 scenario comes closest to these requirements.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
2	Zusammenfassung der wichtigsten Forschungsergebnisse.....	6
2.1	Referenzemissionen und Maßnahmenbündelung.....	6
2.2	Immissionsseitige Bewertung der Referenzemissionen und der Maßnahmenbündel	8
2.3	Bewertung der Minderungspotenziale unter Einbeziehung von Kosten	11
2.4	Aussichten und Grenzen.....	15
3	Referenzszenarien für Deutschland	17
3.1	Grundlagen der Emissionsberechnung.....	18
3.2	Das PAREST Referenzszenario	18
3.2.1	Das Energieszenario	19
3.2.2	Landwirtschaft	19
3.2.3	Straßenverkehr - Aktualisierung des Verkehrsmodells	20
3.2.4	Wiederaufwirbelung von Straßenstaub.....	22
3.2.5	Schifffahrt.....	22
3.2.6	Ziviler Flugverkehr.....	23
3.2.7	Mobile Maschinen	23
3.3	Alternative „Current Legislation“-Szenarien	24
3.3.1	MMS.....	24
3.3.2	TREMOVE 2.7.....	26
3.3.3	TREMOD 5.04	26
3.4	Die PAREST – Referenzemissionen im Basisjahr 2005.....	28
3.4.1	Die Schadstoffe im Einzelnen	28
3.4.2	Schadstoffübergreifender Vergleich.....	32
3.5	Emissionstrends bis 2020	34
3.5.1	Überblick	34
3.5.2	Referenz-Emissionsszenarien der Schadstoffe im Einzelnen.....	36
3.6	Implikationen für die Einhaltung der NEC-Richtlinie	42
4	Berechnung von räumlich hochaufgelösten Emissionen für Deutschland.....	48
5	Referenzszenarien Europäischer Hintergrund und räumliche Verteilung	55
6	Modellierung von Luftschadstoffen und immissionsseitige Bewertung der Referenzszenarien ...	61
6.1	Überblick und Auswertemethodik	61
6.2	PM10-Ursachenanalyse für das Referenzjahr 2005 auf der Basis hypothetischer Szenarien	64
6.3	Berechnung der Konzentrationsminderungen für die CLE-Emissionsreferenzen 2010, 2015 und 2020.....	67

6.4	Prognose der Luftqualität und Abschätzung von NO ₂ - und PM10-Grenzwertüberschreitungen in den Jahren 2010, 2015 und 2020 auf Basis der CLE-Emissionsreferenzen.....	70
6.5	Nationales Ziel zur Reduktion der PM2.5-Exposition	73
6.6	Analyse der Unsicherheiten/Bandbreiten in der im PAREST-Projekt verwendeten Kausalkette Emission-Transmission-Immission	74
6.7	Ballungsraumberechnungen	78
7	Maßnahmenszenarien: Emissionsminderungspotenziale und Kosten	82
7.1	Methode zur Bewertung der Einzelmaßnahmen	83
7.2	Ergebnisse der Bewertung der Einzelmaßnahmen	83
7.3	Betrachtete Maßnahmenbündel.....	94
7.4	Sensitivitätsszenarien-Klimaschutzszenarien.....	99
7.5	Hypothetische Szenarien	102
7.5.1	Verringerung des Protein-Konsums der deutschen Bevölkerung – Aufklärung der Verbraucherinnen und Verbraucher („Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“)	102
7.5.2	Ersatz aller Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen	103
8	Modellierung von Luftschadstoffen: Bewertung der Minderungspotenziale von zusätzlichen emissionsmindernden Maßnahmen.....	105
8.1	PM10 und PM2.5	105
8.2	NO ₂ und Ozon	118
9	Bewertung der Minderungspotenziale unter Einbeziehung der Kosteneffektivität	125
10	Referenzen	133
11	Zusammenstellung der PAREST-Berichte	140
12	Abbildungsverzeichnis	144
13	Tabellenverzeichnis	146

1 Einleitung

Trotz der bisher auf nationaler und internationaler Ebene eingeleiteten Emissionsminderungsmaßnahmen lässt sich aus Immissionsprojektionen ableiten, dass in Deutschland auch in Zukunft noch von erheblichen Überschreitungen der Grenzwerte für PM₁₀, insbesondere des Kurzzeitgrenzwertes, ausgegangen werden muss.

Hauptziel des PAREST-Projekts¹ (PARTicle REDuction STRategies) war es daher, in Deutschland weitere emissionsmindernde Maßnahmen zur Reduzierung der Feinstaubbelastung zu identifizieren, um die gegenwärtig noch auftretenden Überschreitungen der PM₁₀-Grenzwerte und des geplanten PM_{2.5}-Grenzwerts zukünftig vermeiden zu können.

Die Rahmenbedingungen für die Gestaltung der Luftqualitätsentwicklung in Europa, und damit auch in Deutschland, sind in der europäischen Luftqualitätsrichtlinie 2008/50/EG und der sogenannten NEC-Richtlinie² (EC, 2001) festgelegt. Im PAREST-Projekt wurden diese Rahmenbedingungen aufgenommen und in folgende Arbeitsfelder eingebettet:

- Erstellung einer europäischen und deutschen Referenzemissionsdatenbasis, die die gegenwärtige und zukünftige Emissionssituation bis 2020 in hoher räumlicher Auflösung abbildet,
- Die Identifizierung weiterer möglicher technischer und nicht-technischer Emissionsminderungsmaßnahmen, die in der gegenwärtigen, den Zeitraum bis 2020 abdeckenden Gesetzgebung noch nicht berücksichtigt sind,
- Die Berechnung der immissionseitigen Auswirkungen der entwickelten Referenzszenarien und der weiterführenden Maßnahmen mit Hilfe chemischer Transportmodelle,
- Die Bewertung der Ergebnisse und Empfehlungen für die weitere Vorgehensweise.

¹ PAREST – Particle Reduction Strategies – ist ein Forschungsvorhaben für das Umweltbundesamt, durchgeführt unter dem FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Das Forschungskonsortium besteht aus

- TNO, Institut für Umwelt und Luftqualität, Niederlande,
- Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin
- Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin (IZT)
- Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung, Universität Stuttgart (IER)
- Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V., Leipzig (IfT)
- Johann Heinrich von Thünen-Institut, (vTI) und
- IVU Umwelt GmbH, Freiburg

Das Projekt ist im Internet zu finden unter www.parest.de.

² Die NEC (National Emission Ceilings) Richtlinie von 2001 legt nationale Emissionshöchstmengen für SO₂, NO_x, NMVOC und NH₃ fest, welche die EU-Mitgliedstaaten ab 2010 einhalten müssen. Eine Novelle und Ausweitung auf Feinstaub ist in der Diskussion, ein offizieller Vorschlag liegt aber bisher (Mai 2010) nicht vor. Diskutiert wurden in diesem Zusammenhang neue, schärfere Grenzen für die bisher geregelten Schadstoffe ab 2020 sowie ein prozentuales Minderungsziel für die PM_{2.5}-Emissionen im Jahr 2020 gegenüber 2000.

Im Rahmen des PAREST-Projekts wurde zunächst geprüft, ob die emissionsseitigen (NEC-Richtlinie) und immissionsseitigen (EU-Luftqualitätsrichtlinie) Vorgaben mit der bestehenden Gesetzgebung eingehalten werden können. Dazu wurden für Deutschland verschiedene Referenzszenarien für die Jahre 2010, 2015, 2020 berechnet, ausgehend vom Basisjahr 2005. Die Hauptreferenz beschreibt für eine Reihe von Verursachergruppen das so genannte CLE-Szenario („Current legislation“) und beinhaltet die Umsetzung aller durch die bestehende Gesetzgebung bereits beschlossenen Maßnahmen bis zum Jahre 2020. Betrachtet wurden die Emissionen von PPM10 und PPM2.5 („Primary Particulate Matter“, Partikel mit einem Radius $< 10\text{ }\mu\text{m}$, bzw. $< 2.5\text{ }\mu\text{m}$), sowie SO_2 , NO_x , NH_3 und NMVOC als Aerosolvorläufersubstanzen. Darüber hinaus wurden auch CO-Emissionen auf Basis europäischer Erhebungen und damit nicht Deutschland-spezifisch mit einbezogen. Bei den mobilen Quellen (Straßenverkehr) wurden neben Auspuff- und Abriebemissionen auch Wiederaufwirbelungsprozesse berücksichtigt. Die gewählte Hauptreferenz für das PAREST-Projekt basierte im Wesentlichen auf der Emissionsdatenbank des Umweltbundesamtes (Datenstand vom 08.06.2007). Parallel dazu wurde für das Basisjahr 2005 und die Referenzjahre 2010, 2015 und 2020 auch ein europaweiter Datensatz entwickelt, in dem die länderspezifischen NEC-Projektionen basierend auf dem GAINS-NEC6-Szenario (Amman et al., 2008) berücksichtigt sind. Zusätzlich wurde für PAREST die erste systematische und vollständige Bewertung der Unsicherheiten der deutschen Emissionsinventare für primäre Partikel und die Aerosolvorläufer SO_2 , NO_x , NH_3 und NMVOC erarbeitet.

Die Berechnung der in PAREST für Deutschland modellierten Emissionen erfolgte auf Basis des so genannten Inlandsprinzips. Sie unterscheiden sich insofern von den auf Basis des Energiebilanzprinzips berechneten Emissionsmengen, als dass beim Inlandsprinzip die Emissionen aller mobilen Quellen innerhalb Deutschland erfasst werden. Emissionsmengen auf Basis des Energiebilanzprinzips erfassen mobile Quellen nur, wenn diese in Deutschland getankt haben und somit über die Energiebilanz erfasst sind.

In einem zweiten Schritt wurden für Deutschland weiterführende emissionsmindernde Einzelmaßnahmen identifiziert und deren Kosten (inkl. Nutzenverlusten) quantifiziert. Diese Einzelmaßnahmen wurden anschließend zu Maßnahmenbündeln aggregiert. Die Maßnahmen wurden zur Quantifizierung der schadstoffspezifischen Minderungspotenziale jeweils in Bezug zum CLE-Szenario für 2020 gesetzt und beschreiben eine umfangreiche Palette noch möglicher technischer und nicht-technischer Maßnahmen zur weiteren Reduzierung der Emissionen in Deutschland. Der Fokus lag auf Maßnahmen, die zur Senkung der Feinstaubbelastung beitragen können. Es wurden Maßnahmen für die Quellgruppen

- Straßenverkehr
- Andere mobile Quellen
- Landwirtschaft
- Großfeuerungsanlagen
- Kleinf Feuerungen
- Industrieprozesse sowie
- Lösemittelanwendung

entwickelt. Es wurde ein MFR (Maximum Feasible Reduction)-Szenario definiert, das die auf Basis der ausgewählten Maßnahmen über das Referenzszenario 2020 hinausgehende maximal mögliche Emissionsminderung quantifiziert. Neben den identifizierten und beschriebenen konkreten Maßnahmen wurden auch hypothetische Szenarien untersucht. Es wurde ein Szenario untersucht, in dem in allen Holzfeuerungen (Kleinf Feuerungsanlagen) der Brennstoff Holz

durch Öl ersetzt wurde. In einem weiteren Szenario wurde der Konsum von tierischem Eiweiß dem tatsächlichen Bedarf der Bevölkerung angepasst.

Die nationalen Emissionen wurden in Abhängigkeit von einer Vielzahl von Verteilparametern räumlich verteilt. Alle deutschen Emissionsdatensätze (Referenz- und Maßnahmendatensätze) wurden auf einem Gitter von $1/60^\circ$ Länge x $1/60^\circ$ Breite aufgelöst. Dies entspricht einer Auflösung von etwa $1.2 \times 1.8 \text{ km}^2$. Einen solch hochauflösenden Emissionsdatensatz hat es in Deutschland bisher nicht gegeben. Der europäische Datensatz hat eine Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite. Dies entspricht für Mitteleuropa einer Auflösung von etwa $8 \times 7 \text{ km}^2$.

Die Bestimmung der mit Hilfe von konkreten Maßnahmen erreichbaren Feinstaubminderungspotenziale kann nur mit chemischen Transportmodellen vorgenommen werden, da Feinstaub (PM10) zum Teil aus direkt emittierten Partikeln und zum Teil aus in der Atmosphäre gebildeten Partikeln, den sog. sekundären Aerosolen besteht. Die sekundären Aerosole werden erst während des Transports über komplexe physikalisch/chemische Zusammenhänge aus den gasförmigen Vorläuferstoffen Ammoniak (NH_3), Schwefeldioxid (SO_2) und Stickoxiden (NO_x) gebildet und können über weite Strecken transportiert werden. Dieser Umstand wurde in den PAREST-Ausbreitungsrechnungen berücksichtigt.

Die immissionsseitige Bewertung der zukünftigen Emissionsentwicklung und der weiterführenden Maßnahmenbündel erfolgte hauptsächlich mit dem am Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin mit Unterstützung des Umweltbundesamts entwickelten REM-CALGRID-Modell (RCG). Andere Modelle wie das LOTOS-EUROS-Modell³ aus den Niederlanden und das COSMO-MUSCAT-Modell⁴ des Leibniz-Instituts für Troposphärenforschung wurden zur Ergebnisabsicherung und zur Bestimmung einer Ergebnisbandbreite für ausgewählte Szenarien eingesetzt. Zur Beurteilung der Genauigkeit der Modellergebnisse erfolgte ein Vergleich aller berechneten PM10 und NO_2 Konzentrationen mit Messungen in Deutschland. Für eine weiterführende Untersuchung der Unsicherheit der Modellergebnisse wurden für die RCG-Simulationen auch unterschiedliche meteorologische Treiber und unterschiedliche meteorologische Referenzjahre verwendet. Zusätzlich erfolgte eine Abschätzung des Einflusses der Emissionsunsicherheit auf die berechneten Konzentrationen.

Die Ausbreitungsrechnungen erfolgten in der europäischen Skala in einer Auflösung von 0.5° Länge und 0.25° Breite, in der deutschen Skala in einer Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite. Die Luftkonzentrationen aller wesentlichen Schadstoffe wurden in stündlicher Auflösung jeweils für ein ganzes Jahr berechnet.

Die PAREST-Berechnungen in der Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite präsentieren weitgehend den regionalen, in großen Ballungsräumen auch den urbanen Hintergrund. Die Bestimmung des Beitrags lokaler Emissionen zur lokalen Belastung war nicht das primäre Ziel der durchgeführten Modellanwendungen. Dazu sind höher auflösende Berechnungen notwendig. Grenzwertüberschreitungen von PM10 und NO_2 treten aber überwiegend an verkehrsnahen Stationen auf und werden damit durch die Beiträge lokaler Emissionen ausgelöst. Damit können die in PAREST berechneten Hintergrundkonzentrationen nicht direkt für die Abschätzung von Grenzwertüberschreitungen herangezogen werden. Sie werden daher auch nur benutzt, um die zeitliche Entwicklung des regional-urbanen Hintergrunds abzuschätzen. Die eigentliche Abschätzung der zukünftig noch auftretenden Grenzwertüberschreitun-

³ <http://www.lotos-euros.nl/>

⁴ http://projects.tropos.de/cosmo_muscat/

gen an verkehrsnahen Stationen erfolgte mit Hilfe einer Methodik, die von der Messung ausgeht und dieser die aus der lokalen Emissionsprognose (Entwicklung der Verkehrsemissionen) und der Hintergrundprognose berechneten Immissionsänderungen aufträgt.

Europaweite und deutschlandweite Ausbreitungsrechnungen mit dem RCG-Modell wurden für alle Referenzjahre (2005, 2010, 2015 und 2020) und für alle Emissionsreferenzen durchgeführt. Zur Maßnahmenanalyse, d.h. um die Auswirkung der ausgewählten Maßnahmenbündel konzentrationsseitig zu untersuchen, wurden auch alle identifizierten Maßnahmen mit Hilfe des RCG-Modells modelliert und analysiert.

Darüber hinaus wurden mit dem RCG-Modell auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt, in denen die Emissionen der betrachteten Luftschadstoffe und Verursachergruppen in systematischer Weise prozentual geändert wurden. Diese Berechnungen dienten zur Analyse und zur Quantifizierung eines für jeden Schadstoff und jede Verursachergruppe maximal erreichbaren Minderungspotenzials.

Höheraufgelöste Modellrechnungen mit Maschenweiten von circa 1.2 km x 1.8 km wurden für drei Ballungsräume (Berlin, München und das Ruhrgebiet) sowohl mit der PAREST-Emissionsdatenbasis als auch mit lokalen Emissionen durchgeführt. Diese Berechnungen sollten Aufschluss darüber liefern, welche Konzentrationsunterschiede zu erwarten sind, wenn ein nationaler „top-down“-Emissionsdatensatz gegen einen lokalen „bottom-up“-Emissionsdatensatz ausgetauscht wird. Außerdem wurde untersucht, wie weit sich die Verwendung höher auflösender Rechengitter auf die Konzentrationen auswirkt.

Die Auswertung der Maßnahmenberechnungen auf Basis der RCG-Ergebnisse basierte hauptsächlich auf den Jahresmittelwerten der Stoffe PM₁₀ und PM_{2.5}. Zusätzlich betrachtet wurden aber auch die Auswirkungen auf die Ozon- und NO₂-Jahresmittelwerte sowie auf weitere Ozon-Kenngrößen. Der Schwerpunkt der Auswertung lag im relativen Vergleich der durch die einzelnen Maßnahmenbündel zusätzlich erreichbaren Immissionsminderungen. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe einer flächenhaften Visualisierung für Deutschland und mit einem von der Bevölkerungsdichte abhängigen Bewertungsschema, um die Effektivität von Maßnahmen differenziert für ländliche Gebiete und Ballungsräume beurteilen zu können.

Dieser Bericht ist folgendermaßen aufgebaut: Eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse des PAREST-Projekts erfolgt in Kapitel 2. In Kapitel 3 wird die Berechnung der Emissionen der Referenzszenarien von SO_x, NO_x, NH₃, NMVOC, primärem PM₁₀ und PM_{2.5} für das Basisjahr 2005 und die Jahre 2010, 2015 und 2020 für Deutschland beschrieben. Dabei wird auch auf die identifizierten Unterschiede zwischen dem vom UBA verwendeten TREMOD-Modell (Knörr et al., 2005) zur Berechnung der Verkehrsemissionen und dem von der Europäischen Kommission verwendeten REMOVE-Modell (De Ceuster et al., 2007) eingegangen. Darüber hinaus werden hier die Ergebnisse der Quantifizierung der Unsicherheiten der Emissionsdatenbasis beschrieben. Kapitel 4 beschreibt Methodik und Ergebnis der räumlichen Verteilung der anthropogenen Emissionen in Deutschland. Kapitel 5 beschreibt die europäische Emissionsdatenbasis.

In Kapitel 6 wird das Chemische Transport Modell RCG und die Ergebnisse seiner Anwendungen dargestellt. Die Modellergebnisse für das Basisjahr 2005 und der Vergleich mit Messungen werden präsentiert. Außerdem wird eine Sensitivitätsstudie zur Ursachenanalyse gezeigt. Der Fokus liegt dabei auf den PM₁₀- und PM_{2.5}-Konzentrationen inklusive einer Analyse der Unsicherheiten (Emissionsunsicherheiten) und der Ergebnisbandbreite (Anwendung anderer Modelle, anderer meteorologischer Treiber). Neben dem Basisjahr 2005 werden auch

die Ergebnisse der Referenzjahre 2010, 2015 und 2020 präsentiert. Zudem wird hier gezeigt, dass im Jahre 2015 und 2020 auf Basis des CLE-Szenarios noch mit Grenzwertüberschreitungen bei PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ und Ozon zu rechnen ist.

In Kapitel 7 werden die identifizierten Maßnahmen beschrieben. Dazu wird jeweils das maßnahmenspezifische Minderungspotenzial in den einzelnen Referenzjahren gegenüber der CLE-Referenz quantifiziert einschließlich der maßnahmenspezifischen Kosten. Beispielfhaft werden einige Szenarien genauer betrachtet, z.B. für Kleinf Feuerungen und das hypothetische Szenario „Reduzierter Fleischkonsum“. In Kapitel 8 werden die auf Basis der verschiedenen Maßnahmen szenarien modellierten Konzentrationen für das Jahr 2020 im Hinblick auf die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmenbündel zur Minderung der PM₁₀- und PM_{2.5}-Konzentrationen analysiert. Die Immissionsminderungspotenziale verschiedener Einzelmaßnahmen werden gezeigt und so eine Rangfolge der Effektivität bestimmt. Kapitel 9 verknüpft die durch das jeweilige Maßnahmenbündel erzielte immissionsseitige Minderung mit den Kosten der Maßnahmen. Dabei wird für PM_{2.5} und PM₁₀ jeweils ein Ranking ohne und mit Berücksichtigung von nutzenverlustbedingten Kosten vorgenommen. Auf Basis der quantifizierten Kosteneffektivitäten wird eine Bewertung der Maßnahmenbündel vorgenommen und eine Empfehlung für eine Reduktionsstrategie gegeben.

Das F&E-Vorhaben hatte eine Laufzeit von März 2007 bis Juli 2010. Detaillierte Ergebnisse des PAREST-Projektes werden in über 30 Berichten beschrieben, deren Liste am Ende dieses Berichtes in Kapitel 11 zu finden ist.

Anmerkung:

Im Text wird der Punkt als Dezimaltrennzeichen verwendet.

2 Zusammenfassung der wichtigsten Forschungsergebnisse

2.1 Referenzemissionen und Maßnahmenbündelung

Referenzemissionen 2005-2020 in Deutschland

Im PAREST-Projekt wurde basierend auf dem im Umweltbundesamt implementierten System der Emissionsberichterstattung und auf einschlägigen sektoralen Studien und Modellen ein Referenzszenario für die Emissionen an Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2.5}) sowie für die Aerosolvorläufer SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC bis 2020 erstellt. Die PAREST-Referenz ist vom Typ her ein CLE-Szenario (Current Legislation), das einen möglichen Emissionspfad beschreibt, der ohne neu zu beschließende Maßnahmen zur Emissionssenkung plausibel wäre und bereits beschlossene gesetzliche Maßnahmen berücksichtigt. Die im PAREST-Projekt als Input für die Ausbreitungsrechnungen benutzten Emissionsdatensätze wurden nach dem Inlandsprinzip⁵ berechnet. Die PAREST-Referenz wurde ergänzt durch drei weitere CLE-Szenarien, die sich durch abweichende Annahmen (und Aktualität) im Energieszenario bzw. im Verkehrsbe- reich auszeichnen. Die Trends in der Entwicklung der Emissionen bis 2020 sind im Vergleich der verschiedenen Szenarien recht robust, bis auf NO_x, wo es größere Unsicherheiten über die Referenz-Entwicklung der Emissionen gibt (vgl. Tabelle 3-11).

Zusätzlich wurden systematisch die Unsicherheiten der Emissionsdatenbasis 2005 quantifi- ziert (Abbildung 3-9). Im Vergleich der Qualität der betrachteten Schadstoffinventare sind diejenigen für PM₁₀ und NO_x am unsichersten, während die Inventare für SO₂ und NMVOC die höchste Qualität haben. Zum Vergleich: Die Qualität des deutschen Treibhausgasinventars (in der Summe über CO₂ und die anderen Treibhausgase) wird vom Umweltbundesamt für 2007 mit +/-9.7% (UBA 2010) angegeben, also in derselben Größenordnung wie für SO₂ und NMVOC in dieser Studie.

Zur Frage der Einhaltung der Emissionshöchstmengen (NEC) der NEC-Richtlinie (EC, 2001) für 2010 (Tabelle 3-24) ergeben die betrachteten CLE-Szenarien ein einheitliches Bild für SO₂ (deutliche Übererfüllung der NEC) sowie für NH₃ und NMVOC (Verfehlen der NEC). Für NO_x ergibt sich ein sehr uneindeutiges Bild: Auf Basis der PAREST-Emissionsreferenz mit dem Verkehrsmodell TREMOD 4.17M (siehe Kapitel 3.2.3) wird die NO_x-Emissions- höchstmenge genau erreicht, auf Basis des weiterführenden „Mit Maßnahmen Szenarios (MMS), das bereits beschlossene Klimaschutzmaßnahmen mit bilanziert, leicht unterschritten. Bei Verwendung des europäischen Verkehrsmodells TREMOVE 2.7 oder der fortgeschriebe- nen TREMOD-Version 5.04 kann die NEC-Richtlinie für NO_x dagegen nicht eingehalten werden.

Es muss hier aber betont werden, dass die für 2010 berechneten Emissionen NICHT auf aktu- ellen statistischen Daten zu emissionsverursachenden Tätigkeiten beruhen, sondern ein Szena- rio aus der Sicht des Basisjahres 2005 darstellen. In all diesen Betrachtungen sind z.B. etwa- ige Auswirkungen der seit Ende 2008 zu beobachtenden Wirtschaftskrise nicht enthalten.

⁵ „Inlandsprinzip“ bedeutet, dass für mobile Quellen abgeschätzt wird, wie viel Treibstoff von Fahrzeugen auf deutschem Territorium verbraucht wurde und wie viele Emissionen daraus innerhalb Deutschlands entstanden sind. Im Gegensatz zum Inlandsprinzip ist in der internationalen Emissionsberichterstattung das Energiebilanz- prinzip üblich, das nicht auf dem Verbrauch sondern auf dem Verkauf von Treibstoff basiert, d.h. wird dagegen nicht der Verbrauch des Treibstoffs innerhalb Deutschlands bilanziert sondern der Verkauf innerhalb Deutsch- lands.

Emissionen 2005-2020 in Europa

Für die Erstellung der Referenzemissionsdatensätze für die Luftschadstoffe SO₂, NH₃, NMVOC, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5} und CH₄ für die Jahre 2010, 2015 und 2020 wurde die Emissionsdatenbasis auf Grundlage der Berichte zum IIASA GAINS NEC 6 Szenario (Amann et al., 2008) verwendet, für das Basisjahr 2005 dagegen hauptsächlich die offiziell berichteten Emissionsmengen der Länder.

Räumliche Verteilung der Emissionsdatensätze

Für Deutschland wurden Emissionsdatensätze für alle Referenzjahre und das Basisjahr auf Grundlage eines am IER entwickelten Gridding-Tools in einer räumlichen Auflösung von 1'x1' bereitgestellt. Die europäischen Emissionsdatensätze wurden in einer Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite auf Grundlage des TNO-Gridding-Tools bereitgestellt.

Emissionsdatensätze für die Ballungsräume

Für ausgewählte Ballungsräume (Berlin, Bayern und das Ruhrgebiet) wurden Emissionsdatensätze für das Jahr 2005 auf Grundlage regionaler Emissionserhebungen aus Berlin, Bayern und Nordrhein-Westfalen aufbereitet. Zum Teil konnten für diese Gebiete erhebliche Abweichungen vom PAREST-Datensatz sowohl bezüglich der Emissionsmengen als auch deren räumlicher Verteilung identifiziert werden.

Entwicklung von Maßnahmen

Es wurden insgesamt 30 Maßnahmenbündel, die insgesamt 75 Einzelmaßnahmen in unterschiedlicher Weise miteinander kombinieren, hinsichtlich ihrer emissionsmindernden Wirkung und ihrer Kosten untersucht. Dabei wurden Maßnahmen ausgewählt, die den Sektoren Kleinf Feuerungen, Großfeuerungsanlagen, Industrieprozesse, Straßenverkehr, Andere mobile Quellen, Lösemittelanwendung und Landwirtschaft zuzuordnen sind. Die untersuchten Maßnahmenbündel wurden sowohl sektorweise als auch sektorübergreifend aggregiert. Die aufgrund der ausgewählten Maßnahmen maximal im Jahr 2020 erreichbaren Minderungen gegenüber dem Referenzszenario sind in Tabelle 2-1 sektor- und schadstoffweise dargestellt.

Es wurden den Einzelmaßnahmen und Maßnahmenbündeln jeweils Kosten einmal unter Berücksichtigung von Nutzenverlusten - insbesondere von Zeitverlusten - und einmal ohne Berücksichtigung von Nutzenverlusten zugeordnet.

Darüber hinaus wurde das Klimaschutzszenario „MWMS“ (=> Mit weiteren Maßnahmen) aus „Politikszenerien IV“ als zusätzliches Sensitivitätsszenario modelliert. Es wurden 3 weitere Sensitivitätsszenarien modelliert, in denen das „MWMS“-Szenario mit besonders attraktiven Maßnahmenbündeln aus PAREST kombiniert wurde. Ziel dieser Sensitivitätsszenarien war es, zu untersuchen, wie sich die Kombination von Klimaschutzszenarien mit Maßnahmen zur Verminderung der Luftverschmutzung immissionsseitig auswirkt.

Es wurden außerdem hypothetische Maßnahmen bewertet: das Szenario „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“ sowie ein Szenario, in dem alle Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen ausgetauscht wurden.

Tabelle 2-1: Maximal durch die untersuchten Maßnahmen erreichbaren Minderungen gegenüber der Referenz für 2020 in kt/a

Sektor	Anzahl der Maßnahmen	NO _x	PM ₁₀	PM _{2.5}	NH ₃	SO ₂	NM _{VOC}
Referenzemissionen (2020)		904	228	101	609	455	1381
Maximale Minderung		126 14%	24 11%	16 11%	102 17%	110 24%	95 7%
Kleinf Feuerungen	3	12.3	9.9	9.2			
Großfeuerungen	8	37.0	3.5	3.1		88.3	
Industrie	10	30.1	4.8	2.1	1.1	21.6	
Straßenverkehr	12	22.0	2.7	0.7	0.2	0.07	7.0
Sonstiger Verkehr	10	24.2	0.5	0.5	0.2	0.4	15.4
Lösemittel	6						72.7
Landwirtschaft	13		2.9	0.4	100		

2.2 Immissionsseitige Bewertung der Referenzemissionen und der Maßnahmenbündel

Die folgende immissionsseitige Bewertung bezieht sich auf Deutschland und beruht auf Anwendungen des chemischen Transportmodells REM-CALGRID (RCG) in einer Gitterauflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite (circa 8 km x 7 km).

PM₁₀-Ursachenanalyse für die Emissionsreferenz 2005:

- In Ballungsgebieten ist die direkte Minderung der PM₁₀-Emissionen die effektivste Maßnahme zur Absenkung der PM₁₀-Konzentrationen, die Hauptverursacher sind Industrie und Straßenverkehr,
- In ländlichen Gebieten ist das Minderungspotenzial der PM₁₀-Emissionen und der gasförmigen Vorläuferemissionen etwa gleich groß, der Hauptverursacher ist die Landwirtschaft gefolgt vom Straßenverkehr,
- Das PM₁₀-Minderungspotenzial pro Kilotonne geminderter Vorläuferemissionen (außer NM_{VOC}), in besonderem Ausmaße das von NH₃, ist abhängig von der Reduktionsmenge und steigt mit wachsender Minderungs menge.

- Bei einer 25%-igen Emissionsminderung ist das PM10-Minderungspotenzial einer Kilotonne PM2.5-Emissionen circa 5mal höher als das PM10-Minderungspotenzial einer Kilotonne NH₃-Emissionen.

Mit der CLE-Emissionsreferenz von 2005 bis 2020 erreichbare Immissionsminderungen (auf der Basis von TREMOD 4.17M):

PM10

- ländliche Gebiete: mittlere Minderung von circa 3 µg/m³
- Ballungsräume: mittlere Minderung von circa 4 µg/m³

NO₂

- ländliche Gebiete: mittlere Minderung von circa 6 µg/m³
- Ballungsräume: mittlere Minderung von circa 12 µg/m³

Die im PAREST-Projekt zur Berechnung der Verkehrsemissionen benutzte Methodik (TREMOD 4.17M, mit IER-Modifikationen, siehe Kapitel 3.2.3) liefert für die CLE-Referenz 2020 niedrigere NO_x-Verkehrsemissionen als das europäische Verkehrsmodell TREMOVE 2.7 oder die neuere TREMOD-Version 5.04. Dementsprechend unterschiedlich fallen die Beiträge der Verkehrsemissionen zu den prognostizierten NO₂-Konzentrationen der Referenz 2020 aus:

- TREMOD 4.17M : 23% (ländliche Regionen) bis 27% (Ballungsgebiete)
- TREMOD 5.04 : 31% (ländliche Regionen) bis 35% (Ballungsgebiete)
- TREMOVE 2.07 : 41% (ländliche Regionen) bis 42% (Ballungsgebiete)

Die starke Abnahme der Verkehrsemissionen bis 2020 auf Basis von TREMOD 4.17M muss aus heutiger Sicht als zu optimistisch beurteilt werden. Die Rolle des Straßenverkehrs als eines möglichen Kandidaten für weitere Minderungsmaßnahmen zur Senkung der NO₂-Konzentrationen über die CLE-Referenz 2020 hinaus wird daher mit TREMOD 4.17M geringer bewertet als mit den Verkehrsmodellen TREMOD 5.04 und TREMOVE 2.7. Für PM10 sind die Unterschiede in der Summe der Emissionen aber gering, so dass die Wahl des Verkehrsmodells nur einen untergeordneten Einfluss auf das PM10-Minderungspotenzial des Verkehrs hat.

Über die CLE-Emissionsreferenz 2020 hinaus erreichbare PM10-Immissionsminderungen:

- Das MFR-Szenario 2020 führt zu einer Erhöhung der durch die CLE-Emissionsreferenz 2020 erreichbaren PM10-Minderungen von circa 22% in ländlichen Gebieten und circa 28% in Ballungsräumen (bezogen auf 2005).
- Das MFR-Szenario „Kleinfeuerungsanlagen“ ist in den Ballungsräumen, das MFR-Szenario „Landwirtschaft“ in den ländlichen Regionen die wirksamste Maßnahme zur weiteren Senkung der PM10-Immissionen.

- Bei den Einzelmaßnahmen stellt die Novellierung der 1. BImSchV (Kleinfeuerungsanlagen) das höchste Potenzial zur weiteren Senkung der PM10-Immissionen sowohl in ländlichen Regionen als auch in den Ballungsräumen.
- Die hypothetischen Szenarien „Reduzierter Fleischverbrauch“ und „Ersetzung von Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen bei Kleinverbrauchern“ haben ein deutlich höheres PM10-Minderungspotenzial als die wirksamste Einzelmaßnahme (Novellierung der 1. BImSchV).
- Das Klimaschutzszenario MWMS hat in ländlichen Regionen eine circa 14% höhere PM10-Minderungskapazität, in Ballungsräumen eine circa 19% höhere Minderungskapazität als die CLE-Emissionsreferenz 2020.
- Das Klimaschutzszenario MWMS+MFR2020 hat in ländlichen Regionen eine circa 32% höhere PM10-Minderungskapazität, in Ballungsräumen ein circa 40% höheres Minderungspotenzial als die CLE-Emissionsreferenz 2020.

Über die CLE-Emissionsreferenz 2020 hinaus erreichbare NO₂-Immissionsminderungen:

- Das MFR-Szenario 2020 führt zu einer Erhöhung der durch die CLE-Emissionsreferenz 2020 erreichbaren NO₂-Minderungen von circa 10% in ländlichen Gebieten und circa 17% in Ballungsräumen.
- Bei den MFR-Szenarien ist das MFR-Szenario „Sonstiger Verkehr“ in den Ballungsräumen, das MFR-Szenario „Straßenverkehr“ in den ländlichen Regionen die wirksamste Maßnahme zur weiteren Senkung der NO₂-Immissionen.
- Bei den Einzelmaßnahmen stellt die Maßnahme M44 „Ökodesign“ (Kleinfeuerungsanlagen) das höchste Potenzial zur weiteren Senkung der NO₂-Immissionen sowohl in ländlichen Regionen als auch in den Ballungsräumen. An zweiter Stelle folgt die Maßnahme M47, Novellierung der IED-Richtlinie für Großfeuerungsanlagen, UBA-Entwurf.
- Das Klimaschutzszenario MWMS hat in ländlichen Regionen eine circa 13% höhere NO₂-Minderungskapazität, in Ballungsräumen eine circa 21% höhere Minderungskapazität als die CLE-Emissionsreferenz 2020.
- Das Klimaschutzszenario MWMS+MFR2020 hat in ländlichen Regionen eine circa 20% höhere NO₂-Minderungskapazität, in Ballungsräumen eine circa 30% höhere Minderungskapazität als die CLE-Emissionsreferenz 2020.

Grenzwertüberschreitungen:

- Es ist davon auszugehen, dass die dem CLE-Emissionsszenario zugrundeliegenden Maßnahmen nicht ausreichen werden, um bis zum Jahre 2020 überall in Deutschland eine Einhaltung der hier betrachteten Grenzwerte für Ozon, PM10 und NO₂ und des Zielwerts für PM2.5 zu gewährleisten. Dies gilt insbesondere unter meteorologischen Bedingungen, die zu einem immissionsklimatologisch ungünstigen Jahr führen.

- Die Emissionen müssen weit über das Maß der CLE-Emissionsreferenz 2020 hinaus gemindert werden, um auch an hoch belasteten Verkehrsstationen eine Überschreitung der zulässigen 35 Tage mit einem PM₁₀-Tagesmittelwert $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ zu vermeiden. Unter extrem ungünstigen meteorologischen Bedingungen, wie sie z.B. im Jahre 2003 herrschten, reichen sogar nicht einmal die Minderungen des Klimaschutzszenarios MWMS zuzüglich des MFR-Szenarios 2020 aus, um die Einhaltung des PM₁₀-Kurzfristgrenzwertes an allen Stationen zu gewährleisten. Es kann davon ausgegangen werden, dass meteorologische Bedingungen wie im Jahre 2003 wegen der Klimaerwärmung in Zukunft häufiger auftreten werden.

Ballungsraumberechnungen:

- Die Verwendung eines lokalen „Bottom-up“-Emissionsdatensatzes führt im Vergleich mit dem in PAREST-Projekt erstellten „Top-down“-Emissionsdatensatz lokal zu beträchtlichen Konzentrationsunterschieden. Aus einem Vergleich der Ergebnisse mit den wenigen zur Verfügung stehenden Beobachtungen lässt sich aber nicht bestimmen, ob einer der beiden Datensätze zu einer besseren Abbildung der Beobachtungen führt.
- Die im PAREST-Projekt für die Auswertung der Emissionsszenarien gewählte Gittergröße von circa $8 \times 7 \text{ km}^2$ ist für mittlere Betrachtungen, d.h. für Mittelwerte über Ballungsräume ausreichend, um größere Stadtgebiete angemessen abzubilden. Für detaillierte Betrachtungen, die die durch die Emissionsverteilung vorgegebenen Immissionsstrukturen des städtischen Hintergrunds erfassen wollen, sind aber Modellrechnungen mit einer Auflösung von mindestens $2 \times 2 \text{ km}^2$, besser noch $1 \times 1 \text{ km}^2$ notwendig.

Unsicherheiten:

- Insgesamt ergibt sich für die berechneten Jahresmittelwerte infolge der Unsicherheiten in der Emissionsdatenbasis eine PM₁₀-Bandbreite von circa -10% bis +15% und eine NO₂-Bandbreite von circa -10% bis +25%.
- Die Bandbreiten der Immissionsergebnisse infolge der Anwendung verschiedener Modelle umfasst für PM₁₀ den Bereich von -35% bis +30%, für NO₂ den Bereich von -15% bis +35%, jeweils bezogen auf das Ensemble-Mittel. Sie sind damit größer als die Bandbreiten verursacht durch die Unsicherheiten in den Emissionsdaten (ermittelt mit einer Modellanwendung).
- Die Bandbreiten sind bei einer relativen Auswertung der Modellergebnisse insgesamt deutlich geringer als bei einer absoluten Auswertung.

2.3 Bewertung der Minderungspotenziale unter Einbeziehung von Kosten

Die mit dem RCG-Modell ermittelte Effektivitätsrangfolge der Maßnahmenbündel zur weiteren Senkung der PM₁₀- und PM_{2.5}-Konzentrationen über die CLE-Referenz 2020 hinaus (siehe Kapitel 8) bezieht sich ausschließlich auf die Wirkung der untersuchten Maßnahmenbündel auf die Konzentrationen. Zusätzlich zu dieser Rangfolge wurden auch Rangfolgen auf Basis der abgeschätzten Maßnahmenkosten mit und ohne Berücksichtigung von Nutzenver-

lusten⁶ erstellt. Wenn lediglich die Kosten ohne Berücksichtigung von Nutzenverlusten betrachtet werden, sind die im Folgenden beschriebenen Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel kostenneutral oder führen sogar zu Kosteneinsparungen.

Maßnahmenbündel, die eine Kostenersparnis bringen, sind insbesondere Kombinationen hauptsächlich nicht-technischer Maßnahmen in den Sektoren

- Landwirtschaft,
- Straßenverkehr und
- Sonstige Mobile Quellen

Zur Kostenersparnis tragen dabei ausschließlich Maßnahmen aus dem Sektor Straßenverkehr bei. Die Kostenersparnis basiert hier auf einer Kraftstoffeinsparung aufgrund von:

- Festlegung eines Tempolimits auf Autobahnen und Außerortsstraßen (Maßnahmen V003 und V004)
- Angleichung der Mineralölsteuer für Dieselmotoren (Maßnahme V005)
- Verlagerung von Innerortsfahrten auf das Fahrrad (Maßnahme V008) und
- Förderprogrammen zum kraftstoffsparenden Fahren (Maßnahme V009)

Darüber hinaus wurden vier Maßnahmenbündel identifiziert, die hinsichtlich ihrer Kosteneffektivität kostenneutral sind. Dabei handelt es sich um folgende Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel, die im Folgenden in Einzelmaßnahmen aufgelöst werden:

- Nutzungsbeschränkungen für hochemittierende Baumaschinen in innerstädtischen Gebieten (Maßnahme MM005)
- Differenzierung der Trassenpreise im Schienenverkehr (Maßnahme MM007)
- Kosteninternalisierung im Flugverkehr (Kerosinsteuer und Einbeziehung in den Emissionshandel) (Maßnahme MM009)
- Emissionsabhängige Landeentgelte im Flugverkehr (Maßnahme MM010)
- Veränderung der Ausbringtechnik und Verringerung der Zeit bis zur Einarbeitung von Düngern (Maßnahme A009)

Insgesamt können mit diesen Maßnahmen mindestens 9% der PM10-Emissionsminderung bzw. 4% der PM2.5-Emissionsminderung des MFR-Szenarios, d. h. des mit allen identifizierten Maßnahmen maximal erreichbaren Minderungspotenzials erreicht werden.

Mit diesen Maßnahmen, die auf Grundlage der im PAREST-Projekt durchgeführten Kostenschätzungen insgesamt zu Kosteneinsparungen in der Größenordnung von 1Mrd. € pro Jahr führen, könnten insgesamt circa 15% des mit allen Maßnahmen erreichbaren PM10-Immissionsminderungspotenzials umgesetzt werden.

Auch das hypothetische Szenario M15 „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“ hat keine technischen Kosten.

⁶ Nutzenverluste wurden hier weitgehend als Komfort- und Zeitverluste definiert. Nicht berücksichtigt wurden externe Kosten oder Kostenverringerungen wie sie z.B. durch Änderung der Lärmbelastung oder Änderung des Unfallrisikos durch verkehrsbezogene Maßnahmen entstehen können.

Unter Berücksichtigung von Nutzenverlusten sind die fünf kosteneffektivsten Maßnahmenbündel:

- Die Veränderung der Ausbringtechnik und Verringerung der Zeit zur Einarbeitung,
- Kombination von Anpassung der Düngermengen an den Düngerbedarf und verringerter Einsatz von Harnstoffdüngern,
- Festlegung eines Staubgrenzwertes von $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ im Tagesmittel sowohl für bestehende als auch für neue kohlegefeuerte Großfeuerungsanlagen > 50 MW
- Abdeckung der Wirtschaftsdüngerlager
- Implementierung von Abluftreinigungsanlagen in der Schweinehaltung

Die Kosten dieser Maßnahmen liegen unter Einbeziehung der Nutzenverluste in der Größenordnung von 56 Mio. € pro Jahr. Das maximal mögliche PM10-Immissionsminderungspotenzial (d.h. das Potenzial des MFR-Szenarios M20) kann damit zu circa 27% ausgeschöpft werden, das PM2.5-Immissionsminderungspotenzial zu ca. 22%.

Die kostengünstigsten Maßnahmen sind aber nicht notwendigerweise die Maßnahmen, die die größten Effekte im Sinne einer weiteren Minderung der PM10-Immissionen aufweisen. Aus der über die Ausbreitungsrechnung ermittelten Rangfolge kann zur weiteren Senkung der PM10-Immissionen folgende Rangfolge der 6 wichtigsten Maßnahmen abgeleitet werden (Kapitel 8):

Deutschland (gesamt):

1. M45: Kleinfeuerungsanlagen, Novellierung der 1. BImSchV, (30% des Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M47: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, UBA-Entwurf, (18% des Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M46: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, (17% des Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M43: Landwirtschaft, MFR-Tierhaltung, (13% des Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M73: Landwirtschaft, Maßnahme A007, „Einsatz von Abluftreinigungen in der Schweinehaltung“ (7% des Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
6. M51: Landwirtschaft, Maßnahme A012, „Kombination von Dünger nach Empfehlung und verringerter Einsatz von Harnstoff-Dünger“, (7% des Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)

Ländliche Regionen:

1. M45: Kleinfeuerungsanlagen, Novellierung der 1. BImSchV, (23% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M47: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, UBA-Entwurf, (22% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M46: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, (20% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M43: Landwirtschaft, MFR-Tierhaltung, (17% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M73: Landwirtschaft, Maßnahme A007, „Einsatz von Abluftreinigungen in der Schweinehaltung“ (10% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)

6. M51: Landwirtschaft, Maßnahme A012, „Kombination von Dünger nach Empfehlung und verringerter Einsatz von Harnstoff-Dünger“, (9% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)

Ballungsgebiete:

1. M45: Kleinf Feuerungsanlagen, Novellierung der 1. BImSchV, (33% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M47: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, UBA-Entwurf, (16% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M46: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, (15% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M43: Landwirtschaft, MFR-Tierhaltung, (9% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M52: Großfeuerungsanlagen, Absenkung des Staubemissionsgrenzwertes, (6% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)
6. M51: Landwirtschaft, Maßnahme A012, „Kombination von Dünger nach Empfehlung und verringerter Einsatz von Harnstoff-Dünger“, (6% des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20)

Diese Maßnahmen, bei denen keine Kosten durch Nutzenverluste entstehen, stellen ohne Doppelzählung (M46 und M47 zielen auf dieselbe Emittentengruppe ab) circa 80% des mit dem MFR-Maßnahmenbündel M20 erreichbaren maximalen PM10-Immissionsminderungspotenzials in ländlichen Regionen und circa 70% des maximalen PM10-Immissionsminderungspotenzials in Ballungsräumen. Die Kosten für diese Maßnahmen liegen bei circa 1.2 Milliarden € (circa 70% der Gesamtkosten des MFR-Szenarios M20 von 1.8 Milliarden €, ohne Nutzenverluste).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass es keine Maßnahme gibt, die auf der einen Seite geringe Kosten verursacht und auf der anderen Seite ein großes PM10-Minderungspotenzials besitzt. Dies gilt unabhängig davon, ob Nutzenverluste berücksichtigt werden oder nicht.

Bei einer kombinierten kosten-immissionsbezogenen Bewertung der Maßnahmen ist es insbesondere für eine Reihe der nicht-technischen Maßnahmen von grundsätzlicher Bedeutung, ob Nutzenverluste, die hier weitgehend Komfort- und Zeitverluste sind, in die Betrachtung mit einbezogen werden oder nicht.

Ein Großteil der hier diskutierten nicht-technischen Maßnahmen ist im Sinne der hier vorgenommenen Kostenschätzung kostenneutral oder führt sogar zu Kosteneinsparungen wenn Komfort- und Zeitverluste nicht berücksichtigt werden. So könnte allein durch den angepassten Konsum von tierischem Eiweiß (Maßnahmenbündel M15) ein zusätzliches, im MFR-Szenario nicht enthaltenes PM10-Immissionsminderungspotenzial freigesetzt werden, das im Mittel über Deutschland knapp 40% des Minderungspotenzials des MFR-Maßnahmenbündels M20 beträgt.

Beim Maßnahmenbündel Tempolimit (M50) muss hinsichtlich der immissionsseitigen Wirkungen und der Bewertung der Kosteneffektivität mit und ohne Nutzenverlusten noch weiter differenziert werden in Tempolimit innerorts und Tempolimit auf Außerortsstraßen auf der einen Seite und Tempolimit auf Autobahnen auf der anderen Seite. Ein flächendeckendes Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h würde im Gegensatz zu den beiden anderen Tem-

polimit-Maßnahmen selbst unter Berücksichtigung von Nutzenverlusten zu einer geringfügigen jährlichen Kostenersparnis von 10 Mio. Euro führen, d.h. in etwa kostenneutral sein. Die Maßnahme „Tempolimit 120 km/h auf Autobahnen“ würde emissionsseitig etwa 4.3 kt NO_x (79% des Maßnahmenbündels Tempolimit, M50), 0.02 kt PM10 (70% des Maßnahmenbündels Tempolimit, M50) und 0.02 kt PM2.5 (70% des Maßnahmenbündels Tempolimit, M50) mindern. Die immissionsseitigen Auswirkungen eines flächendeckenden Tempolimits von 120 km/h wurden jedoch nicht konkret modelliert. Es kann aufgrund der emissionsseitigen Minderungswirkung der Maßnahme jedoch geschätzt werden, dass die immissionsseitige Minderung im Mittel etwa 70% der Minderung des Maßnahmenbündels Tempolimit (M50) beträgt.

Fazit:

Die im Projekt PAREST untersuchten Maßnahmen schöpfen etwas weniger als 25% des theoretisch noch verfügbaren Emissionsminderungspotenzials aus. Allein auf Basis dieser Maßnahmen wird es nicht möglich sein, die PM10-Immissionen noch so weit abzusenken, dass die Grenzwerte der europäischen Luftqualitätsrichtlinie (2008/50/EG) überall eingehalten werden können.

Ein großes Potenzial zur weiteren Senkung der PM10-Immissionen bieten die NH₃-Emissionen der Landwirtschaft, die bis zum Jahre 2020 leicht zunehmen und auch im MFR-Szenario M20 nur mit einer circa 17%-igen Minderung belegt werden. Die Wirkung einer NH₃-Emissionsminderung auf die PM10-Immissionen steigt mit zunehmender Emissionsminderungsrate erheblich an (=> nichtlinearer Effekt). Verstärkte Minderungen der Emissionen dieses Stoffes, wie sie z.B. durch eine Reduktion des Konsums von tierischem Eiweiß erreicht werden können, sind daher ein effektives Mittel zur Senkung der PM10-Konzentrationen. Auch der hypothetische Ersatz von holzbefeuerten Öfen durch Ölfeuerungen wäre eine Maßnahme, die sehr viel effektiver wäre als die meisten der hier diskutierten technischen Maßnahmen. Ein flächendeckendes Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h würde einen Teil zur NO_x-Minderung beitragen und wäre auch unter Berücksichtigung von Nutzen-, d.h. Zeitverlusten, kostenneutral bzw. würde sogar zu einer geringfügigen jährlichen Kostenersparnis führen.

Die Umsetzung von nicht-technischen Maßnahmen wie ein Tempolimit, die Veränderung der Essgewohnheiten oder die Vermeidung von Holzfeuerungen erfordert wegen der damit verbundenen Komfort- und Zeitverluste aber ein gesellschaftliches Umdenken, das einer möglichen Verbesserung der Luftqualität ein höheres Gewicht einräumt als eventuellen Komfort- und Zeitverlusten.

2.4 Aussichten und Grenzen

Als allgemeines Endergebnis des PAREST-Projekts sind insbesondere die beiden folgenden Punkte hervorzuheben:

- Es wurde eine detaillierte Analyse der Effektivität von bereits definierten und umgesetzten bzw. in der Umsetzung begriffenen Maßnahmen zur Reduzierung der Feinstaubbelastung in Deutschland durchgeführt. Alle Ergebnisse sind archiviert und stehen daher für weitere Auswertungen zur Verfügung (Fath et al., 2010).
- Es wurde ein Instrumentarium entwickelt, bestehend aus Emissionsdatenbasen, Maßnahmenbündeln, chemischem Transportmodell und Auswertesystem, womit

im Prinzip auch jede neue, hier noch nicht betrachtete Maßnahme durchgerechnet werden kann. Ein hypothetisches Szenario wie z. B. der Einfluss von Elektroautos auf die Luftqualität, der Einfluss eines verstärkten Einsatzes von Biomasseverbrennung oder eine detaillierte Analyse der Effektivität einer Umweltzone kann mit diesem neu entwickelten Instrumentarium, das belastbare Datensätze enthält, berechnet werden.

Dabei ist es allerdings wichtig, folgende Grenzen des entwickelten Instrumentariums zu beachten:

- Die Maßnahmenanalyse im PAREST-Projekt beschränkte sich auf Europa, Deutschland und den städtischen Hintergrund. Die kleinste Gitterauflösung über Deutschland betrug 0.125° Länge x 0.0625° Breite, also ca. $7 \times 8 \text{ km}^2$. Das stellt gegenwärtig noch kein Problem für die Grenzwerte von PM_{2.5} dar, da diese Grenzwerte hauptsächlich den städtischen Hintergrund betreffen. Grenzwertüberschreitungen von PM₁₀ und NO₂ treten aber überwiegend an straßennahen Stationen auf, den sogenannten „Hot-Spots“. Auch der Grenzwert von PM_{2.5} gilt ab 2015 überall, also auch an „Hot-Spots“. Damit können die im PAREST-Projekt erstellten Hintergrundfelder nicht direkt für die Abschätzung von PM₁₀- und NO₂-Grenzwertüberschreitungen benutzt werden. Es wurde hierzu zwar eine Methodik entwickelt, die ausgehend von den Hintergrundfeldern zukünftige Grenzwertüberschreitungen als Folge der lokalen Emissionsänderung und der Änderung des Hintergrunds abschätzt. Eine direkte Betrachtung bzw. die Modellierung von Hot-Spots hat jedoch nicht stattgefunden, da dazu höher auflösende Modellierungen bis hinein in eine Straßenschlucht notwendig sind. Eine Koppelung solcher hochauflösenden Modellrechnungen mit dem bestehenden Instrumentarium wäre sinnvoll und ist auch problemlos möglich.
- Eine weitere Beschränkung des PAREST-Projekts lag darin, dass der Fokus auf die Zielgrößen PM₁₀ und PM_{2.5} gerichtet war. Gesundheitsbeeinträchtigungen der Bevölkerung sind aber besonders davon abhängig, welche Anteile der stofflichen Zusammensetzung von PM₁₀ und PM_{2.5} gemindert werden. Es ist wahrscheinlich, dass die Reduktion von Verkehrs- und Verbrennungsemissionen – vor allem EC (Elementary Carbon) – einen größeren Einfluss auf die Gesundheit hat als eine Reduktion der gesamten PM-Emissionen. Auch solche weiterführenden Untersuchungen können mit dem vorliegenden Instrumentarium ausgeführt werden.
- Maßnahmen zur Reduktion von PM, die auch die gasförmigen Vorläuferemissionen betreffen, sind meistens auch mit Änderungen der Konzentrationen von NO₂ und O₃ verbunden. Diese Änderungen wurden im PAREST-Projekt auch betrachtet. Das Hauptziel war jedoch, den Einfluss der Emissionsminderungen auf PM zu untersuchen. Spezifische Maßnahmen zur Reduzierung von NO₂- oder O₃-Konzentrationen wurden daher nicht betrachtet.

Es sei noch angemerkt, dass die meisten Ergebnisse auf Informationen und Daten mit dem Stand 2007/2008 basieren. Spätere Entwicklungen und Daten konnten im Zeitplan nicht berücksichtigt werden. Zum Beispiel wurden bei der Erstellung der Referenzszenarien nicht die Auswirkungen eines steigenden Einsatzes von Festbrennstoffen aus Biomasse als Klimaschutzmaßnahme und die daraus resultierenden höheren PM- und NO_x-Emissionsmengen berücksichtigt. Eine Fortschreibung der Datenbasis ist aber problemlos möglich.

3 Referenzszenarien für Deutschland

In diesem Abschnitt des PAREST-Abschlussberichts werden verschiedene im PAREST-Projekt betrachtete Emissionsszenarien vorgestellt, die allesamt von ihrer internen Logik her als „Current Legislation“ Szenarios (CLE) angelegt sind. D.h. sie beschreiben, ausgehend vom Basisjahr 2005, jeweils einen Blick in eine Emissionszukunft, wie sie ohne neu zu beschließende Maßnahmen zur Emissionssenkung plausibel wäre. Das im Zeitverlauf nach und nach erfolgende Greifen von Maßnahmen, die bereits beschlossen sind, ist in einem CLE-Szenario bereits eingeschlossen.

Beschrieben und verglichen werden im Folgenden das PAREST-Referenzszenario, sowie Adaptionen der Modelle bzw. Szenarien MMS („Mit-Maßnahmen-Szenario“ aus der Studie Politikszenerarien IV, PSz IV), TREMOVE 2.7 sowie TREMOD 5.04.

Alle vier betrachteten Szenarien sind als methodisch konsistente Zeitreihen angelegt, das heißt sie beginnen mit einer Beschreibung des Basisjahres 2005 und erstrecken sich in 5-Jahres-Schritten über 2010 und 2015 bis 2020. Gegenstand der Emissionsszenarien sind die deutschlandweit aggregierten Emissionen an Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2.5}) und den Aerosol-Vorläufersubstanzen SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC.

Dieses Kapitel baut auf einer Reihe von Hintergrundberichten auf, die im Rahmen des PAREST-Projekts erstellt wurden, namentlich

- „Emissionen im PAREST-Referenzszenario 2005 – 2020“ (Jörß et al. 2010),
- „Energieszenarien für PAREST“ (Jörß und Degel 2010),
- „Verkehrsemissionsmodellierung für PAREST – Modellvergleich und alternative Szenarien“ (Kugler et al. 2010),
- „Landwirtschaftliche Emissionen“ (Dämmgen et al. 2008),
- „Berechnung der Emissionen aus dem Luftverkehr und räumliche Verteilung der internationalen Binnenschifffahrt“ (Thiruchittampalam et al. 2010b),
- „Unsicherheiten der PAREST-Referenz-Emissionsdatenbasis“ (Jörß und Handke 2010), sowie
- „Emissionen aus Offener Verbrennung in Deutschland“ (Jörß 2010).

In diesen Hintergrundberichten sind Grundlagen, Vorgehen, Annahmen und Ergebnisse in größerer Tiefe und Ausführlichkeit beschrieben, als es für den vorliegenden zusammenfassenden Schlussbericht praktikabel wäre.

Im Folgenden werden nach einem kurzen Exkurs zu den Grundlagen der Emissionsberechnung (Kapitel 3.1) die Grundannahmen und Datenquellen des PAREST-Referenzszenarios (Kapitel 3.2) und der alternativen CLE-Szenarien (Kapitel 3.3) vorgestellt. Kapitel 3.4 zeigt die bedeutendsten Quellgruppen für die jeweiligen Schadstoffemissionen 2005 sowie deren Unsicherheiten. Emissionstrends bis 2020 werden in Kapitel 3.5 beschrieben und in Kapitel 3.6 in Hinblick auf die Einhaltung der NEC-Richtlinie von 2001 (EC 2001) interpretiert.

3.1 Grundlagen der Emissionsberechnung

Im PAREST-Projekt wurden, wie generell für Emissionsinventare üblich, die deutschlandweit aggregierten Emissionen durch Verknüpfung von Aktivitätsraten (AR) mit Emissionsfaktoren (EF) berechnet. Als Aktivitätsraten werden Bezugsgrößen gewählt, die repräsentativ für die die Emissionen verursachenden Vorgänge und Prozesse sind. Typisch sind z.B. für die Energiewirtschaft die jeweiligen detaillierten Brennstoffeinsätze, für den Produktionsbereich dagegen die Produktionsmengen und für die Landwirtschaft der Einsatz mineralischer Düngemittel und Tierbestandsdaten. Als Emissionsfaktor wird ein für die Emissionsursache repräsentativer Schadstoffausstoß pro Mengeneinheit durch Messung, Bilanzierung oder Expertenschätzung ermittelt. Struktur und Definition der einzelnen Aktivitätsraten (und darauf aufbauend der Emissionsfaktoren) im PAREST-Modellgebäude basieren dabei auf der Struktur der Emissionsdatenbank des Umweltbundesamtes „Zentrales System Emissionen“ (ZSE 2007). Die Struktur des ZSE (2007) umfasst mehrere Hundert Zeitreihen pro Schadstoff und ist in (Jörß und Handke 2007) und (Jörß et al. 2007) dokumentiert.

Bei der Bilanzierung von Emissionen unterscheidet man für mobile Quellen außerdem Bilanzen nach dem Inlandsprinzip und nach dem Energiebilanzprinzip: Beim Inlandsprinzip geht es darum, zu berechnen, wie viel Treibstoff von Fahrzeugen auf deutschem Territorium verbraucht wurde und wie viele Emissionen daraus innerhalb Deutschlands entstanden sind. Beim Energiebilanzprinzip wird dagegen nicht der Verbrauch des Treibstoffs bilanziert sondern der Verkauf. So würde z.B. in Österreich getanktes Benzin, das auf bayerischen Straßen verfahren und in Emissionen umgesetzt wird nach dem Inlandsprinzip den deutschen Emissionen zugerechnet, nach dem Energiebilanzprinzip aber nach Österreich verbucht. Das Energiebilanzprinzip findet insbesondere in den internationalen Regeln zur Treibhausgas-Emissionsberichterstattung (z.B. IPCC, 2006) Anwendung und ist deshalb in der Emissionsberichterstattung des Umweltbundesamtes fest verankert, auch für primäre PM-Emissionen und Aerosolvorläufersubstanzen. Als Input für eine Immissionsmodellierung von PM ist jedoch eine Bilanz nach dem Inlandsprinzip zielführend, weil diese größeren Wert auf die räumliche Zuordnung der Emissionen legt.

3.2 Das PAREST Referenzszenario

Das PAREST-Referenzszenario (PAREST-REF) baut in seinen Daten und Annahmen weitgehend auf ZSE (2007) auf. Die dort benutzten Daten für Aktivitätsraten, Emissionsfaktoren und Emissionen sind in Jörß und Handke (2007) und Jörß et al. (2007) dokumentiert.

Dieser ZSE-Basis-Datensatz wurde im Rahmen des Projekts für eine Reihe von Quellgruppen überarbeitet, um Lücken zu schließen, Fehler zu korrigieren oder Erweiterungen vorzunehmen. Die Überarbeitungen der ZSE-Datenbasis von 2007 für die Erarbeitung der PAREST-Referenz betrafen neben den Korrekturen von offensichtlichen Datenfehlern im Wesentlichen das Energieszenario und die Quellgruppen Landwirtschaft sowie mobile Quellen d.h. Straßenverkehr, Schiffsverkehr, Luftverkehr und mobile Maschinen in Haushalten/Gewerbe sowie Land-, Forst- und Bauwirtschaft.

Im Folgenden sind diese Anpassungen von ZSE (2007) kurz beschrieben, welche somit im Detail das PAREST-Referenzszenario mit dem Stand vom Januar 2009 beschreiben, welches als Ausgangspunkt für die Modellrechnungen genutzt wurde. Darüber hinaus gehende Informationen und Analysen zum PAREST-Referenzszenario finden sich in Jörß et al. (2010).

3.2.1 Das Energieszenario

Die Gesamtheit der Energieverbräuche im Referenzdatensatz 2005 bis 2020 stellt das PAREST-Energie-Referenzszenario dar, wie es im Wesentlichen auch im ZSE (2007) implementiert war. Dieses Energiereferenzszenario für PAREST ist weitgehend identisch mit dem 2005 interministeriell abgestimmten „Energiereferenzszenario des Umweltbundsamtes zur Emissionsberechnung“ (UBA 2005) allerdings mit einigen Modifikationen:

- Bei der stationären Verbrennung wurden die Erweiterungen mitberücksichtigt, die im Forschungsbericht des IZT für das UBA „Anpassung von Energie- und Emissionsprognosewerten an das Energiemodell BEU“ (Jörß, 2007) beschrieben sind, d.h. im wesentlichen die Ausweitung des Bilanzrahmens bei Abfällen / Sekundärbrennstoffen (alle Sektoren) sowie bei der Holzverbrennung in Haushalten.
- Für mobile Quellen wurden die Energieverbräuche einer aktuelleren Version des am UBA benutzten Verkehrsmodells TREMOD (vgl. Knörr et al., 2005) entnommen, nämlich TREMOD 4.17 anstelle von TREMOD 4. Außerdem wurde als Grundlage für die Immissionsmodellierung nach dem Inlandprinzip gearbeitet, d.h. die Ergebnisse von TREMOD 4.17 und TREMOD MM⁷ wurden NICHT wie in UBA (2005) auf die Energiebilanz normiert. Parallel dazu wurde aber auch ein Datensatz des Energie-Referenzszenarios im Energiebilanzprinzip geführt, der somit unmittelbar mit den Energiedaten im UBA-Energiereferenzszenario von 2005 (UBA, 2005) vergleichbar ist und auch zum Vergleich mit den Vorgaben der NEC-Richtlinie benutzt wurde (vgl. Kapitel 3.6).

Eine detaillierte Darstellung des Referenz-Energieszenario für PAREST sowie weiterer in PAREST benutzter Energieszenarien findet sich in Jörß und Degel (2010). Die verhältnismäßig geringe Emissionsrelevanz einer zusätzlichen Bilanzierung von offenen Verbrennungsvorgängen wurde in Jörß (2010) abgeschätzt.

3.2.2 Landwirtschaft

Die Schätzungen der landwirtschaftlichen Emissionen an NH₃, NO_x⁸, NMVOC und PM für 2005 bis 2020 wurden im Rahmen von PAREST durch das vTI⁹ methodisch gegenüber ZSE (2007) aktualisiert und sind in Dämmgen et al. (2008) dokumentiert. Den Effekt dieser Neuberechnung verdeutlicht Tabelle 3-1 am Beispiel Ammoniak.

⁷ UBA-Modell zur Berechnung der Emissionen aus mobilen Maschinen [Lambrecht et al. 2004].

⁸ NO_x-Emissionen aus der Landwirtschaft sind nicht verbrennungsbedingt sondern treten in Form von Stickstoffmonoxid (NO) aus dem Stickstoffkreislauf auf.

⁹ Das vTI – Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei – ist im Rahmen des Nationalen Systems Emissionen für die offizielle Emissionsberichterstattung Deutschland zu landwirtschaftlichen Emissionen zuständig.

Tabelle 3-1: Vergleich der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen PAREST-REF mit ZSE (2007)

Referenzszenario: Ammoniak - Emissionen in Deutschland [kt NH ₃]						
NFR	Quellgruppe	2000	2005	2010	2015	2020
4	Landwirtschaft	572	577	576	579	582
4 B	Tierhaltung (Wirtschaftsdünger-Management)	474	481	466	459	453
4 D	Landwirtschaftliche Böden	98	96	110	120	130
Datenstand: PAREST-Referenz / Neumodellierung des vTI Mai 2008						
Referenzszenario: Ammoniak - Emissionen in Deutschland [kt NH ₃]						
NFR	Quellgruppe	2000	2005	2010	2015*	2020*
4	Landwirtschaft	596	590	583	583	583
4 B	Tierhaltung (Wirtschaftsdünger-Management)	498	494	488	488	488
4 D	Landwirtschaftliche Böden	98	96	96	96	96
* Die landwirtschaftlichen Emissionen 2015 - 2020 in ZSE 2007 stellen eine provisorische konstante Fortschreibung der für 2010 prognostizierten Emissionen dar.						
Datenstand: ZSE 2007 basierend auf FAL, für 2000/2005 auch im NIR Mai 2008						
Änderung im Referenzszenario: Ammoniak (Landwirtschaft) - Emissionen in Deutschland durch die Neumodellierung des vTI Mai 2008 [kt NH ₃]						
NFR	Quellgruppe	2000	2005	2010	2015	2020
4	Landwirtschaft	-24	-13	-7	-4	-1
4 B	Tierhaltung (Wirtschaftsdünger-Management)	-24	-14	-22	-28	-35
4 D	Landwirtschaftliche Böden	1	0	15	24	34

3.2.3 Straßenverkehr - Aktualisierung des Verkehrsmodells

Die verkehrsbedingten Emissionen im ZSE basieren auf dem vom Umweltbundesamt genutzten Modell TREMOD (Transport Emission Estimation Model, vgl. Knörr et al. 2005). TREMOD enthält Emissionsschätzungen und Prognosen u.a. für den Straßenverkehr, Schienenverkehr und Schiffsverkehr in Zeitreihen von 1990 bis 2030. TREMOD wird regelmäßig aktualisiert, um neueste Erkenntnisse bzw. Annahmen z. B. zu Flottenzusammensetzungen und Fahrleistungen zu integrieren. Der für PAREST benutzten ZSE-Version vom Sommer 2007 lag für den Verkehr die TREMOD-Version 4.16 zu Grunde. Da aber rechtzeitig für PAREST die Version TREMOD 4.17 am Umweltbundesamt zur Verfügung stand, wurden die entsprechenden Daten für die PAREST-Referenz auf die Version TREMOD Version 4.17 aktualisiert. Wie in Kapitel 3.2.1 erwähnt, wurde dabei für die Immissionsmodellierung auf Daten nach dem Inlandsprinzip zurückgegriffen, für den Vergleich mit der internationalen Emissionsberichterstattung wurde das Energiebilanzprinzip beibehalten. Die Unterschiede bei Fahrleistungen und Emissionen zwischen beiden Datensätzen liegen beim Straßenverkehr in der Größenordnung von 5% (vgl. Jörß et al., 2010; Kugler et al., 2010).

TREMOD 4.17 berücksichtigt bei der Modellierung der Abgasemissionen die Emissionsklassen bis Euro 4 für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge (LNF) sowie bis Euro V für schwere Nutzfahrzeuge (SNF). Die zwischenzeitlich beschlossene Einführung der Klassen Euro 5 und Euro 6 für Pkw und LNF, und Euro VI für SNF sowie die Auswirkung der Einführung der Autobahnmaut waren aber **nicht** in TREMOD 4.17 berücksichtigt. Deshalb wurde der TREMOD 4.17-Datensatz für die PAREST-Referenz noch inhaltlich modifiziert, um diese Maßnahmen

zu berücksichtigen¹⁰. Dazu wurde auf die für diese Maßnahmen in Theloke et al. (2007) und Jörß et al. (2007) berechneten Minderungspotenziale zurückgegriffen. Diese betreffen eine Reduktion von PM_{2.5}, PM₁₀, NO_x und NMVOC durch Euro 5 und 6 für Pkw und LNF (leichte Nutzfahrzeuge), eine Reduktion von PM₁₀, PM_{2.5} und NO_x durch Euro VI für SNF (schwere Nutzfahrzeuge) sowie durch die bestehende LKW-Maut. Die Maut verursacht zusätzlich Reduktionen von durch Abrieb und Wiederaufwirbelung bedingten PM₁₀- und PM_{2.5}-Emissionen. Tabelle 3-2 stellt die auf dieser Basis berechneten relativen Minderungseffekte bezogen auf TREMOD 4.17 dar. Insbesondere für NO_x hat diese Anpassung auch einen substantiellen Einfluss auf die insgesamt für Deutschland von 2015-2020 bilanzierten Emissionen, weil bei NO_x der Anteil des Straßenverkehrs an den Gesamtemissionen besonders hoch ist (vgl. Kapitel 3.4 und 3.5).

Tabelle 3-2: Minderungseffekte zur Erweiterung des Referenzszenarios um Euro 5/6 für Pkw und LNF, Euro VI für SNF und LKW-Maut

Fzg- typ	Name	Art	Schadstoff	SNAP	2010	2015	2020
LNF	Euro 5 und 6 für Pkw und LNF	Antrieb	NMVOC	07_1 Road transport gasoline	-0.7%	-4.3%	-8.4%
PKW			NMVOC	07_1 Road transport gasoline	-2.9%	-11.2%	-19.0%
LNF			NO _x	07_2 Road transport diesel	-3.3%	-20.8%	-45.9%
PKW			NO _x	07_2 Road transport diesel	-6.2%	-27.2%	-51.0%
LNF			PM 10	07_2 Road transport diesel	-3.0%	-23.0%	-48.0%
PKW			PM 10	07_2 Road transport diesel	-3.0%	-23.0%	-48.0%
LNF			PM 2.5	07_2 Road transport diesel	-3.0%	-23.0%	-48.0%
PKW			PM 2.5	07_2 Road transport diesel	-3.0%	-23.0%	-48.0%
Busse			NO _x	07_2 Road transport diesel	-0.5%	-16.2%	-38.9%
SNF			NO _x	07_2 Road transport diesel	-8.4%	-45.2%	-66.3%
Busse	Euro VI für SNF und Lkw- Maut	Antrieb	PM 10	07_2 Road transport diesel	-4.0%	-40.0%	-66.0%
SNF			PM 10	07_2 Road transport diesel	-4.0%	-40.0%	-66.0%
Busse			PM 2.5	07_2 Road transport diesel	-4.0%	-40.0%	-66.0%
SNF			PM 2.5	07_2 Road transport diesel	-4.0%	-40.0%	-66.0%
SNF	LKW- Maut	Abrieb	PM 10	07_5 Road transport non-exhaust (tire, brake and road wear)	0.0%	-5.0%	-5.0%
SNF			PM 2.5	07_5 Road transport non-exhaust (tire, brake and road wear)	0.0%	-5.0%	-5.0%
SNF		Wieder- aufwir- belung	PM 10	07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)	0.0%	-5.0%	-5.0%
SNF			PM 2.5	07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)	0.0%	-5.0%	-5.0%

Die TREMOD-Version 5.04, welche die genannten Maßnahmen berücksichtigt, stand erst kurz vor Abschluss des PAREST-Projekts zur Verfügung und wurde deshalb nicht in die PAREST-Referenz integriert, sondern als alternatives Szenario gerechnet (vgl. Kapitel 3.3.3).

Für technische Emissionsfaktoren (fahrzeugklassenspezifisch und fahrsituationsspezifisch) greift TREMOD auf das Handbuch für Emissionsfaktoren (HBEFA¹¹) zurück. Grundlage der im PAREST-Vorhaben benutzten TREMOD-Versionen ist die Version 2.1 des HBEFA aus

¹⁰ Dieser modifizierte Datensatz wird in PAREST "TREMOD 4.17M" genannt.

¹¹ HBEFA - Handbook of Emission Factors for Road Transport - <http://www.hbefa.net/>

dem Jahre 2004. Erst im Januar 2010 wurde die Version 3.1. des HBEFA veröffentlicht. Diese ist aber in keiner der in PAREST betrachteten TREMOD-Versionen berücksichtigt.

3.2.4 Wiederaufwirbelung von Straßenstaub

Neben Abgasemissionen enthält ZSE (2007) für den Straßenverkehr noch PM₁₀- und PM_{2.5}-Abriebemissionen (Straßenbelag-, Reifen- und Bremsenabrieb). Bisher nicht enthalten sind PM₁₀- und PM_{2.5}-Emissionen aus der Wiederaufwirbelung von Straßenstaub, die für PAREST-REF (nur für die Inlandsbilanzierung) zusätzlich geschätzt wurden. Dazu wurden die Emissionsfaktoren aus Schaap et al. (2009) benutzt.

Tabelle 3-3: Emissionsfaktoren für die Wiederaufwirbelung von Straßenstaub

Schadstoff	Einheit	Fahrzeugtyp	Straßentyp		
			Autobahn	außerorts	innerstädtisch
PM _{coarse} (PM10 - PM2.5)	mg/Fahrzeug-km	Heavy duty vehicle (SNF / BUS)	198	432	432
		Light duty vehicle (PKW / LNF)	22	48	48
Quelle: [Schaap et al. 2009]					

Die Faktoren in Tabelle 3-3 gelten für die Größenfraktion PM_{coarse} (PM_{2.5} bis PM₁₀), zusätzlich war 1/9 dieser Zahlen als PM_{2.5} anzusetzen (PM₁₀ = 10*PM_{2.5}). Die Wichtungsfaktoren für die Fahrsituationen außerorts, innerorts und Autobahn sowie die Fahrleistungen wurden (für jedes Jahr verschieden) aus TREMOD 4.17 übernommen. Relevanz hat dies nur für PM_{2.5} und PM₁₀, die anderen betrachteten Schadstoffe bleiben unberührt. Für die Emissionssummen im Energiebilanzprinzip blieb die Wiederaufwirbelung weiterhin unberücksichtigt.

3.2.5 Schifffahrt

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 erwähnt, unterscheidet das Modell TREMOD zwischen dem Inlandsprinzip und dem Energiebilanzprinzip. Dies gilt auch für den in TREMOD bilanzierten Binnenschiffsverkehr. Die Unterschiede sind für die Binnenschifffahrt besonders groß. Die Emissionen auf Grundlage des Energiebilanzprinzips liegen bei ca. der Hälfte der Emissionen auf Grundlage des Inlandsprinzips. Analog zum Vorgehen beim Straßenverkehr (Kap. 3.2.3) wurden in PAREST deshalb auch für die Binnenschifffahrt parallele Datensätze zum Zweck der Immissionsmodellierung (Inlandsprinzip) und der Vergleichbarkeit mit der internationalen Emissionsberichterstattung (Energiebilanzprinzip) angelegt.

Zusätzlich wurde für die PAREST-Referenz die TREMOD-Annahme zum Schwefelgehalt von Schiffsdiesel für das Basisjahr 2005 korrigiert, die zu niedrig war (vgl. Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: Annahmen zum Schwefelgehalt von Schiffsdiesel

Emittentengruppe	Material	Datensatz	Schadstoff	Wertetyp	Einheit	2005	2010	2020
Übrige Küsten- und Binnenschifffahrt	Dieselkraftstoff	TREMOD 4.17 / ZSE	SO ₂	EF	kg/TJ	0.37	0.37	0.37
				Gew.-% S	ppm S	8	8	8
		PAREST-REF	SO ₂	EF	kg/TJ	79.14	0.37	0.37
				Gew.-% S	ppm S	1700	8	8

Anders als die Binnenschifffahrt wird der internationale Schiffsverkehr in der internationalen Emissionsberichterstattung nicht in nationale Emissionsmengen eingerechnet, sondern unter

“international Bunkers” bilanziert, unabhängig davon, wo die Emissionen stattfinden. Um diese Lücke zu schließen, wurde für PAREST zusätzlich zu ZSE (2007) der internationale Hochseeschiffsverkehr auf Binnenwasserstraßen bilanziert. Die berechneten Summen fallen deutschlandweit kaum ins Gewicht, sondern tragen nur lokal an ausgewählten Wasserstraßen nennenswert zu den Emissionen bei. Details hierzu sind in Thiruchittampalam et al. (2010a) dokumentiert.

3.2.6 Ziviler Flugverkehr

Die ZSE-Datenbasis (ZSE, 2007) basiert für die Berechnung der Emissionen aus dem zivilen Flugverkehr ebenfalls auf TREMOD und bezieht sich in Übereinstimmung mit den Regeln zur CO₂-Bilanzierung nur auf Flüge innerhalb Deutschlands, Flüge mit Ursprung oder Ziel im Ausland werden nicht mit bilanziert. Bei dieser Bilanz in ZSE (2007) wird nicht zwischen Emissionen einerseits am Boden und in der Lande- und Startphase (LTO – landing and take-off) und andererseits während des Betriebs auf Reiseflughöhe (Cruise) unterschieden. Für die Immissionsmodellierung in PAREST war es jedoch sinnvoller, nur die LTO-Emissionen zu verwenden, aber unabhängig vom Reiseziel (national oder international), da die Emissionen der Reiseflughöhe (Cruise) nur unwesentlich auf bodennahe Schadstoffkonzentrationen einwirken.

Im Rahmen des Vorhabens wurde deshalb eine neue Methodik zur Schätzung der deutschen LTO-Emissionen auf Basis von Flugdaten der offiziellen europäischen (EUROSTAT) und deutschen (destatis) Statistikbehörden sowie von Emissionsfaktoren der ICAO¹² und des CORINAIR Guidebook (CORINAIR, 2007) entwickelt. Details hierzu sind in Thiruchittampalam et al. (2010b) dokumentiert. Tabelle 3-5 verdeutlicht die Effekte der Neumodellierung im PAREST-Projekt:

Tabelle 3-5: Emissionen und Treibstoffverbrauch des zivilen Flugverkehrs 2005

Emissionen und Treibstoffverbrauch des zivilen Flugverkehrs 2005								
Systematik	Flugphasen	Flugziel	kt NO _x	kt NMVOC	kt PM	kt SO ₂	kt NH ₃	TJ Kerosin
PAREST REF	LTO	nat + int	22.9	3.5	0.2	0.7	0.3	78700
ZSE 2007	LTO + cruise	nat	22.5	2.6	NE	0.6	0.3	69225

Es ist letztendlich „Zufall“, dass die in Tabelle 3-5 gezeigten aggregierten Emissionen beider Systematiken so nahe beieinander liegen. Die bilanzierten Emissionsquellen sind, wie oben beschrieben, sehr verschieden.

Die Methodik zur Berechnung von Emissionen des **militärischen** Flugverkehrs wurde nicht verändert und basiert auf aggregierten Emissionsfaktoren und Energieverbräuchen aus ZSE (2007).

3.2.7 Mobile Maschinen

Emissionen aus mobilen Maschinen werden am Umweltbundesamt mit dem Modell TREMOD MM berechnet (vgl. Lambrecht et al., 2004). In TREMOD MM werden Emissionen aus mobilen Maschinen in der Land- und Forstwirtschaft, der Bauwirtschaft, in Haushalten und in der Grünpflege sowie von Sport- und Passagierbooten bilanziert. Die Ergebnisse aus TREMOD MM sind treibstoffseitig allerdings nicht mit der Energiebilanz kompatibel. Dementsprechend waren die TREMOD MM-Ergebnisse auch nur sehr rudimentär in ZSE (2007) enthalten. Für den PAREST Datensatz auf Grundlage des Inlandsprinzips wurde deshalb ent-

¹² ICAO: International Civil Aviation Organization

schieden, die TREMOD MM-Ergebnisse mit minimalen Anpassungen¹³ direkt zu nutzen. Für den PAREST-Datensatz im Energiebilanzprinzip wurde eine lineare Skalierung auf die Rahmendaten der Energiebilanz vorgenommen. Die Daten im Energiebilanzprinzip sind somit konsistent zu früheren Berichten für das Umweltbundesamt (Jörß und Handke, 2007 und Jörß et al., 2007).

3.3 Alternative „Current Legislation“-Szenarien

Für die im Folgenden unter den Stichworten „MMS“, „REMOVE 2.7“ und „TREMOD 5.04“ vorgestellten Szenarien wurden Teile der Datenbasis von PAREST-REF gegen Datensätze ausgetauscht, die aus anderen Quellen bzw. Sektormodellen stammen. D.h. zum überwiegenden Teil sind die folgenden Szenarien mit PAREST-REF identisch, wie es in Kapitel 3.2 beschrieben ist. Alle diese Szenarien sind von ihrer Logik ebenso wie PAREST-REF so konstruiert, dass sie als „Current Legislation“-Szenarien (CLE) fungieren. Sie sollen also für die Zukunft eine Umsetzung all derjenigen Maßnahmen abbilden, die bereits beschlossen sind. Die Wirkungspotenziale politisch noch zu verhandelnder Maßnahmen(vorschläge) werden dagegen in den Maßnahmen szenarien untersucht¹⁴. In den folgenden Kapiteln wird deshalb nur beschrieben, in welchen Datenquellen und Annahmen sich die alternativen CLE-Szenarien von der PAREST-Referenz unterscheiden. Ein systematischer Vergleich der insgesamt modellierten Emissionssummen der vier Szenarien schließt sich in Kapitel 3.4 bis 3.6 an.

3.3.1 MMS

„MMS“ steht für „Mit Maßnahmen Szenario“ und greift das gleichnamige Energieszenario aus der Studie Politikszenerien IV (PSz IV – siehe Matthes et al., 2008) auf. Das MMS ist in der Systematik von „Politikszenerien IV“ ein „Current Legislation“-Szenario, das dort im Gegensatz zu einem hypothetischen „Ohne Maßnahmen Szenario“ die bereits beschlossenen (Klimaschutz)-Maßnahmen mit bilanziert. Weitergehende Klimaschutzmaßnahmen werden in Politikszenerien IV im „Mit weiteren Maßnahmen Szenario“ (MWMS) beschrieben¹⁵. Politikszenerien IV ist die Nachfolgestudie und Aktualisierung von „Politikszenerien III“ (PSz III – (Diekmann et al., 2004). PSz III war seinerseits die Grundlage des Energiereferenzszenarios des Umweltbundesamtes von 2005 (UBA, 2005) und ist somit auch die energieseitige Fundierung von ZSE (2007) und des PAREST-Referenzszenarios.

Für die Adaption des MMS im PAREST-Projekt wurden die stationären Energieverbräuche des PAREST-Referenzszenarios durch solche ersetzt, die sich aus den Rahmendaten des MMS in PSz IV ableiten ließen. Eine detaillierte Dokumentation des Vorgehens und der Gegenüberstellung der bilanzierten Brennstoffmengen ist in Jörß und Degel (2010) enthalten. Für den Verkehr wurden die auf TREMOD 4.17 basierenden Daten von PAREST-REF (vgl. Kapitel 3.2.3) unverändert ins MMS (PAREST) übernommen. Hintergrund ist, dass auch innerhalb des Vorhabens Politikszenerien IV für das MMS die Rahmendaten der damals aktuellen TREMOD-Version übernommen wurden und so die Ergebnisse des eigentlich in PSz IV benutzten Modells ASTRA¹⁶ „geeicht“ wurden.

¹³ Lediglich die in TREMOD MM bilanzierten Mengen an Flüssiggaseinsatz in der Bauwirtschaft wurden mit den im ZSE bilanzierten Mengen an Flüssiggas in Energiebilanzzeile 67 „Gewerbe, Handel, Dienstleistungen“ verrechnet, um Doppelzählungen zu vermeiden.

¹⁴ Vgl. dazu Kapitel 7 zu Maßnahmen szenarien.

¹⁵ Innerhalb des PAREST-Projekts wurde auch das Klimaschutzszenario MWMS analysiert, vgl. dazu Kapitel 7 zu den Maßnahmen szenarien oder z.B. [Jörß und Degel 2010], [Stern 2010b].

¹⁶ Das Modell ASTRA (Assessment of Transport Strategies) wird am Fraunhofer ISI betrieben. Zum ASTRA Modell vgl. die Kurzbeschreibung in [Schade 2008]

In Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 werden die emissionsrelevanten Brennstoffverbräuche der genutzten Szenarien dargestellt und zwar einerseits in der Differenzierung nach Brennstoffen und andererseits nach Sektoren. Es wird deutlich, dass das MMS für 2020 insbesondere für die Stromproduktion und in Haushalten von deutlich niedrigeren Brennstoffeinsätzen ausgeht als PAREST-REF (-16% bis -20%), dies manifestiert sich u.a. in niedrigeren Einsätzen von Erdgas (-18%) und – für die Feinstaubemissionen und Feinstaubimmissionen bedeutender – von Kohle (-20% Steinkohle). Ebenfalls besonders relevant für die Staubemissionen sind die im MMS niedrigeren Annahmen zum Einsatz von fester Biomasse.

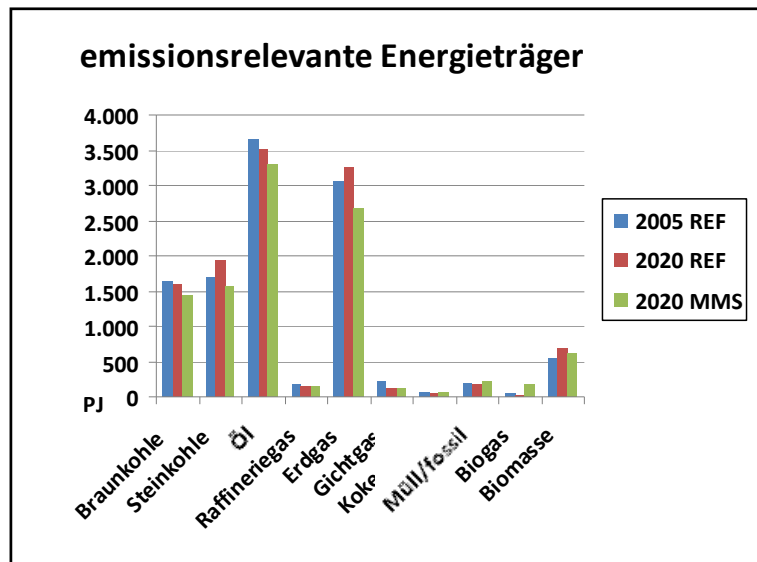


Abbildung 3-1: Emissionsrelevante Energieverbräuche in PAREST-REF und PSz IV-MMS nach Energieträgern

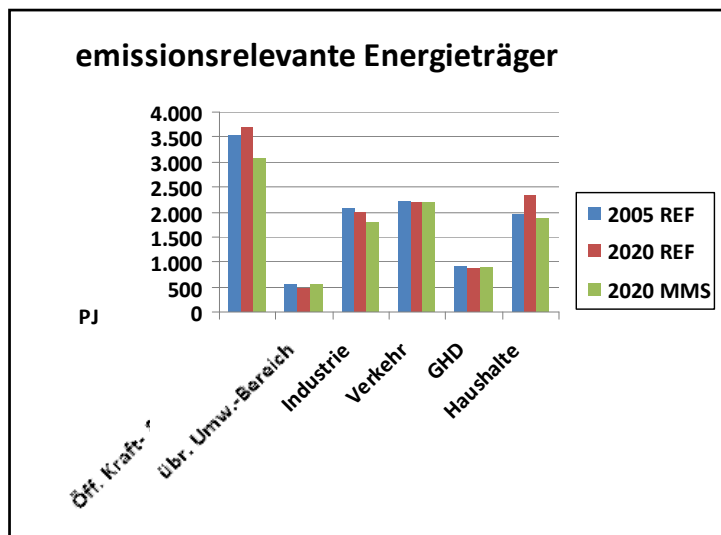


Abbildung 3-2: Emissionsrelevante Energieverbräuche in PAREST-REF und PSz IV-MMS nach Sektoren

Weitere und detaillierte Analysen der MMS-Daten im Vergleich zum PAREST-Referenzszenario, z.B. bezüglich verschiedener Annahmen zu Produktionsmengen in energieintensiven

Produktionsprozessen¹⁷ sowie der Emissionsrelevanz der energetischen Unterschiede sind in Jörß und Degel (2010) enthalten.

3.3.2 *TREMOVE 2.7*

Während TREMOD für die offizielle deutsche Emissionsberichterstattung für den Straßenverkehr (und z.T. andere Verkehrsarten) und entsprechende Szenarien benutzt wird, ist auf europäischer Ebene das Modell TREMOVE¹⁸ [De Ceuster et al. 2007] etabliert. Die aktuelle Version TREMOVE 2.7 errechnet für den Straßenverkehr in Deutschland zum Teil deutlich von der PAREST-Referenz abweichende Emissionsmengen. Dies gilt sowohl für das Basisjahr 2005, wo die PAREST-Referenz unmittelbar aus TREMOD 4.17 übernommen ist, als auch für die Zukunftsjahre bis 2020 (vgl. Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Differenzen in der Emissionsberechnung des Straßenverkehrs in Deutschland zwischen TREMOD 4.17 / PAREST-REF und TREMOVE 2.7

Emissionen Straßenverkehr		
TREMOVE vs. PAREST-REF (PAREST REF = 100%)		
	2005	2020
NM VOC	165%	56%
NO _x	130%	224%
PM ₁₀ ¹	93%	71%
¹ Abgas + Abrieb, ohne Wiederaufwirbelung		

Quelle: IZT nach Kugler et al. (2010)

Gemäß der in Kugler et al. (2010) vorgestellten Analyse liegen die am stärksten ins Gewicht fallenden Gründe für diese insbesondere für NO_x und NM VOC stark bedeutsamen Unterschiede in der Emissionsberechnung bei abweichenden Annahmen zur Verteilung der EURO-Minderungsklassen in der Fahrzeugflotte.

Vor diesem Hintergrund wurde in PAREST ein Sensitivitätsszenario angelegt, in dem die Emissionen des Straßenverkehrs von PAREST-REF gemäß Tabelle 3-6 durch diejenigen aus TREMOVE 2.7 ersetzt wurden.

3.3.3 *TREMOD 5.04*

TREMOD 5.04 ist eine aktualisierte Version des TREMOD-Modells (vgl. Kapitel 3.2.3). TREMOD 5.04 unterscheidet sich inhaltlich von TREMOD 4.17 (der Ausgangsbasis der PAREST-Referenz) u.a. dadurch, dass die inzwischen beschlossenen verkehrspolitischen Maßnahmen (Euro 5 & 6 für PKW und LNF, EURO VI für SNF sowie die Autobahnmaut – vgl. Kapitel 3.2.3) sowie aktualisierte Verkehrsleistungsprognosen integriert wurden. Da TREMOD 5.04 erst kurz vor Abschluss des PAREST-Projekts zur Verfügung stand, konnte es nicht mehr in die PAREST-Referenz einfließen sondern wurde für Sensitivitätsrechnungen genutzt. Zu diesem Zweck wurden die Emissionen des Straßenverkehrs aus der PAREST-Re-

¹⁷ Von mengenmäßiger Relevanz für die Feinstaubemissionen und –immissionen sind im Wesentlichen die unterschiedlichen Annahmen für die Metallproduktion und die Mineralstoffindustrie.

¹⁸ Das Modell TREMOVE wurde vom Institut Transport & Mobility Leuven in Zusammenarbeit mit der Katholischen Universität Löwen entwickelt und wird von der Generaldirektion Umwelt (DG ENV) der europäischen Kommission dazu genutzt, um Auswirkungen von emissionsmindernden Maßnahmen im Verkehr innerhalb bestimmter Szenarien zu bewerten. Es umfasst die EU29-Länder (EU27 plus Norwegen und der Schweiz), den Zeitraum 1995-2030 sowie die Verkehrsmodi Straße, Schiene, Luft und Wasser. Mehr Informationen zu TREMOVE finden sich in [Kugler et al. 2010].

ferenz heraus genommen und durch diejenigen aus TREMOD 5.04 ersetzt. Zur konsistenten Berechnung der PM-Emissionen aus Abrieb und Wiederaufwirbelung wurden die der Berechnung als Aktivitätsraten zu Grunde liegenden Fahrleistungen der PAREST-Referenz ebenfalls durch entsprechende Daten aus TREMOD 5.04 ersetzt.

Tabelle 3-7 und Tabelle 3-8 zeigen die aggregierten Emissionen bzw. Fahrleistungen des Straßenverkehrs (Inlandsprinzip) für TREMOD 5.04 im Vergleich zur PAREST-Referenz.

Tabelle 3-7: Differenzen in der Emissionsberechnung des Straßenverkehrs in Deutschland zwischen TREMOD 4.17 / PAREST-REF und TREMOD 5.04

Emissionen Straßenverkehr		
TREMOD 5.04 vs. PAREST-REF (PAREST REF = 100%)		
	2005	2020
NM VOC	104%	99%
NO _x	102%	148%
PM ₁₀ ¹	99%	103%
¹ Abgas + Abrieb, ohne Wiederaufwirbelung		

Quelle: IZT nach [Kugler et al. 2010]

Relevante Unterschiede für TREMOD 5.04 im Vergleich zur PAREST-Referenz ergeben sich in erster Linie für die NO_x-Emissionen ab 2010 (ca. +50 Gg / 10%) und noch stärker für 2015/2020 (ca. +50%). Bei den Fahrleistungen (Tabelle 3-8) fällt v.a. die ca. 13% (ca. 8 Mrd. km) größere Kilometerleistung für schwere Nutzfahrzeuge ins Gewicht, die sich zusätzlich in entsprechend höheren Abrieb- und Aufwirbelungsraten für PM niederschlagen, welche in Tabelle 3-7 nicht enthalten sind. Die zum Teil noch größeren Senkungen bei den Annahmen zur Fahrleistung 2020 für Motorisierte Zweiräder (-8 Mrd. km / -34%) und PKW (-26 Mrd. km / -4%) fallen emissionsmäßig wegen der deutlich niedrigeren Emissionsfaktoren weniger ins Gewicht. Weiterführende Informationen zu TREMOD 5.04 sind in Kugler et al. (2010) enthalten.

Tabelle 3-8: Fahrleistungen im Straßenverkehr in Deutschland nach TREMOD 4.17 / PAREST-REF und TREMOVE 5.04

[illegible]

3.4 Die PAREST – Referenzemissionen im Basisjahr 2005

In diesem Kapitel werden für jedes der betrachteten Schadstoffinventare die im PAREST-Referenzszenario nach Inlandsprinzip für 2005 berechneten Emissionsmengen vorgestellt, und zwar in dem im PAREST-Projekt benutzten Aggregationsniveau, der SNAP¹⁹-Systematik²⁰. Die Emissionen des Alternativszenarios „MMS“ sind für 2005 identisch mit der PAREST-Referenz. Die Abweichungen für 2005 bei der Verwendung von REMOVE 2.7 sind insbesondere für NO_x und NMVOC von Bedeutung und sind aus Tabelle 3-6 (Seite 26) ablesbar. Im Vergleich dazu sind die Abweichungen für 2005 bei der Verwendung von TREMOD 5.04 marginal.

3.4.1 Die Schadstoffe im Einzelnen

Zusätzlich zu den Werten des PAREST-Referenzszenarios werden die Unsicherheiten dargestellt, die im PAREST-Projekt für die Emissionsdatenbasis 2005 mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation gewonnenen wurden (Jörß und Handke, 2010). Die Unsicherheiten der Ergebnisse sind ausgedrückt als obere bzw. untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls²¹.

Abbildung 3-3 bis Abbildung 3-8 stellen also zum einen die beste verfügbare Schätzung der Beiträge der einzelnen Quellgruppen zu den Gesamtemissionen des jeweiligen Schadstoffes dar (berichtete Werte = dicke Balken). Zum anderen geben sie durch die Fehlerbalken einen Hinweis darauf, wie verlässlich die jeweiligen Emissionsschätzungen sind (relative Größe der Unsicherheiten im Vergleich zum berichteten Wert) und welche Quellgruppen in besonderem Maße zur Unsicherheit des Gesamtinventars beitragen und somit im Rahmen einer Inventarverbesserung prioritär zu behandeln wären (absolute Größe der Fehlerbalken)²². Die in diesem Sinne bedeutendsten Quellgruppen mit den größten Beiträgen zur Gesamtunsicherheit sind nicht immer identisch mit denjenigen mit den höchsten berichteten Werten.

Die **PM₁₀-Emissionen** (Abbildung 3-3) sind relativ breit über viele Quellgruppen verteilt. Die bedeutendsten Unsicherheiten gibt es bei den Quellgruppen Bau & Gewerbe/Tischlereien (SNAP 04), Wiederaufwirbelung (SNAP 07_c), Mastschweinen (SNAP 10), Feuerwerk & Zigarettenrauch (SNAP 06), Eisen- & Stahl-Industrie (SNAP 03/04) sowie bei mobilen Maschinen in Land- und Bauwirtschaft (SNAP 08).

¹⁹ SNAP: Selected Nomenclature for Air Pollution, im Rahmen von Modellierungen gebräuchliches Kodierungssystem für emissionsverursachende technische Prozesse und Verfahren

²⁰ Im PAREST-Projekt wurden die Emissionsdaten parallel sowohl nach der SNAP-Systematik als auch im in der internationalen Berichterstattung gebräuchlichen NFR-Code aggregiert. Um in der Darstellung Verwechslungen zu vermeiden, werden die Bilanzen in verschiedenen Systematiken dargestellt: Die Bilanzen im Inlandsprinzip (relevant für die Immissionsmodellierung) werden in der SNAP-Systematik dargestellt, die auch in den Ausbreitungsmodellen benutzt wird. Die Emissionen im Energiebilanzprinzip (Vergleich zu NEC und Emissionsberichterstattung) werden im NFR-Code dargestellt (siehe Kapitel 3.6).

²¹ Zur konzeptionellen Behandlung von Unsicherheiten in Emissionsinventaren vgl. [Jörß und Handke 2010].

²² In der Interpretation der Ergebnisse und für die Ableitung von Schlussfolgerungen und Handlungsbedarfen sind im Vergleich der verschiedenen Quellgruppen in erster Linie diejenigen mit hohen absoluten Unsicherheiten relevant und nicht unbedingt diejenigen mit hohen relativen Unsicherheiten. Dabei ist zu beachten, dass eine hohe absolute Unsicherheit einer Emission verschiedene Gründe haben kann: Eine hohe prozentuale Unsicherheit bei niedrigem Mittelwert der Emission, ein hoher Mittelwert der Emission bei niedriger prozentualer Unsicherheit oder natürlich hohe prozentuale Unsicherheit in Verbindung mit einem hohen Mittelwert. So kann z.B. die Reduktion der Unsicherheit einer emissionsmäßig bedeutenden Quellgruppe von +/- 10% auf +/- 5% viel mehr zur Verbesserung des Gesamtergebnisses beitragen als die Reduktion der Unsicherheit einer sehr kleinen Quellgruppe von 200% auf 50%.

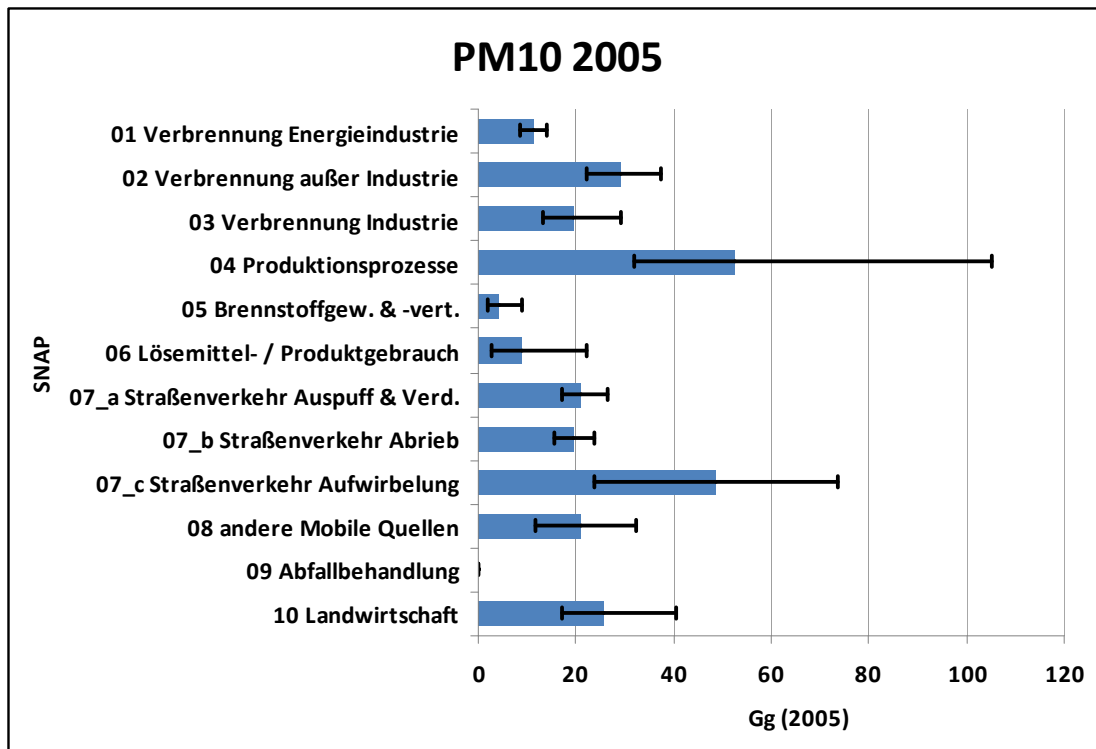


Abbildung 3-3: PM10-Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)

Die **PM2.5-Emissionen** (Abbildung 3-4) sind ähnlich wie die PM10-Emissionen relativ breit über viele Quellgruppen verteilt. Die Anteile der Verbrennungsprozesse (insb. SNAP 01, 02, 07_a & 08) sind aber höher, da hier die PM2.5-Fractionen an den PM10-Emissionen überdurchschnittlich hoch sind. Die bedeutendsten Unsicherheiten gibt es bei den Quellgruppen Kleingewerbe und Tischlereien (SNAP 04), Feuerwerk & Zigarettenrauch (SNAP 06), mobile Maschinen in Land- und Bauwirtschaft (SNAP 08) und Wiederaufwirbelung (SNAP 07_c).

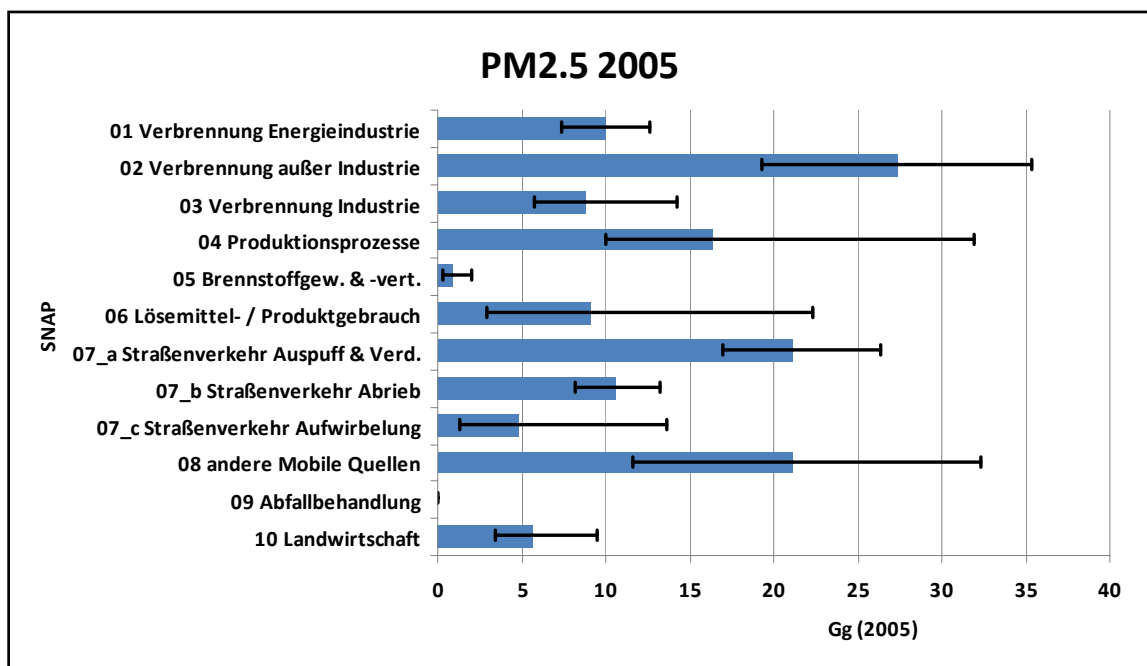


Abbildung 3-4: PM2.5-Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)

Die **SO₂-Emissionen** (Abbildung 3-5) sind auf wenige Quellgruppen, insbesondere die Verbrennung von Brennstoffen, konzentriert. Die Unsicherheiten sind vergleichsweise gering und werden von Kohlekraftwerken (SNAP 01), Industrieprozessen (Ölverarbeitung, Zellstoff- und Schwefelsäureproduktion – SNAP 04) sowie Heizölkesseln in Haushalten und Gewerbe (SNAP 02) dominiert.

Die **NO_x-Emissionen** (Abbildung 3-6) werden vom Straßenverkehr (SNAP 07_a) und sonstigen mobilen Quellen (SNAP 08) dominiert. Bedeutende Beiträge liefern aber auch die stationären Verbrennungsprozesse (SNAP 01 bis 03). Die absolut größten Unsicherheiten im NO_x-Inventar hat aber die Landwirtschaft (insbesondere Emissionen aus der Düngemittelverwendung, SNAP 10). Bei den mobilen Quellen haben die NO_x-Emissionen aus schweren Nutzfahrzeugen und Pkw (SNAP 07_a) sowie aus Maschinen der Land- und Bauwirtschaft (SNAP 08) die größten absoluten Unsicherheiten.

Bei den **NH₃-Emissionen** (Abbildung 3-7) dominiert sowohl bei den berichteten Werten als auch bei den Unsicherheiten die Landwirtschaft (SNAP 10).

Die **NMVOC-Emissionen** (Abbildung 3-8) stammen überwiegend aus dem Lösemittelgebrauch (SNAP 06) sowie aus der Landwirtschaft (SNAP 10). Diese beiden Quellgruppen tragen auch am meisten zu den Unsicherheiten bei.

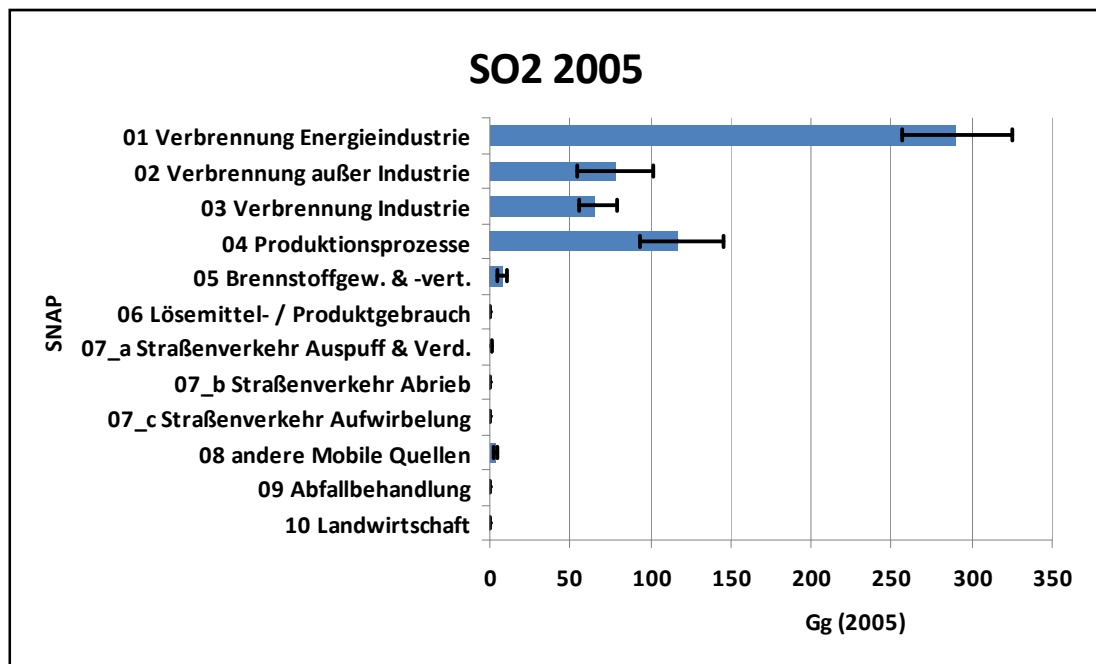


Abbildung 3-5: SO₂-Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)

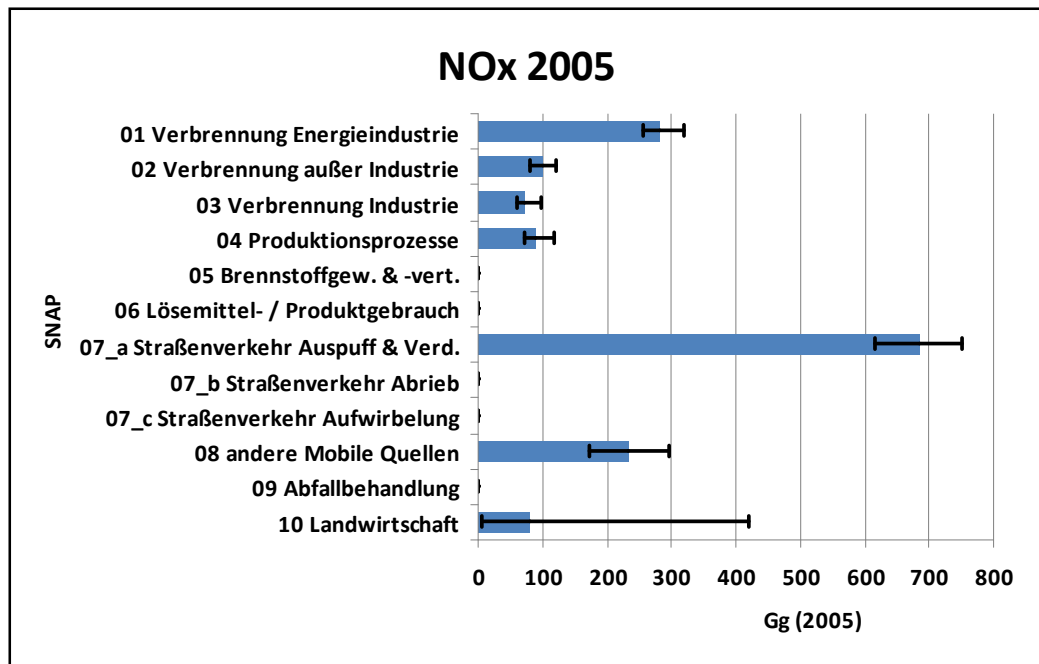


Abbildung 3-6: NO_x-Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)

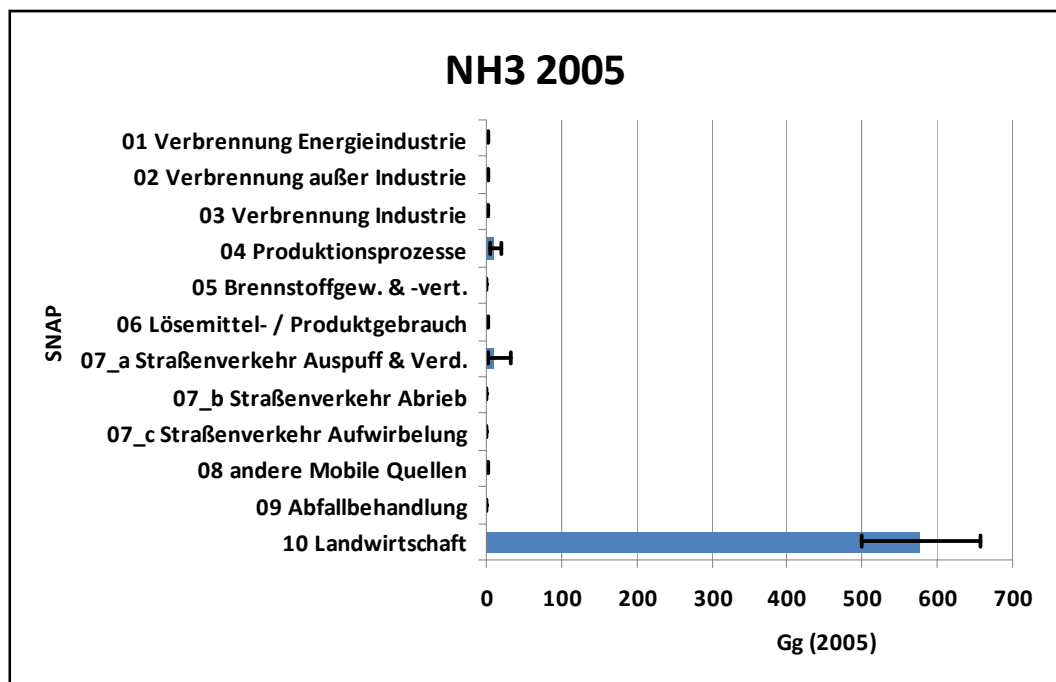


Abbildung 3-7: NH₃-Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)

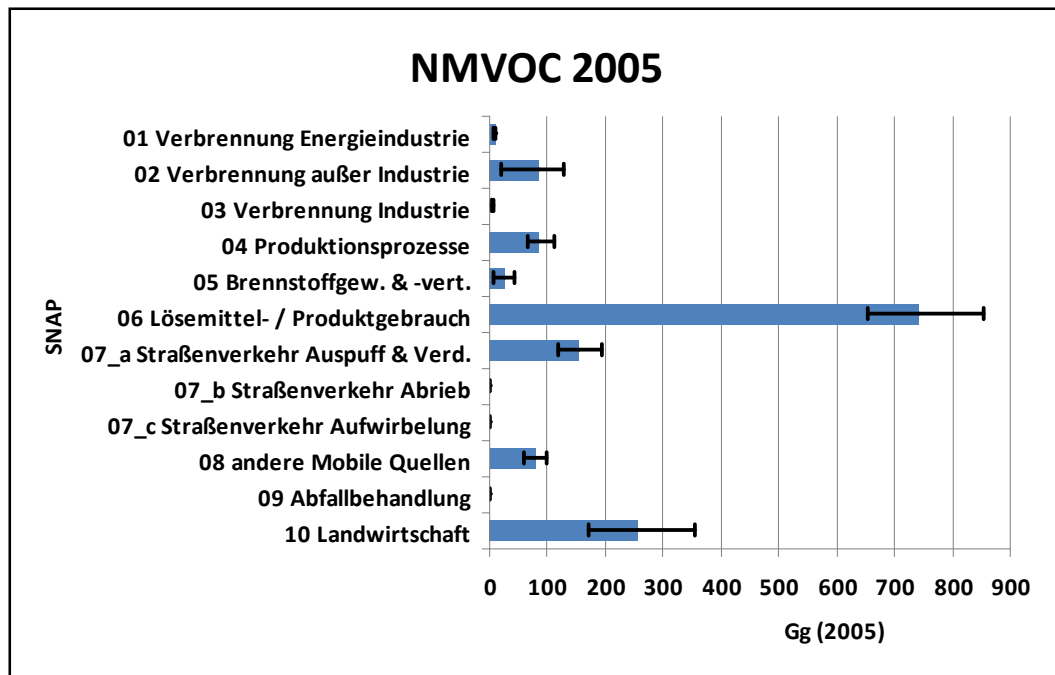


Abbildung 3-8: NMVOC-Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)

3.4.2 Schadstoffübergreifender Vergleich

Zusammengefasst über die verschiedenen betrachteten Schadstoffinventare liefern eine Reihe von Quellgruppen die **mengenmäßig bedeutendsten Beiträge** zu den Referenz-Emissionen 2005:

- Straßenverkehr: PM_{2.5} aus Auspuffemissionen (nur für 2005, im Szenario bis 2020 stark zurückgehend!), PM₁₀ aus der Wiederaufwirbelung von Straßenstaub, PM₁₀ aus Abrieb und Auspuff (nur 2005), NO_x aus schweren Nutzfahrzeugen und PKW, NMVOC und NH₃ aus Otto-Motoren
- Stationäre Feuerung: SO₂ und NO_x aus großen Kohlekraftwerken und Raffinerien, PM₁₀ und PM_{2.5} aus Holzfeuerungen
- Landwirtschaft: NH₃ aus Tierhaltung und Bodenbewirtschaftung, NO_x aus der Düngemittelanwendung, NMVOC aus dem Umgang mit Wirtschaftsdünger, PM₁₀ aus der Schweinemast, der Geflügelhaltung und dem Schüttgutumschlag
- Mobile Maschinen in Land- und Forstwirtschaft: PM₁₀, PM_{2.5} und NO_x
- Kleingewerbe (Tischlereien), Bauwirtschaft und Schüttgutumschlag: PM₁₀
- Lösemittelverwendung: NMVOC-Emissionen

Eine Übersicht über die für 2005 berechneten Emissionen zeigt Tabelle 3-9:

Tabelle 3-9: PAREST-Referenzemissionen 2005

PAREST-Referenzemissionen 2005			
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>			
Schadstoff	2,5%-Quantil	Emission [Gg]	97,5%-Quantil
PM10	-16%	262	+ 23%
PM2.5	-15%	136	+ 19%
SO ₂	-9%	562	+ 9%
NO _x als NO ₂	-10%	1544	+ 23%
NMVOG	-10%	1438	+ 12%
NH ₃	-13%	607	+ 13%

Im Vergleich der Qualität der betrachteten Schadstoffinventare sind diejenigen für PM10 und NO_x am unsichersten, während die Inventare für SO₂ und NMVOC die höchste Qualität haben (siehe auch Abbildung 3-9).

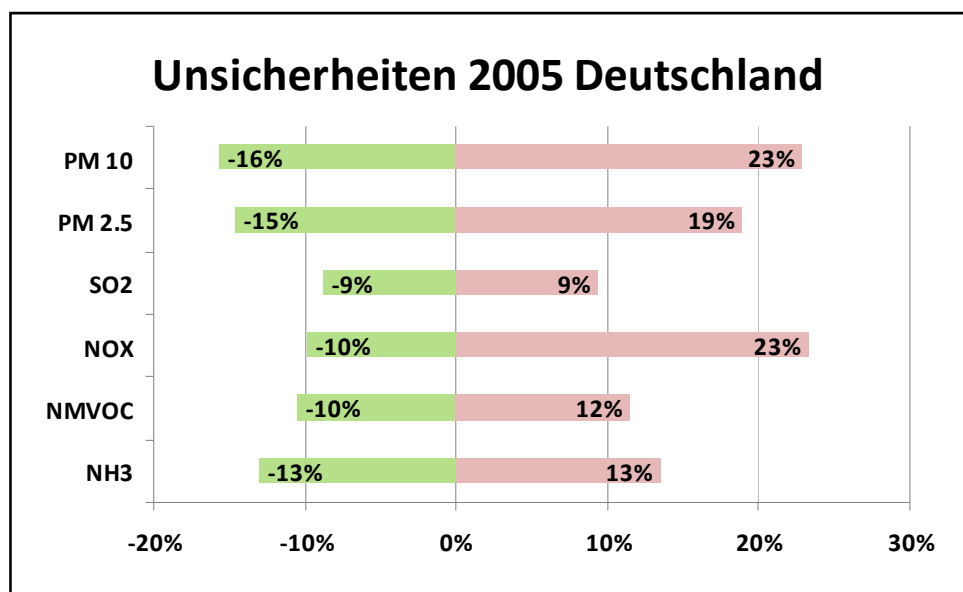


Abbildung 3-9 Unsicherheiten im deutschen Emissionsinventar 2005; PAREST-Referenzszenario, Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; angegeben sind die Grenzen des 95%- Konfidenzintervalls (2,5%-Quantil und 97,5%-Quantil)

Zum Vergleich: Die Qualität des deutschen Treibhausgasinventars wird vom Umweltbundesamt für 2007 mit +/-9.7% (UBA, 2010) angegeben, also in derselben Größenordnung wie für SO₂ und NMVOC in dieser Studie.

Die bedeutendsten Beiträge zur Unsicherheit in den betrachteten Schadstoffinventaren sind in folgenden Quellgruppen zu finden:

- Landwirtschaft: NO_x aus der Düngemittelanwendung, NMVOC aus dem Umgang mit Wirtschaftsdüngern, NH₃ aus der Tierhaltung und der Bodenbewirtschaftung, PM10 aus der Schweinemast
- Mobile Maschinen in Land- und Forstwirtschaft: PM10, PM2.5 und NO_x
- Bauwirtschaft²³: PM10
- Kleingewerbe (Tischlereien)²³: PM10 und PM2.5
- Zigarettenrauch & Feuerwerk²³: PM2.5
- Straßenverkehr: PM10 und PM2.5 aus der Wiederaufwirbelung von Straßenstaub, NO_x aus schweren Nutzfahrzeugen und PKW, NMVOC und NH₃ aus Otto-Motoren
- Lösemittelverwendung: NMVOC-Emissionen
- Stationäre Feuerung: SO₂ aus Kohlekraftwerken und ölgefeuerten Heizkesseln, PM10 und NMVOC aus Holzfeuerungen

Die Listen der Quellgruppen mit den größten Beiträgen zu den Referenzemissionen einerseits und zu den Unsicherheiten andererseits sind ähnlich, aber nicht identisch. Die Unterschiede liegen zum einen bei Quellgruppen mit hohen Referenzwerten aber gleichzeitig im Vergleich zu den anderen Quellgruppen besonders niedrigen Unsicherheiten (z.B. NO_x aus Kohlekraftwerken) und zum anderen bei Quellgruppen mit mäßig hohen Referenzschätzungen aber besonders hohen Unsicherheiten (z.B. PM2.5 aus Zigarettenrauch & Feuerwerk).

3.5 Emissionstrends bis 2020

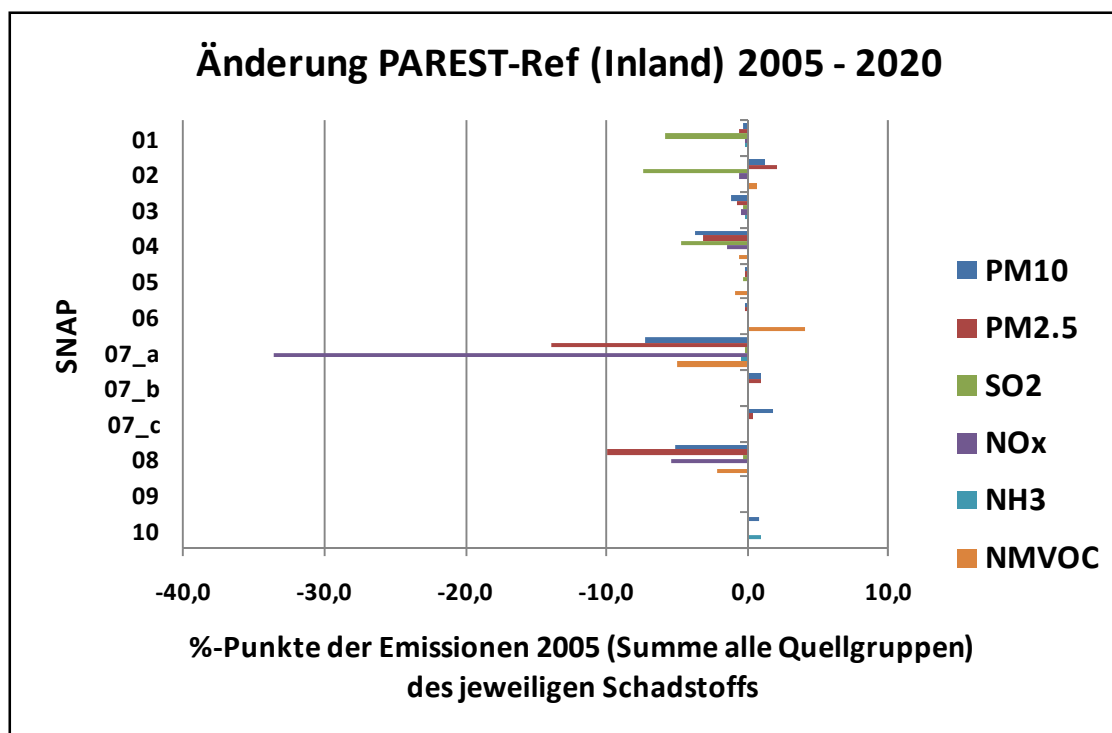
3.5.1 Überblick

Tabelle 3-10 zeigt die Trends in den Emissionsentwicklungen aller betrachteten Schadstoffe von 2005 bis 2020 im PAREST-Referenzszenario, jeweils für die Summe der Emissionen. Bis auf Ammoniak und NMVOC sind für alle Schadstoffe deutliche Emissionsminderungstrends zu erkennen, am stärksten bei NO_x mit ca. -40%. Die Verteilung der Emissionsminderungen (bzw. Emissionssteigerungen) auf die verschiedenen Quellgruppen illustriert Abbildung 3-10.

Tabelle 3-10: Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 im PAREST-Referenzszenario

Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 im PAREST-Referenzszenario					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip (2005 = 100%)</i>					
PM ₁₀	PM _{2,5}	SO ₂	NO _x	NH ₃	NMVOC
87%	75%	81%	59%	100%	96%

²³ Das UBA-Inventar beruht hier auf einer sehr groben, aus dem RAINS-Modell übernommenen Schätzung (vgl. [Klimont et al. 2002]).



SNAP 07_a: Road transport – exhaust and volatilisation
 SNAP 07_b: Road transport – non-exhaust (tire, break and road wear)
 SNAP 07_c: Road transport – non exhaust (resuspension)
 Quelle: IZT

Abbildung 3-10: Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 im PAREST-Referenzszenario

Es wird deutlich dass im Referenzszenario insbesondere die Emissionen des Straßenverkehrs und des sonstigen Verkehrs inklusive mobiler Maschinen überdurchschnittlich stark zurückgehen. Für PM werden die Reduktionen der Abgasemissionen dabei aber teilweise von steigenden Emissionen aus Abrieb und Wiederaufwirbelung kompensiert, da die Fahrleistungen bis 2020 weiter steigen. Für PM10 übersteigen die Abriebemissionen die Abgasemissionen ab 2005, bei PM2.5 ist dies ab ca. 2010 der Fall. Im Referenzfall sind zudem die Emissionen aus der Wiederaufwirbelung von PM10 ca. 2.5 mal so hoch wie die PM10-Abriebemissionen, bei PM2.5 halb so hoch; man beachte allerdings bei diesen Verhältnissen die großen Unsicherheiten (Abbildung 3-10 und Abbildung 3-4).

Im Vergleich zum Verkehr weisen die **stationären Feuerungen** eher geringere Minderungstrends auf, außer bei SO₂, wo absolut vor allem die Verringerung des Schwefelgehalts von leichtem Heizöl (SNAP 2) und die ca. 10%-ige Reduktion im Kraftwerksbereich (SNAP 1) bedeutsam sind. Ein steigender Einsatz von **Brennholz in Haushalten** führt im Referenzszenario trotz schärferer technischer Anforderungen²⁴ zu steigenden PM- und NMVOC-Emissionen.

Im **industriellen Bereich** (in SNAP 3 & 4) sind durchschnittliche bis unterdurchschnittliche Emissionsminderungstrends zu erkennen. Die Emissionen der **Landwirtschaft** (die Landwirt-

²⁴ Die im Februar 2010 veröffentlichte Novelle der 1.BImSchV [Bund 2010] ist allerdings nicht im PAREST-Referenzszenario berücksichtigt. In PAREST wurden dazu mehrere optionale Maßnahmenpakete für Kleinfeuerungsanlagen betrachtet (vgl. dazu Kapitel 7 zu den Maßnahmenszenarien).

schaft ist neben NH₃ auch für NO_x, NMVOC und PM von Bedeutung) stagnieren im Referenzszenario bzw. weisen sogar leichte Steigerungsraten auf.

Tabelle 3-11 zeigt die Emissionstrends 2005 bis 2020 im Vergleich der verschiedenen in Kapitel 3.3 betrachteten CLE-Szenarien mit der PAREST-Referenz:

Tabelle 3-11: Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 in verschiedenen CLE-Szenarien

Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 in verschiedenen CLE-Szenarien						
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip (2005 = 100%)</i>						
Szenario	PM₁₀	PM_{2,5}	SO₂	NO_x	NH₃	NMVOC
PAREST-Referenz	87%	75%	81%	59%	100%	96%
MMS	86%	72%	79%	55%	100%	95%
TREMOVE 2.7	85%	72%	81%	63%	100%	88%
TREMOD 5.04	88%	75%	81%	63%	100%	96%

Die stärkeren Minderungsraten im MMS sind darin begründet, dass ein geringerer Einsatz von Brennholz in Haushalten (relevant für PM) und ein geringer Kohleinsatz in Kraftwerken (relevant für SO₂ & NO_x) prognostiziert werden. Die schwächeren Minderungsraten für NO_x in den Szenarien TREMOVE 2.7 und TREMOD 5.04 weisen darauf hin, dass die in der PAREST-Referenz übernommenen Annahmen zur Auswirkung von Euro 5 & 6, EURO VI und Autobahnmaut (vgl. Kapitel 3.2.3) aus heutiger Sicht eher optimistisch waren. Bei der Interpretation der Minderungsraten im Szenario TREMOVE 2.7 muss dazu generell berücksichtigt werden, dass TREMOVE 2.7 auch im Basisjahr 2005 (und darüber hinaus auch für 2000) deutlich von den anderen, TREMOD-basierten Szenarien abweicht.

Insgesamt zeigt sich aber die Größenordnung der Minderungsraten über die verschiedenen Szenarien recht robust, was auch nicht erstaunlich ist, da alle Szenarien als CLE-Szenarien definiert sind.

3.5.2 Referenz-Emissionsszenarien der Schadstoffe im Einzelnen

Im Folgenden sind die Emissionen des Referenzszenarios nach dem Inlandsprinzip dargestellt. D.h. die hier dargestellten Summen gingen in die Modellierung der Immissionssituation in Deutschland ein. Die parallel dazu berechneten Emissionsszenarien nach dem Energiebilanzprinzip sind in Jörß et al. (2010) dokumentiert (vgl. auch Kapitel 3.6).

Tabelle 3-12: PM10-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip

PM10 - Emissionen in Deutschland						
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>						
SNAP	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	12	11	10	10	10
02 Non-industrial combustion plants	Gg	27	29	29	31	33
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	23	20	18	17	16
04 Production processes	Gg	57	52	44	43	43
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	Gg	6	4	4	4	4
06 Solvent and other product use	Gg	9	9	9	9	9
07 Road transport	Gg	92	90	83	78	78
08 Other mobile sources and machinery	Gg	27	21	16	11	8
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	27	26	27	27	28
Summe	Gg	280	262	240	231	228
07_1 Road transport gasoline	Gg	-	-	-	-	-
07_2 Road transport diesel	Gg	26	21	11	5	2
07_4 Road transport non-exhaust (volatilisation)	Gg	-	-	-	-	-
07_5 Road transport non-exhaust (tire, break and road wear)	Gg	19	20	21	21	22
07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)	Gg	47	49	51	52	53

Tabelle 3-13: PM2.5-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip

PM2.5 - Emissionen in Deutschland						
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>						
SNAP	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	10	10	9	9	9
02 Non-industrial combustion plants	Gg	25	27	27	29	30
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	11	9	8	8	8
04 Production processes	Gg	17	16	13	13	12
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	Gg	1	1	1	1	1
06 Solvent and other product use	Gg	9	9	9	9	9
07 Road transport	Gg	40	37	28	21	19
08 Other mobile sources and machinery	Gg	27	21	16	11	8
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	6	6	6	6	6
Summe	Gg	148	136	116	106	101
07_1 Road transport gasoline	Gg	-	-	-	-	-
07_2 Road transport diesel	Gg	26	21	11	5	2
07_4 Road transport non-exhaust (volatilisation)	Gg	-	-	-	-	-
07_5 Road transport non-exhaust (tire, break and road wear)	Gg	10	11	11	12	12
07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)	Gg	5	5	5	5	5

Tabelle 3-14: SO₂-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip

SO₂ - Emissionen in Deutschland						
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>						
SNAP	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	325	290	237	248	257
02 Non-industrial combustion plants	Gg	96	78	48	42	36
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	60	65	62	62	62
04 Production processes	Gg	126	118	101	96	91
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	Gg	10	8	6	6	6
06 Solvent and other product use	Gg	-	-	-	-	-
07 Road transport	Gg	17	1	1	1	1
08 Other mobile sources and machinery	Gg	5	3	1	1	1
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	-	-	-	-	-
Summe	Gg	640	562	456	456	455
07_1 Road transport gasoline	Gg	4	0	0	0	0
07_2 Road transport diesel	Gg	13	0	1	1	1
07_4 Road transport non-exhaust (volatilisation)	Gg	-	-	-	-	-
07_5 Road transport non-exhaust (tire, break and road wear)	Gg	-	-	-	-	-
07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)	Gg	-	-	-	-	-

Tabelle 3-15: NO_x-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip

NO_x - Emissionen in Deutschland						
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>						
SNAP	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	268	283	258	269	282
02 Non-industrial combustion plants	Gg	109	102	105	99	93
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	66	71	69	67	65
04 Production processes	Gg	107	91	73	70	67
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	Gg	-	-	-	-	-
06 Solvent and other product use	Gg	-	-	-	-	-
07 Road transport	Gg	842	684	457	254	164
08 Other mobile sources and machinery	Gg	259	233	201	173	150
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	86	81	83	82	82
Summe	Gg	1736	1544	1246	1015	904
07_1 Road transport gasoline	Gg	233	112	53	29	24
07_2 Road transport diesel	Gg	610	571	405	225	140
07_4 Road transport non-exhaust (volatilisation)	Gg	-	-	-	-	-
07_5 Road transport non-exhaust (tire, break and road wear)	Gg	-	-	-	-	-
07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)	Gg	-	-	-	-	-

Tabelle 3-16: NMVOC-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip

NMVOC - Emissionen in Deutschland						
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>						
SNAP	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	8	8	8	8	8
02 Non-industrial combustion plants	Gg	78	85	85	91	95
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	4	4	4	4	4
04 Production processes	Gg	89	86	80	79	78
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	Gg	40	25	17	14	12
06 Solvent and other product use	Gg	822	743	685	736	800
07 Road transport	Gg	276	153	109	90	82
08 Other mobile sources and machinery	Gg	88	78	71	53	47
09 Waste treatment and disposal	Gg	-	-	-	-	-
10 Agriculture	Gg	253	255	255	255	255
Summe	Gg	1658	1438	1314	1328	1381
07_1 Road transport gasoline	Gg	184	92	54	35	26
07_2 Road transport diesel	Gg	41	38	40	43	45
07_4 Road transport non-exhaust (volatilisation)	Gg	50	23	15	12	11
07_5 Road transport non-exhaust (tire, break and road wear)	Gg	-	-	-	-	-
07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)	Gg	-	-	-	-	-

Tabelle 3-17: NH₃-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip

NH₃ - Emissionen in Deutschland						
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>						
SNAP	Einheit	2000	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	3	3	3	3	3
02 Non-industrial combustion plants	Gg	3	3	3	3	3
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	1	1	1	1	1
04 Production processes	Gg	10	10	10	10	10
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	Gg	-	-	-	-	-
06 Solvent and other product use	Gg	2	2	2	2	2
07 Road transport	Gg	12	11	9	8	8
08 Other mobile sources and machinery	Gg	1	1	1	1	1
09 Waste treatment and disposal	Gg	-	-	-	-	-
10 Agriculture	Gg	572	577	576	579	582
Summe	Gg	604	607	605	607	609
07_1 Road transport gasoline	Gg	12	10	8	7	7
07_2 Road transport diesel	Gg	0	1	1	1	1
07_4 Road transport non-exhaust (volatilisation)	Gg	-	-	-	-	-
07_5 Road transport non-exhaust (tire, break and road wear)	Gg	-	-	-	-	-
07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)	Gg	-	-	-	-	-

3.6 Implikationen für die Einhaltung der NEC-Richtlinie

Um anhand der in PAREST betrachteten Szenarien Rückschlüsse auf die Einhaltung der NEC-Richtlinie²⁵ (EC, 2001) ziehen zu können, ist es sinnvoll und notwendig, die Bilanzierungen nicht nach dem Inlandsprinzip sondern nach dem Energiebilanzprinzip durchzuführen (vgl. Kapitel 3.1). Die Emissionssummen sind nach dem Energiebilanzprinzip niedriger als nach dem Inlandsprinzip und unterscheiden sich im Verkehrsbereich:

Für Deutschland liegen die Annahmen zum abgesetzten Treibstoff (und parallel dazu die Emissionen) für die betrachteten Jahre unter den Annahmen zum in Deutschland verbrauchten Treibstoff. Auch für den Flugverkehr liegt die Menge des auf innerdeutschen Flügen verbrauchten Treibstoffs (internationale Bilanzierung/Energiebilanzprinzip) deutlich unter den Schätzungen für den Verbrauch in der Lande-, Boden- und Startphase (LTO) aller Flüge von und zu deutschen Flughäfen (immissionsrelevant/Inlandsprinzip). Die Wiederaufwirbelung von Straßenstaub wird in den Zusammenstellungen nach dem Energiebilanzprinzip in Anlehnung an Gepflogenheiten der internationalen Emissionsberichterstattung gar nicht berücksichtigt.

²⁵ Die NEC (National Emission Ceilings) Richtlinie von 2001 legt nationale Emissionshöchstmengen für SO₂, NO_x, NMVOC und NH₃ fest, welche die EU-Mitgliedstaaten ab 2010 einhalten müssen. Eine Novelle und Ausweitung auf Feinstaub ist in der Diskussion, ein offizieller Vorschlag liegt aber bisher (Mai 2010) nicht vor. Diskutiert wurden in diesem Zusammenhang neue, schärfere Grenzen für die bisher geregelten Schadstoffe ab 2020, sowie ein prozentuales Minderungsziel für die PM_{2.5}-Emissionen im Jahr 2020 gegenüber 2000.

Vor diesem Hintergrund sind im Folgenden die Emissionszeitreihen im PAREST-Referenzszenario nach dem Energiebilanzprinzip zunächst für die in der NEC-Richtlinie geregelten Schadstoffe SO₂, NO_x, NMVOC und NH₃ dargestellt, und zwar im für die internationale Emissionsberichterstattung üblichen NFR-Code²⁶. Bei den Bilanzen für NO_x und NMVOC ist zu beachten, dass Emissionen dieser Schadstoffe aus der Landwirtschaft von Deutschland zwar international berichtet werden, aber in den offiziellen deutschen Berichten zur Einhaltung der NEC-Richtlinie an die Europäische Kommission nicht berücksichtigt wurden (vgl. UBA, 2002; UBA, 2007). Hintergrund ist, dass die Modellrechnungen mit dem RAINS-Modell²⁷, auf deren Basis die Emissionsobergrenzen der NEC-Richtlinie bestimmt wurden, keine NO_x-²⁸ bzw. NMVOC-²⁹ Emissionen aus der Landwirtschaft berücksichtigten.

Im Anschluss werden noch vergleichbare Tabellen für Feinstaub (PM2.5 und PM10) gezeigt, hier mit einer zusätzlichen Angabe der sich ergebenden Reduktionsrate von 2000 bis 2020, weil eine solche Maßzahl in der Vergangenheit als mögliche Einheit EU-weiter Reduktionsverpflichtungen für PM2.5-Emissionen im Rahmen einer Novelle der NEC-Richtlinie (EC, 2001) diskutiert wurde.

Die im Folgenden vorgestellten Zahlen sind somit vergleichbar mit früheren Forschungsberichten für das UBA, z.B. Jörß und Handke (2007) und Jörß et al. (2007).

Tabelle 3-18: SO₂-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip

Schwefeldioxid - Emissionen in Deutschland [Gg SO ₂]						
<i>PAREST-Referenz – Emissionsberechnung nach dem Energiebilanzprinzip</i>						
NFR	Quellgruppe	2000	2005	2010	2015	2020
1 A	Verbrennung von Brennstoffen	501	432	347	351	355
1 B	Flüchtige Brennstoffemissionen	20	15	10	10	10
2	Industrieprozesse	118	113	99	94	89
6	Abfallwirtschaft	0	0	0	0	0
	Summe	640	560	456	455	454
	Emissionsobergrenze der NEC-RL			520		
	Übererfüllung NEC			-64		

²⁶ NFR – New Format for Reporting, im Rahmen der UN/ECE-Luftreinhalte-Konvention verwendet, sehr stark angelehnt an den CRF-Code (Common Reporting Format) der Klimagasberichterstattung nach der UN-Klimarahmenkonvention.

²⁷ RAINS – Regional Air Pollution and Simulation – wird betrieben am IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Österreich. Zugang zum Modell: <http://www.iiasa.ac.at/web-apps/tap/RainsWeb>

²⁸ Vgl. auch [Cofala und Syri 1998]

²⁹ Vgl. auch [Klimont et al. 2000]

Tabelle 3-19: NO_x-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip

Stickoxid - Emissionen in Deutschland [Gg NO ₂]						
PAREST-Referenz – Emissionsberechnung nach dem Energiebilanzprinzip						
NFR	Quellgruppe	2000	2005	2010	2015	2020
1 A	Verbrennung von Brennstoffen	1590	1.248	975	772	677
2	Industrieprozesse	111	94	76	74	71
4	Landwirtschaft *	86	81	83	82	82
6	Abfallwirtschaft	0	0	0	0	0
	Summe	1787	1423	1135	929	830
	Summe NEC-relevant *	1701	1342	1052	846	748
	Emissionsobergrenze der NEC-RL			1051		
	Deckungslücke NEC			1		

* Die NO_x- Emissionen der Landwirtschaft werden im vorliegenden Bericht nicht bei der Beurteilung der Einhaltung der Emissionsobergrenzen der NEC-Richtlinie [EC 2001] berücksichtigt.

Tabelle 3-20: NMVOC-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip

NMVOC - Emissionen in Deutschland [Gg NMVOC]						
PAREST-Referenz – Emissionsberechnung nach dem Energiebilanzprinzip						
NFR	Quellgruppe	2000	2005	2010	2015	2020
1 A	Verbrennung von Brennstoffen	419	289	240	217	212
1 B	Flüchtige Brennstoffemissionen	66	47	36	33	31
2	Industrieprozesse	64	65	62	60	59
3	Produktanwendungen	822	743	685	736	800
4	Landwirtschaft *	253	255	255	255	255
	Summe	1624	1399	1278	1301	1357
	Summe NEC-relevant *	1371	1144	1023	1046	1102
	Emissionsobergrenze der NEC-RL			995		
	Deckungslücke NEC			28		

* Die NMVOC- Emissionen der Landwirtschaft werden im vorliegenden Bericht nicht bei der Beurteilung der Einhaltung der Emissionsobergrenzen der NEC-Richtlinie [EC 2001] berücksichtigt

Tabelle 3-21: NH₃-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip

Ammoniak - Emissionen in Deutschland [Gg NH ₃]						
PAREST-Referenz – Emissionsberechnung nach dem Energiebilanzprinzip						
NFR	Quellgruppe	2000	2005	2010	2015	2020
1 A	Verbrennung von Brennstoffen	19	18	16	15	15
2	Industrieprozesse	10	10	10	10	10
3	Produktanwendungen	2	2	2	2	2
4	Landwirtschaft	572	577	576	579	582
	Summe	603	606	604	606	609
	Emissionsobergrenze der NEC-RL			550		
	Deckungslücke NEC			54		

Tabelle 3-22: PM2.5-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip

PM2.5 - Emissionen in Deutschland [Gg]							
PAREST-Referenz – Emissionsberechnung nach dem Energiebilanzprinzip							
NFR	Quellgruppe	2000	2005	2010	2015	2020	Reduktion 2000 bis 2020
1 A	Verbrennung von Brennstoffen	82	71	56	49	46	
1 B	Flüchtige Brennstoffemissionen	0	0	0	0	0	
2	Industrieprozesse	19	17	14	13	13	
4	Landwirtschaft	5	5	5	5	5	
6	Abfallwirtschaft	0	0	0	0	0	
7	Sonstiges *	31	29	28	29	29	
	Summe	137	122	103	96	92	33%

* Enthält die Abriebemissionen des Straßenverkehrs; die Wiederaufwirbelung von Straßenstaub wird in dieser Darstellung nach dem Energiebilanzprinzip überhaupt nicht berücksichtigt.

Tabelle 3-23: PM10-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip

PM10 - Emissionen in Deutschland [Gg]							
PAREST-Referenz – Emissionsberechnung nach dem Energiebilanzprinzip							
NFR	Quellgruppe	2000	2005	2010	2015	2020	Reduktion 2000 bis 2020
1 A	Verbrennung von Brennstoffen	86	75	59	52	49	
1 B	Flüchtige Brennstoffemissionen	1	1	0	0	0	
2	Industrieprozesse	48	44	38	37	35	
4	Landwirtschaft	20	20	22	22	23	
6	Abfallwirtschaft	0	0	0	0	0	
7	Sonstiges *	73	65	61	62	62	
	Summe	227	204	181	173	171	25%

* Enthält die Abriebemissionen des Straßenverkehrs; die Wiederaufwirbelung von Straßenstaub wird in dieser Darstellung nach dem Energiebilanzprinzip überhaupt nicht berücksichtigt.

Während die nationale Emissionshöchstmenge (National Emission Ceiling, NEC) 2010 für SO₂ im Referenzszenario also mit großem Abstand eingehalten wird, werden die NECs 2010 für NMVOC und NH₃ in diesem Szenario deutlich verfehlt. Für NO_x errechnet sich eine Punktlandung (Verfehlung der NEC 2010 um 0.9 Gg NO₂).

Eine Einordnung dieser Ergebnisse in die Bandbreite der betrachteten CLE-Szenarien zeigt Tabelle 3-24. Hier erhärtet sich das Bild des PAREST-Referenzszenarios für SO₂ (deutliche Übererfüllung der NEC) sowie für NH₃ und NMVOC (Verfehlen der NEC). Für NO_x ergibt sich ein sehr uneindeutiges Bild: Nach dem Szenario MMS würde die NEC eingehalten werden, nach den Szenarien TREMOVE 2.7 und TREMOD 5.04 würde sie verfehlt.

Tabelle 3-24: Emissionen 2010 (Energiebilanzprinzip / NEC) in verschiedenen CLE-Szenarien

Emissionen 2010 in verschiedenen CLE-Szenarien				
<i>Emissionsberechnung nach dem Energiebilanzprinzip [Gg]</i>				
<i>NEC-relevante Emissionen (ohne NO_x und NMVOC aus Landwirtschaft)</i>				
Szenario	SO₂	NO_x	NH₃	NMVOC
PAREST-Referenz	456	1.052	604	1.023
MMS	484	1.031	603	1.018
TREMOVE 2.7 *	456	1.291	604	1.059
TREMOD 5.04	456	1.111	604	1.020
NEC	520	1.051	550	995

* Aus TREMOVE 2.7 lag für [Kugler et al. 2010] keine Energiebilanzkorrektur vor. Deshalb werden hier für den Straßenverkehr Inlandsdaten verwendet.

Es muss hier aber betont werden, dass die für 2010 berechneten Emissionen NICHT auf aktuellen statistischen Daten zu emissionsverursachenden Tätigkeiten beruhen, sondern ein Szenario aus der Sicht des Basisjahres 2005 darstellen. In all diesen Betrachtungen sind z.B. etwaige Auswirkungen der seit Ende 2008 zu beobachtenden Wirtschaftskrise nicht enthalten. Auch die während der Projektbearbeitung aktuellsten vorliegenden Daten der Emissionsberichterstattung zum Berichtsjahr 2008 können dazu keinen eindeutigen Hinweis geben.

Ähnliche Übersichten für das Jahr 2020 enthalten Tabelle 3-25 und Tabelle 3-26. Diese Werte können benutzt werden, um etwaige Grenzwertvorschläge einer Novelle der NEC-Richtlinie (EC, 2001) vor dem Hintergrund von PAREST zu bewerten.

Tabelle 3-25: Emissionen 2020 (Energiebilanzprinzip / NEC) in verschiedenen CLE-Szenarien

Emissionen 2020 in verschiedenen CLE-Szenarien						
<i>Emissionsberechnung nach dem Energiebilanzprinzip [Gg]</i>						
<i>NEC-relevante Emissionen (ohne NO_x und NMVOC aus Landwirtschaft)</i>						
Szenario	PM₁₀	PM_{2,5}	SO₂	NO_x	NH₃	NMVOC
PAREST-Referenz	171	92	454	748	609	1.102
MMS	166	88	444	684	608	1.081
TREMOVE 2.7 *	164	92	454	958	609	1.070
TREMOD 5.04	171	93	454	824	609	1.103

* Aus TREMOVE 2.7 lag für [Kugler et al. 2010] keine Energiebilanzkorrektur vor. Deshalb werden hier für den Straßenverkehr Inlandsdaten (ohne Wiederaufwirbelung) verwendet.

Tabelle 3-26: Emissionsentwicklung 2000 bis 2020 für PM (Energiebilanzprinzip / NEC) in verschiedenen CLE-Szenarien

PM-Emissionsreduktion 2000 bis 2020 in verschiedenen CLE-Szenarien		
<i>Emissionsberechnung nach dem Energiebilanzprinzip $[(EM_{2020} / EM_{2000}) - 1; \%]$</i>		
Szenario	PM₁₀	PM_{2,5}
PAREST-Referenz	-25%	-33%
MMS	-27%	-36%
TREMOVE 2.7 *	-26%	-34%
TREMOD 5.04	-25%	-32%
* Aus TREMOVE 2.7 lag für [Kugler et al. 2010] keine Energiebilanzkorrektur vor. Deshalb werden hier für den Straßenverkehr Inlandsdaten (ohne Wiederaufwirbelung) verwendet.		

Es zeigt sich, dass die Emissionsprojektionen für 2020 außer für NO_x recht nah zusammen liegen, die Abweichungen liegen (außer für NO_x) im niedrigen einstelligen Prozentbereich. Für robuste Szenarien der NO_x-Emissionen sollten insbesondere die besonders bedeutenden und unsicheren Quellgruppen Stromerzeugung, Verkehr/ mobile Quellen sowie Landwirtschaft³⁰ untersucht werden.

³⁰ Es ist davon auszugehen, dass die NO_x- und NMVOC-Emissionen der Landwirtschaft nicht mehr unbegrenzt lange aus europäischen Verpflichtungen zur Emissionsbegrenzung heraus definiert werden können.

4 Berechnung von räumlich hochaufgelösten Emissionen für Deutschland

Auf Grundlage der für das PAREST-Projekt erstellten Emissionsinventare (vgl. Kapitel 3 bzw. Jörß et al., 2010) wurde eine räumliche und vertikale Allokation der Emissionen vorgenommen. Im Projekt wurden erstmals Emissionsdaten für Deutschland mit einer Auflösung von 1 Bogenminute x 1 Bogenminute Breitengrad (1/60 Grad) in geographischer Projektion auf Basis der ZSE-Datenbasis (ZSE, 2007) generiert, auf Grundlage des Inlandsprinzips (Jörß et al., 2010) modifiziert und um internationale Schifffahrtaktivitäten auf Binnengewässern ergänzt. Das Ergebnis waren räumlich und vertikal hoch aufgelöste Emissionsdatensätze für Deutschland für alle betrachteten Luftschadstoffe und Jahre. Die im Rahmen des PAREST-Projekts angewendete Methodik zur räumlichen Auflösung der Emissionen ist in Abbildung 4-1 dargestellt und in Thiruchittampalam et al. (2010a) ausführlich beschrieben.

Der erste Schritt der räumlichen Verteilung war die Unterteilung der nach Sektor und Schadstoff in Jörß et al. (2010) berechneten Emissionsmengen für die einzelnen Referenzjahre in Punkt-, Linien- und Flächenquellen. Dabei wurden die Emissionen administrativen Einheiten zugeordnet, da die meisten Verteilparameter auf administrativer Ebene (Kreise, Regionen, Bundesländer, etc.) verfügbar waren. In einem zweiten Schritt wurden die auf administrativer Ebene räumlich aufgelösten Emissionen dem Zielgitter zugeordnet.

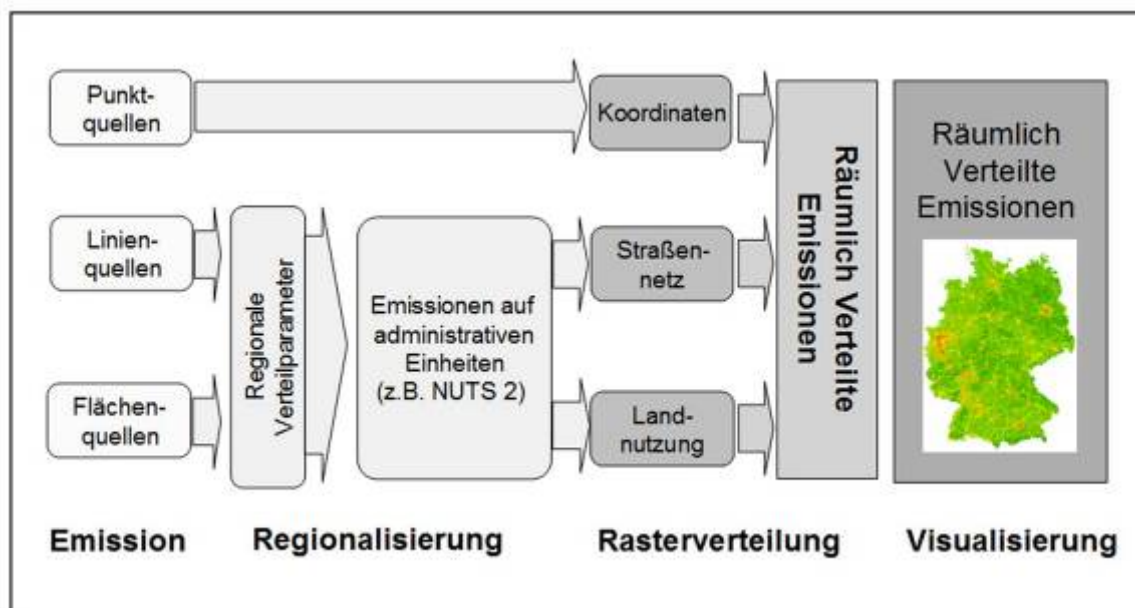


Abbildung 4-1: Methode zur räumlichen Auflösung der Emissionen

Die Gitterzuordnung von Punktquellen (Kraftwerke, Flughäfen, etc.) erfolgte anhand ihrer Koordinaten. Linienquellen (Straßenverkehr, Schifffahrt, usw.) wurden mit Hilfe von Verkehrsvolumina und Fahrleistungen hinsichtlich ihrer Quellstärke administrativen Einheiten zugeordnet. Die geografische Referenzierung erfolgte mittels digitaler Verkehrsnetze. Flächenquellen wurden mit Hilfe von sozioökonomischen Informationen, beispielsweise Beschäftigtenzahlen untergliedert nach Wirtschaftszweigen oder landwirtschaftliche Tierzahlen, administrativen Einheiten zugeordnet. Die Gitterzuordnung der Emissionen resultierte aus der

Zuordnung der betreffenden Emissionsquellen zur zugehörigen Landnutzungs-kategorie. Die geographische Referenzierung der einzelnen Sektoren wird exemplarisch in Abbildung 4-2 veranschaulicht.

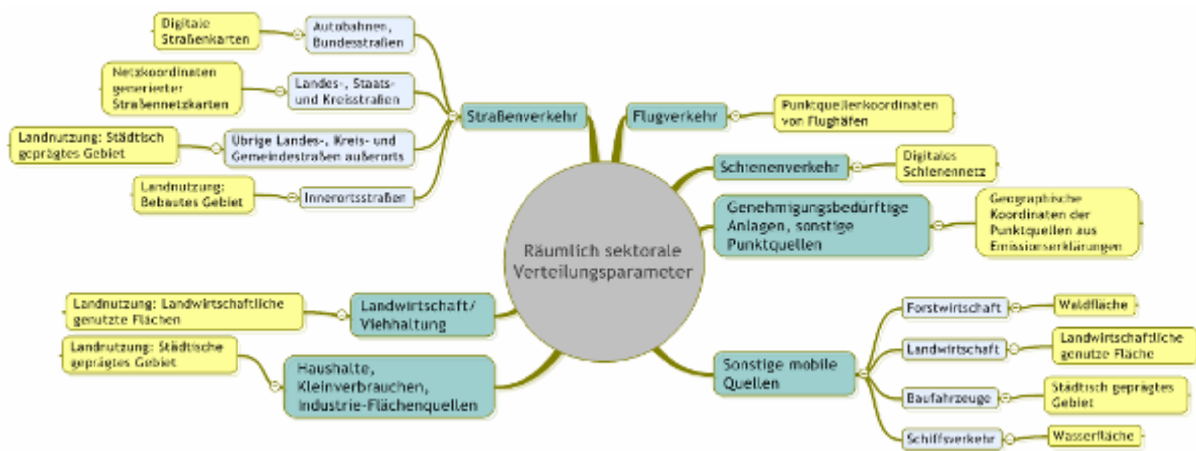


Abbildung 4-2: Beispiele zur geographischen Referenzierung von Emissionsquellen

Das Vorgehen bei der räumlichen Auflösung von Emissionen kann als ein Vektoransatz verstanden werden. Als Vektor wird hier ein Satz von Parametern bezeichnet, der die Verteilung eines Jahresemissionswertes beschreibt (Wickert, 2001). Prinzipiell kann die räumliche Verteilung nach Formel 1 beschrieben werden. Eine genauere Beschreibung der einzelnen Parameter sowie des Modellierungsgebietes wird im Folgenden gegeben.

Formel 1(Wickert, 2001):

$$E_i = \sum_j E_{Q_j} \alpha_{i, Q_j}$$

E_i	Emission der Gitterzelle i
α_{i, Q_j}	Anteil der Zelle i an der Emission der Quelle Q_j
E_{Q_j}	Emission der Quelle Q_j

Das im Rahmen des PAREST-Projekts erstellte Modellraster für Deutschland beträgt 1 Bogenminute x 1 Bogenminute Breitengrad (1/60 Grad) in geographischer Projektion. Das Modellgebiet umfasst eine Fläche mit den Eckkoordinaten: linke untere Ecke: 5.85 Grad geographische Länge, 47.2667 Grad geographische Breite und rechte obere Ecke: 15.05 Grad geographische Länge, 55.0667 Grad geographische Breite und umfasst damit 258336 Rasterzellen, 468 Zeilen und 552 Spalten. Die Fläche einer Zelle liegt in der Größenordnung von 2 km². Von Nord nach Süd nimmt die Zellfläche von 1.97 km² auf 2.35 km² zu, im Mittel über alle Zellen beträgt sie 2.16 km². Die Größe und Fläche einer Rasterzelle im Gebiet Berlin ist in Abbildung 4-3 zu sehen. Von den 258336 Zellen des Modellrasters liegen 165204 innerhalb der Grenzen Deutschlands. Die Fläche Deutschlands beträgt 357323.5 km². Zum Vergleich: die statistischen Ämter des Bundes und der Länder geben für Deutschland eine Fläche von 357114.2 km² an.

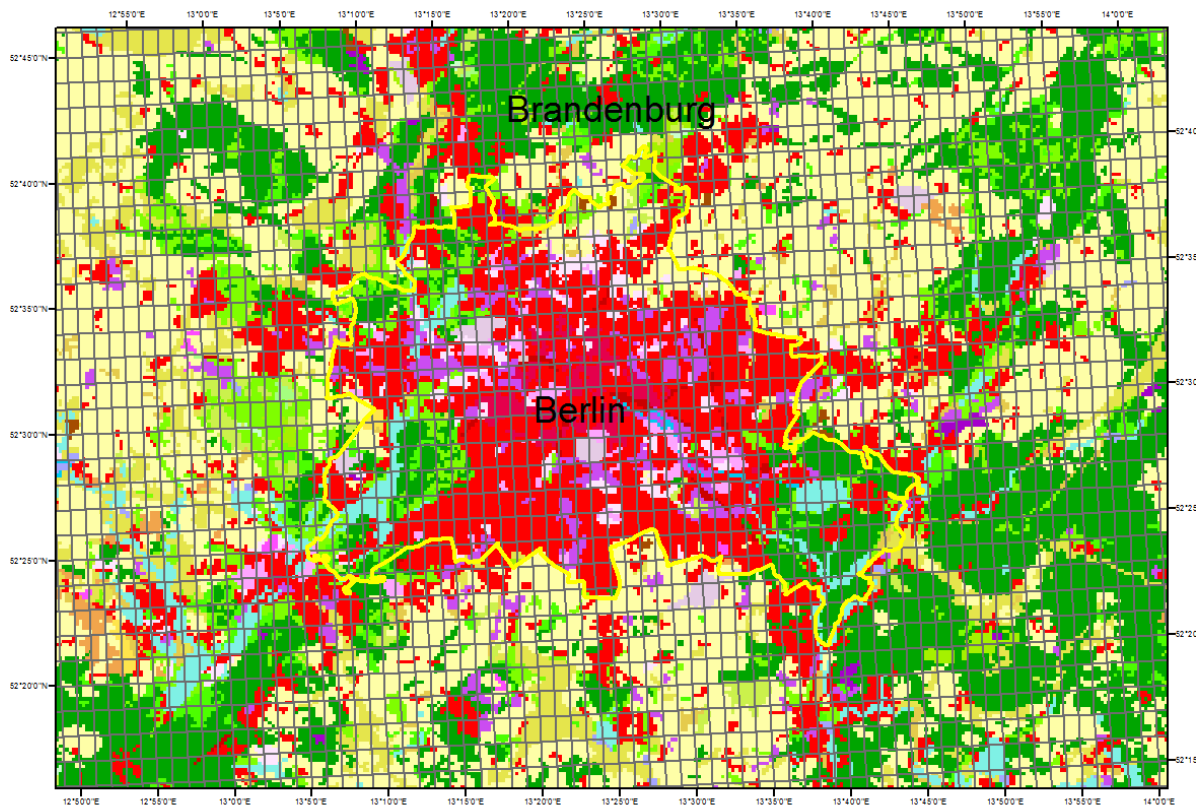


Abbildung 4-3: Größe der Rasterzellen bezogen auf Berlin

Die räumliche Verteilung wird mit Hilfe von Indikatoren durchgeführt. Die Indikatoren lassen sich prinzipiell in drei Hauptkategorien unterteilen: Indikatoren für Punkt-, Linien und Flächenflächen.

Punktquellen sind als einzelne Emissionsquellen mit sehr hoher Emissionsrate und relativ geringer räumlicher Ausdehnung definiert. Beispiele für Punktquellen sind Kraftwerks- und Industrieanlagen, größere Flughäfen, usw. (Schwarz, 2002). Die geografische Verortung (vgl. Abbildung 4-4) von Punktquellen auf dem Gitter findet mittels Koordinaten statt. Die räumliche Verteilung benötigt darüber hinaus noch Informationen, welche eine Aussage über die Kapazität erlauben. Dies ist notwendig, um die Emissionsanteile der jeweiligen Punktquelle an der Gesamtemission der Quellgruppe zu berechnen. Für Punktquellen ist die vertikale effektive Emissionshöhe von großer Relevanz. In Tabelle 4-1 sind die auf Grundlage von Pregger und Friedrich (2009) berechneten effektiven Emissionshöhen für ausgewählte Punktquellen dargestellt. Es wurde eine neutrale Schichtung sowie eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4 m/s angenommen.

Linienquellen haben einen linienförmigen Verlauf und eine vernachlässigbare Breite. Zu den Linienquellen zählen ausschließlich Transportwege für Personen und Güter, d.h. der Straßenverkehr, Eisenbahnen, Schiffe und - von untergeordneter Bedeutung – auch Pipelines (Schwarz, 2002). Die Georeferenzierung von Linienquellen wird mittels digitaler Verkehrsnetze durchgeführt. Die Zuordnung der Emissionen zu den einzelnen Linienquellenabschnitten erfolgt anhand der Verkehrsvolumina der einzelnen Transportträger. Mittels der Zählstellennummern der automatischen und manuellen Zählraten auf Bundesautobahnen und Bundesstraßen wurden die Ergebnisse der Zählungen den entsprechenden Straßenabschnitten der digitalen Straßenkarten zugeordnet.

Flächenquellen haben eine flächenhafte Ausdehnung oder bestehen aus vielen zusammenhängenden Quellen, welche auch als Flächenquelle aufgefasst werden können. Beispiele für Flächenquellen sind Emissionen aus der Landwirtschaft oder Haushalten. Die Auflösung von Flächenquellen findet über Indikatoren wie Tierzahlen, die Bevölkerungsdichte und Landnutzungsdatensätzen statt.

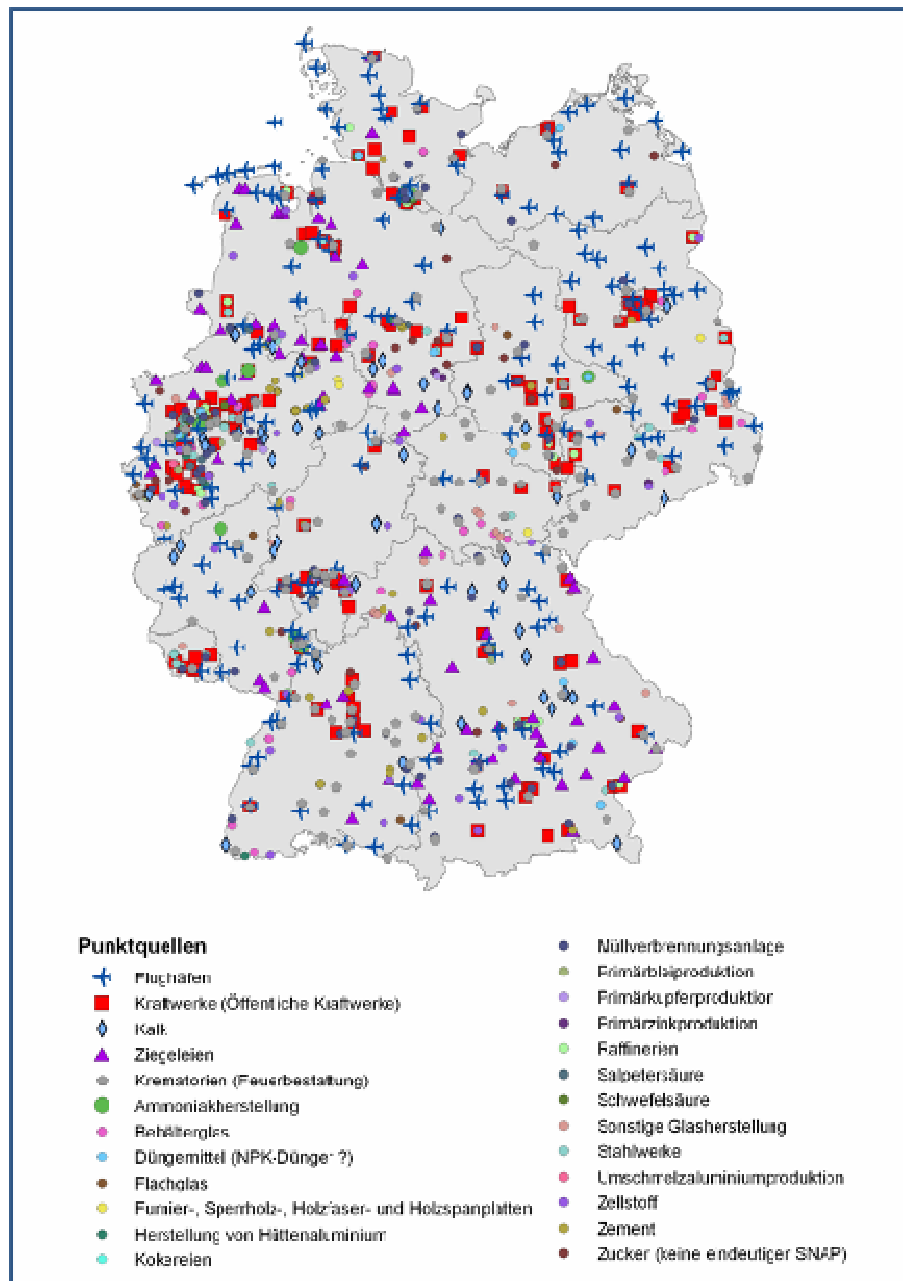


Abbildung 4-4: In PAREST-Projekt verwendete Punktquellen

Tabelle 4-1: Auf Grundlage von Pregger und Friedrich (2009) angenommene effektive Emissionshöhen für ausgewählte Punktquellentypen (Neutrale Schichtung, mittlere Windgeschwindigkeit von 4 m/s)

Punktquellenkategorie	Effektive Höhe [m]
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem ET: Abfall	377
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Braunkohle (<50 MW)	95
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Braunkohle (>50 MW)	388
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Erdgas (<50 MW)	95
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Erdgas (>50 MW)	367
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Gichtgas	135
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Heizöl (leicht) (<50 MW)	95
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Heizöl (leicht) (>50 MW)	388
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Heizöl (schwer) (>50 MW)	388
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Raffineriegas	226
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Steinkohle (<50 MW)	95
Standorte und Leistung von Kraftwerken mit dem Energieträger Steinkohle (>50 MW)	388
Sinteranlage	445
Walzwerke	191
Stahlherstellung Integriertes Hüttenwerk (Hochofen-, Stahl- u. Walzwerk)	191
Elektrostahlwerk	191
Standorte und Kapazitäten von Blei Produktion	224
Standorte und Kapazitäten von Zink Produktion	224
Standorte und Kapazitäten von Kupfer Produktion	224
Standorte und Kapazitäten von Alu Produktion Sekundär	224
Standorte und Kapazitäten von Zement Produktion	182
Standorte und Kapazitäten von Kalk Produktion	95
Standorte und Kapazitäten von Flachglas Produktion	95
Standorte und Kapazitäten von Behälterglas Produktion	95
Standorte und Kapazitäten von sonstige Glasproduktion	95
Standorte und Kapazitäten von Ziegel Produktion	116
Standorte und Kapazitäten von Aluminium Produktion (Primär)	224
Standorte und Kapazitäten von Schwefelsäure Produktion	148
Standorte und Kapazitäten von Salpetersäure Produktion	148
Standorte und Kapazitäten von Ammoniak Produktion	148
Standorte und Kapazitäten von NPK Düngemittel Produktion	148
Herstellung von Furnier-, Sperrholz-, Holzfaser- und Holzspanplatten	148
Standorte und Kapazitäten Zuckerherstellung	53
Standorte und Kapazitäten von Zellstoffproduktion	377
Standorte und Kapazitäten Kokereien	52
Standorte und Kapazitäten von Müllverbrennungsanlagen	172
Keramische Erzeugnisse	116
Anzahl der Kremierungen und Standort von Krematorien	172

Im Rahmen des PAREST-Projekts wurde auch eine neue Methode zur räumlichen Verteilung der Emissionen aus Holzbrennstoffen aus Kleinf Feuerungen entwickelt, die ausführlich in Thiruchittampalam et al. (2010a) beschrieben ist. Die räumliche Verteilung des Holzverbrauchs zeigt Abbildung 4-5 (linke Karte). Deutlich sichtbar ist der höhere Holzverbrauch pro Rasterzelle in Regionen hoher Bevölkerungsdichte (z.B. Berlin) und in Regionen mit hohem Waldanteil (z. B. Schwarzwald). Basierend auf dem Waldscheitholzverbrauch ist in Abbildung 4-5 (rechte Karte) die räumliche Verteilung der PM10-Emissionen aus dem Holzeinsatz in Kleinf Feuerungen dargestellt.

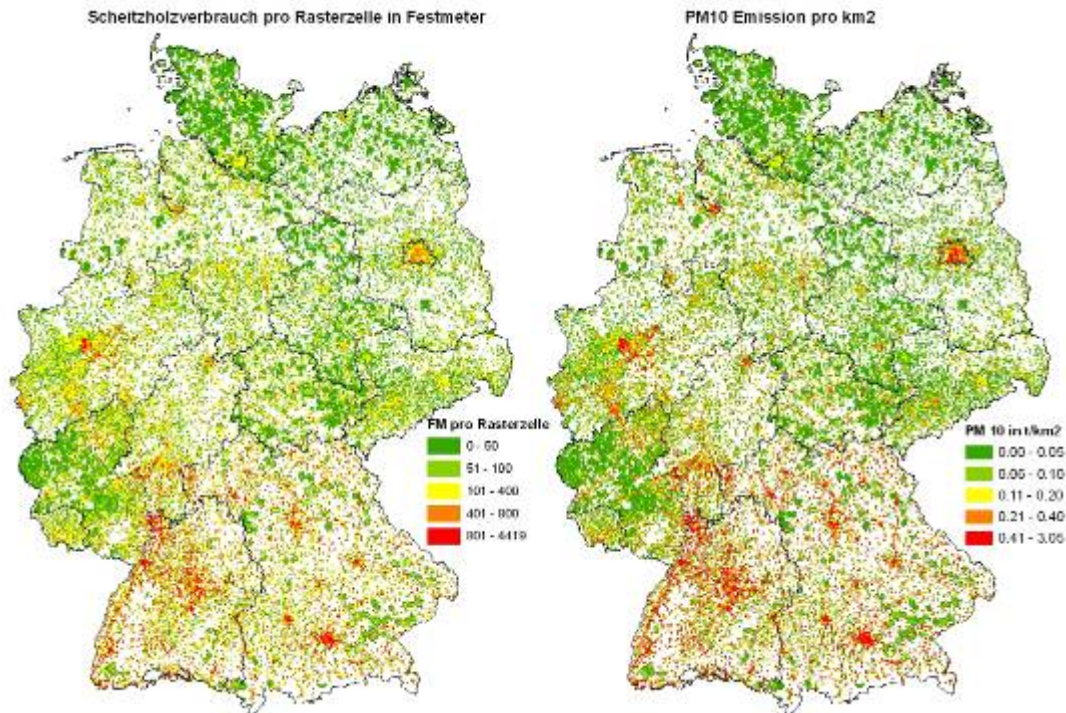


Abbildung 4-5: Räumliche Verteilung des Wald-Scheitholzverbrauchs in Deutschland (links) und daraus resultierende Verteilung der PM10 Emissionen aus Kleinf Feuerungen in Privathaushalten - Brennstoff Holz - (rechts)

Das Ergebnis der räumlichen Auflösung der PM10-Emissionen in Deutschland für das Basisjahr 2005 ist in Abbildung 4-6 der räumlichen Auflösung der PM10-Emissionen für das Referenzjahr 2020 (CLE) gegenübergestellt. In Abbildung 4-7 ist die räumliche Auflösung der NO_x-Emissionen in Deutschland für das Basisjahr 2005 und für das Referenzjahr 2020 (CLE) dargestellt.

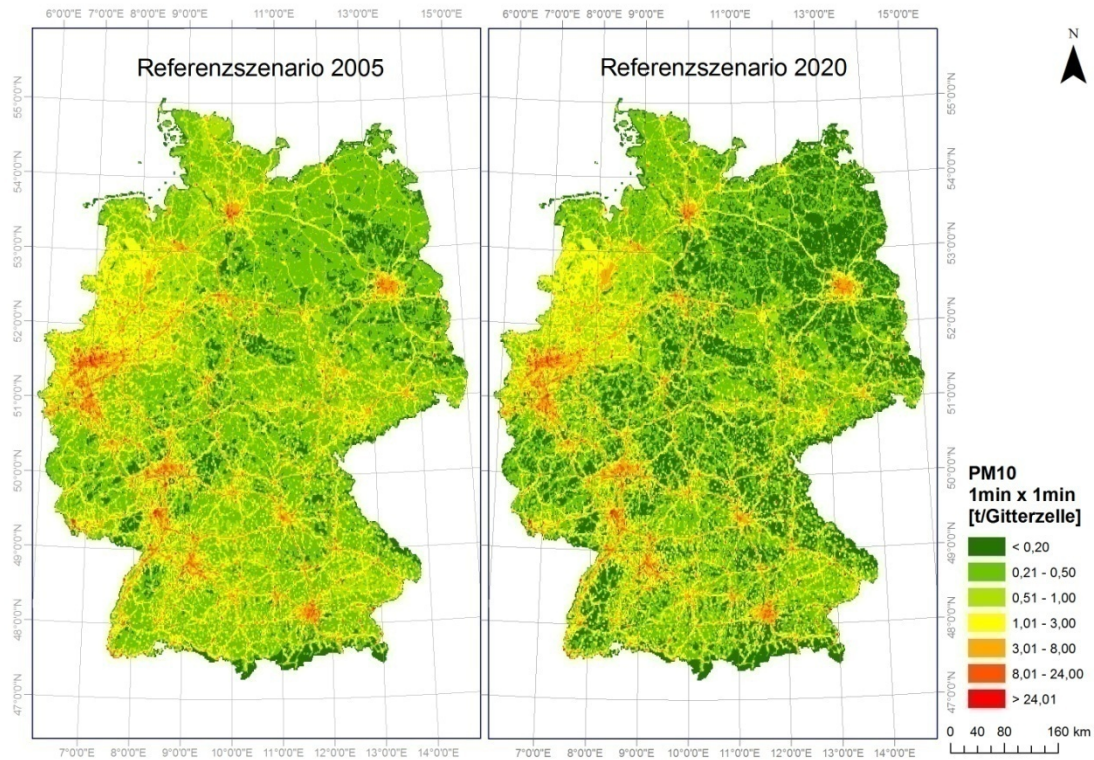


Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der PM10-Emissionen in Deutschland für das Basisjahr 2005 und für das Referenzjahr 2020 (CLE) in 1min x 1min Auflösung.

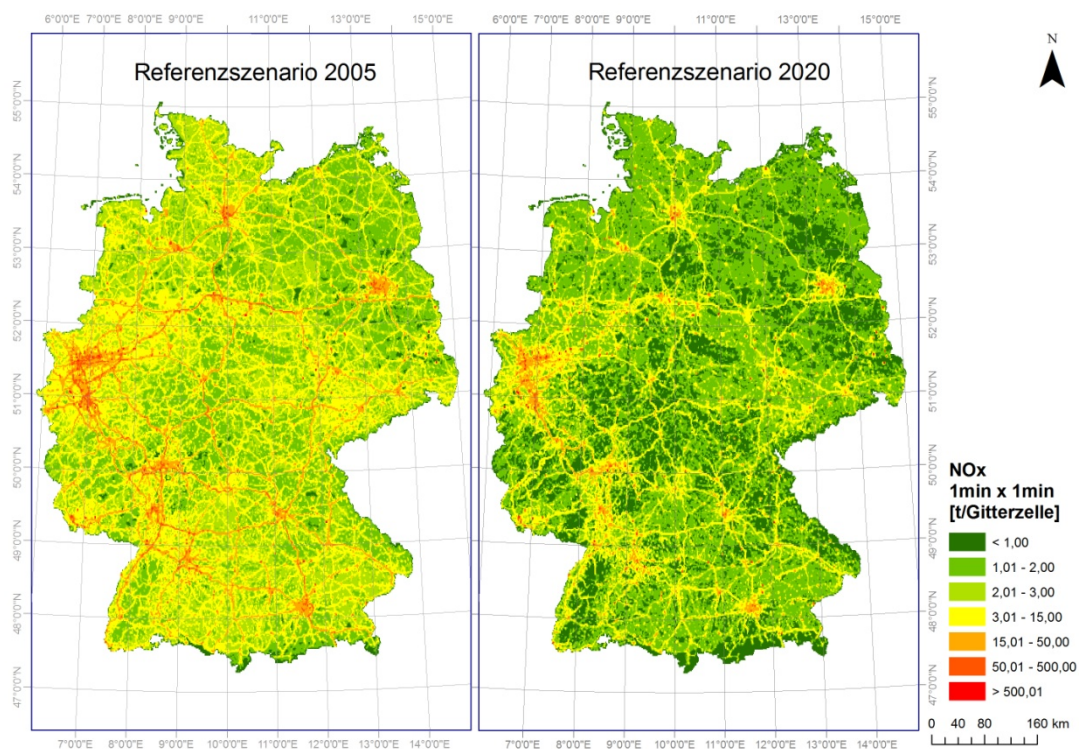


Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der NO_x-Emissionen in Deutschland für das Basisjahr 2005 und für das Referenzjahr 2020 (CLE) in 1min x 1min Auflösung

5 Referenzszenarien Europäischer Hintergrund und räumliche Verteilung

Eine transparente und konsistente Emissionsdatenbasis ist für die Modellierung der Luftqualität mit Hilfe von Chemie-Transport-Modellen eine notwendige Voraussetzung. Nur so kann sowohl die heutige Luftqualitätssituation als auch die Luftqualität in künftigen Jahren auf Basis der geltenden rechtlichen Regelungen (Current Legislation) in ausreichendem Maße modelliert werden. Darüber hinaus können die Auswirkungen von Maßnahmen, technologischen Entwicklungen und anderen davon unabhängigen Trends emissionsseitig und immissionsseitig evaluiert werden. Es wurde daher von der TNO eine Europäische Emissionsdatenbasis erstellt, auf deren Basis es möglich war, Strategien zur Reduzierung der Feinstaubbelastung der Bevölkerung in Deutschland unter Berücksichtigung des Europäischen Hintergrundes zu entwickeln. Eine kritische Beurteilung früherer Emissionsdatensätze zeigte, dass die für die meisten Quellgruppen bisher angewendeten Verteilparameter veraltet oder für die im PAREST-Projekt angestrebte räumliche Auflösung der Emissionen nicht geeignet waren. Es wurde ein Europäischer Emissionsdatensatz für die Luftschadstoffe NO_x, SO₂, NMVOC, CH₄, NH₃, CO sowie für primäre PM₁₀- und PM_{2.5}-Emissionen für das Jahr 2005 und die Jahre 2010, 2015 und 2020 in einer Auflösung von 7 x 8 km² erstellt.

Zur Erstellung der Europäischen Emissionsdatenbasis für das Basisjahr 2005 wurden, soweit vorhanden, die von den jeweiligen Ländern offiziell berichteten Emissionsdatensätze verwendet, die auf der Website der Europäischen Umweltagentur (EEA) verfügbar waren (EEA, 2008). Das Zurückgreifen auf national verfügbare Informationen und Expertenwissen, erhöht auch die politische Akzeptanz der verwendeten Emissionsdatensätze für den europäischen Hintergrund. Teilweise enthielten die Emissionsdatensätze einzelner Länder Lücken und/oder Fehler. Deswegen wurden verschiedene Konsistenzchecks durchgeführt. In Einzelfällen wurden insbesondere Emissionsabschätzungen aus dem GAINS Modell³¹ des International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) (<http://gains.iiasa.ac.at/>) zur Füllung dieser Lücken verwendet oder Default-Werte abgeschätzt. In Tabelle 5-1 sind die für das Basisjahr 2005 angenommenen europäischen Emissionsmengen der betrachteten Luftschadstoffe dargestellt.

³¹ GAINS - Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies

Tabelle 5-1: Europäische Emissionen für das Basisjahr 2005

2005	kt/a	NO _x	NM VOC	SO _x	NH ₃	CO	PM _{2.5}	PM ₁₀
BY	Belarus	158.6	188.8	77	135.5	531.7	25.3	39.4
AL	Albania	24.9	31.5	31.6	24.1	112.6	6.8	10.6
AM	Armenia	8.6	26.7	10.3	14.6	74.4	4.8	6.7
AT	Austria	225.7	157.2	26.4	63.9	720.3	26.8	52.7
GE	Georgia	52.2	53.2	14.4	38.1	347.5	7	10.3
BE	Belgium	295	200.5	146.6	74.2	875.5	30.2	53.7
BG	Bulgaria	233.9	158.1	900.3	57	740.3	56.2	95.6
BA	Bosnia and Herzegovina	51.9	47	426.8	17.3	182.3	19.4	46
CH	Switzerland	86.4	105.7	17.4	55	334.9	9.8	27.2
CY	Cyprus	4.8	5.7	2	3.2	19.7	0.8	1.9
CZ	Czech Republic	277.9	182.8	218.6	68.4	510.8	21.4	40.4
DE	Germany	1544	1437.5	561.6	606.9	4042.4	135.8	262.5
DK	Denmark	185.8	119.6	21.9	92.5	611.2	28.2	42.9
ES	Spain	1497.2	1069.9	1341.5	430.2	2296.6	148.6	295.9
EE	Estonia	32.1	36	77.2	9.3	158.1	20.6	28.5
FI	Finland	177.4	131.3	69.1	36.2	521.9	34.4	54.9
FR	France	1206.9	1443.2	465.5	735.2	5676.5	337.9	608.4
GB	United Kingdom	1626.9	978.3	706.2	317.5	2416.5	101.4	220.1
GR	Greece	316.6	360.1	536.5	72.8	636.4	55.3	89.8
HU	Hungary	204.3	177.1	485.5	80.1	587.1	39.1	62.1
IE	Ireland	116	61.5	70.1	112.7	222.3	15.5	29.9
IT	Italy	1173	1258.2	496.9	426	4206.9	125.6	270.8
LT	Lithuania	57.6	82.1	43.7	39.4	190.3	16.9	23.2
LU	Luxembourg	15.1	13.1	2.9	5.3	41.3	2.9	7
LV	Latvia	41.5	64.5	10.3	13.9	336.6	13.6	17.1
MD	Republic of Moldova	65.9	38.3	123.8	26.7	140.3	25.1	46.9
MK	The former Yugoslav	39.1	25.5	105	7.4	103.9	9.1	20.2
NL	Netherlands	346.9	176.4	62.3	135.2	602.7	22.1	52.6
NO	Norway	190.2	219.7	23.9	23	441.4	49.3	60.1
PL	Poland	720.5	880.4	1222.1	326.5	3333.4	139.2	305.5
PT	Portugal	270.6	288.4	213.5	71.8	627	38.8	61.8
RO	Romania	309.1	402.3	685.8	194.1	1405.1	103.5	155.8
RU	Russian Federation (nur im Modellgebiet)	2742.1	2724.8	2701.6	764.1	13005.5	951	1566.5
SK	Slovakia	98	79.2	89	26.9	299.5	16.4	27.7
SI	Slovenia	57.7	43.4	41.8	18.3	82.5	7.2	10.4
SE	Sweden	204.8	196.2	39.7	52.4	602	33.4	58.4
TR	Turkey	931.7	785.3	1792.2	410	2825.1	272.2	424.2
UA	Ukraine	1183.3	703.5	1192.9	552.6	2923.4	306.6	526.9
YU	Yugoslavia	164.7	146.1	375.1	67.6	314.8	42.8	86.2
HR	Croatia	68.9	92.8	60.3	44.2	311.1	16.9	26.3
AZE	Azerbaijan	113.3	280.8	185.4	50.8	174.5	18.7	31.9
ATL	ALL OCEANS	3175	108.2	2227.7	0	320.8	242.5	256
MT	Malta	11.8	8.8	8.3	1	0	0.5	1.3

Die generierten und verwendeten Emissionsdatensätze unterscheiden etwa 200 Quellgruppen. Diese Quellgruppen wurden zu den sogenannten SNAP97 Kategorien³² (z.B. energy production and conversion (SNAP1), residential combustion (SNAP2), road transport (SNAP7)) aggregiert. Für jede Quellgruppe auf SNAP-Level 1 wurde eine Aufteilung der Emissionen in Punktquellen und Flächenquellen vorgenommen. Typische Punktquellen sind Kraftwerke, Raffinerien und wichtige Industrieanlagen wie z.B. Eisen- und Stahlwerke. Typische Flächenquellen sind der Straßenverkehr, die Tierhaltung und der Hausbrand (Kleinf Feuerungen). Hierbei ist zu beachten, dass im Emissionsmodell für Deutschland Punkt-, Flächen- und Linienquellen unterschieden wurden, im europäischen Emissionsmodell erfolgte dagegen lediglich eine Aufteilung in Punkt- und Flächenquellen. Ob eine weitere Unterscheidung zwischen Flächen- und Linienquellen gemacht wird oder nicht, ist letztlich eine Definitionsfrage. Im Ergebnis ergeben sich durch die unterschiedlichen Herangehensweisen keine großen Unterschiede. Für die Punktquellen wurde eine neue sehr detaillierte Datenbasis erstellt. Für die Flächenquellen wurden neue geographische Verteilparameter festgelegt, z.B. wurde die Bevölkerungsdichte als räumlicher Verteilparameter der Emissionen aus Kleinf Feuerungen neu definiert, und es wurden aktualisierte Datensätze verwendet.

In Abbildung 5-1 sind beispielhaft die in PAREST räumlich aufgelösten NO_x-Emissionen für Europa im Basisjahr 2005 dargestellt. Die wichtigsten Quellen von NO_x, der Straßenverkehr, die Bevölkerungszentren, die in enger Relation zu Emissionen aus den Quellgruppen Straßenverkehr und andere mobile Maschinen (z.B. Baumaschinen) stehen, Binnenwasserstrassen und internationale Schiffsrouten sind in Abbildung 5-1 deutlich zu erkennen.

Für die Erstellung der Referenzemissionsdatensätze für die Luftschadstoffe NO_x, SO₂, NMVOC, CH₄, NH₃, CO, PM10 und PM2.5 für die Jahre 2010, 2015 und 2020 wurde die Emissionsdatenbasis auf Grundlage des IIASA GAINS NEC 6 Current Policy Szenarios³³ (Amann et al., 2008) verwendet. In Tabelle 5-2 sind die für das Referenzjahr 2020 auf Grundlage von (Amann et al., 2008) angenommenen europäischen Emissionsmengen der betrachteten Luftschadstoffe dargestellt.

³² SNAP97: Selected Nomenclature of Air Pollution, Version 1997; SNAP LEVEL entspricht dem höchsten Aggregierungsgrad dieser Systematik. Es werden dabei 11 Hauptkategorien unterschieden: Energieerzeugung, Kleinf Feuerungen, Prozessfeuerungen, Produktionsprozesse, Extraktion und Gewinnung von fossilen Brennstoffen und geothermischer Energie, Lösemittel- und andere Produktanwendung, Straßenverkehr, Andere mobile Maschinen, Müllbehandlung und -deponierung, Landwirtschaft, Wald, Landnutzung und Holzvorratsänderung.

³³ National Emission Ceilings für 2020 basierend auf dem 2008 Climate & Energy Package

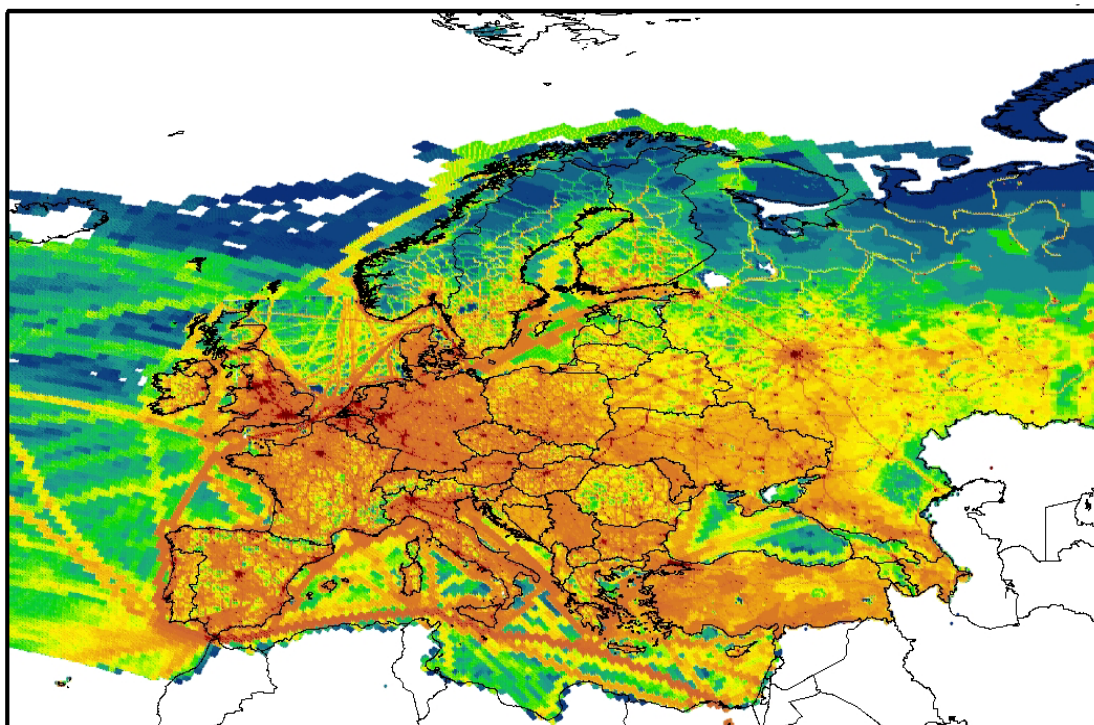


Abbildung 5-1: PAREST NO_x-Emissionen für Europa in der Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite.

Tabelle 5-2: Europäische Emissionen für das Referenzjahr 2020 (Amann et al., 2008)(NEC6_CP)

2020	kt/a	NO _x	NMVOC	SO _x	NH ₃	CO	PM2.5	PM10
BY	Belarus	239.1	252.3	181.9	132.6	698.8	46.9	65.5
AL	Albania	35.8	42.8	31.4	26.9	141.6	7.6	10.6
AM	Armenia	8.6	26.7	10.3	14.6	74.4	4.8	6.7
AT	Austria	102.9	120.1	17	59.8	620.6	23.6	42.1
GE	Georgia	52.2	53.2	14.4	38.1	347.5	7	10.3
BE	Belgium	147.6	127.9	83.9	77.2	649.8	25.1	58.6
BG	Bulgaria	97.4	87	139.3	68.2	1238.2	45.4	64.7
BA	Bosnia and Herzegovi	57.5	50.9	380.2	18.5	88.2	15.9	35.3
CH	Switzerland	49.1	79.3	18.2	41.3	136.6	7.7	19.5
CY	Cyprus	3.4	3	0.4	3.4	43.7	0.5	1.5
CZ	Czech Republic	180.8	181.2	81.4	77.5	516.3	40.4	59.1
DE	Germany	904.2	1381	454.6	609.4	3016.1	101.5	228.2
DK	Denmark	95.4	73	17.1	53.4	341.3	17.9	31.7
ES	Spain	719.3	662.5	361.5	352.8	1181	104	247
EE	Estonia	20.8	21.3	16.1	10.8	81	8.5	12.6
FI	Finland	106.7	88.3	35.7	30.5	259.4	16.7	27.3
FR	France	541.4	755.8	188	649.7	3728.6	236.2	411.2
GB	United Kingdom	615	856.1	209.5	267.4	1411.9	66.2	178
GR	Greece	164.6	137.5	63	48.1	316.8	31.7	60.1
HU	Hungary	89.1	96.3	54.6	89.9	212.5	20.9	37.3
IE	Ireland	56.1	49.8	33.9	104	79.8	8.6	22
IT	Italy	699.9	680.8	290.3	389.8	2089.6	118.1	270.5
LT	Lithuania	34.7	53.8	29.4	40.3	82.2	11.3	17.8
LU	Luxembourg	12.8	6.8	1.3	5.9	44.3	2.1	6.4
LV	Latvia	28.8	41.8	10.4	15	278.6	17.4	23
MD	Republic of Moldova	62.6	41.1	101.7	45.9	139.8	12.8	21.3
MK	The former Yugoslav	43.5	36.3	72.1	15	109.3	7.7	15.8
NL	Netherlands	177.6	160.7	44.5	129.5	356.4	18.9	51.5
NO	Norway	146.4	89.2	25.5	20.6	288.9	43.7	55.1
PL	Poland	424.4	360.8	497.6	313.1	4501.6	161.8	251.4
PT	Portugal	129.8	167.2	65.1	70.1	360.4	48.5	85.9
RO	Romania	228	339.1	166.8	177.1	2508.9	143.4	184.6
RU	Russian Federation (nur im Modellgebiet)	3294.9	3324.5	3110.6	538.2	13108	638.6	961.7
SK	Slovakia	58.2	51.8	49.6	32.1	198.6	11.9	23.1
SI	Slovenia	34.5	30.9	15.4	20.9	46.1	6.6	9.9
SE	Sweden	115.2	122.7	48.5	51.3	329.4	15.3	31.3
TR	Turkey	730.9	480.9	910.8	468.2	1949.3	294.1	477.7
UA	Ukraine	1368	1197.7	1866.1	262.6	5266.5	316.8	490.7
YU	Yugoslavia	173.1	154.8	167.6	75.1	76.4	41.9	82.3
HR	Croatia	52.8	41.6	62.4	33	151.4	13.4	21.5
AZE	Azerbaijan	113.3	280.8	185.4	50.8	174.5	18.7	31.9
ATL	ALL OCEANS	3174.8	108.2	2227.8	0	320.7	242.5	256
MT	Malta	0	0	0	0	0	0.1	0.6

Da die europäischen Hintergrundemissionen im Basisjahr (2005) und den Prognosejahren 2010, 2015 und 2020 wegen des hohen Ferntransportanteils an den PM10-Immissionen einen erheblichen Einfluss auf die Feinstaubkonzentrationen in Deutschland haben, wurde eine genaue Analyse der aus dem GAINS-Modell verfügbaren europäischen Emissionsabschätzungen durchgeführt. Das Ergebnis war, dass eine Abnahme der NO_x- und PM10-Emissionen in den EU27-Ländern von 2005 bis 2020 um etwa 50% bzw. 25% im NEC_6 Current Policy-Szenario³⁴ (Amann et al., 2008) zu verzeichnen ist. Dieses Szenario nimmt für die zukünftigen Referenzjahre höhere Emissionen an als das OPTV5 Szenario³⁵ (Amann et al., 2008). Dieses optimierte Emissionsszenario (OPTV5) geht wiederum von höheren Emissionen in zukünftigen Jahren aus als das MRRV5 Szenario³⁶ (Maximum emissions reductions in the RAINS model; Amann et al., 2008). Im MRRV5 wird eine etwa 60%-ige bzw. 50%-ige Reduktion der Emissionen im Vergleich zum Basisjahr 2005 für NO_x and PM10 angenommen.

Die europäischen Emissionen für die Referenzjahre wurden räumlich hoch aufgelöst (0.125° Länge x 0.0625° Breite) verfügbar gemacht. Diese europäischen Emissionsdatensätze wurden als Eingangsdaten für das RCG-Modell im PAREST Projekt verwendet, um die Luftqualität in Deutschland für das Basisjahr (2005) sowie die Referenzjahre 2010, 2015 und 2020 unter Berücksichtigung des Europäischen Hintergrundes zu modellieren.

Wesentliches Ergebnis dieses Teils der PAREST-Modellkette ist eine konsistente Emissionsdatenbasis in der notwendigen räumlichen Auflösung für den Europäischen Hintergrund für das Basisjahr (2005) und alle betrachteten Referenzjahre bis 2020.

Es ist wichtig zu bemerken, dass in Abbildung 5-1 auch Emissionen für Deutschland dargestellt werden. Im Rahmen von PAREST wurden die im europäischen Datensatz enthaltenen Emissionen jedoch durch Emissionsdatensätze ersetzt, die auf der deutschen Emissionsdatenbasis (Jörß et al., 2010 und Thiruchittampalam et al., 2010a) basieren. Lediglich die CO- und die CH₄-Emissionen für Deutschland wurden dem europäischen Datensatz entnommen.

³⁴ NEC_6_ National Emission Ceilings für 2020 basierend auf dem 2008 Climate & Energy Package: Referenzszenario unter Berücksichtigung des EU Klima-&Energiepaketes (-20% Treibhausgase bis 2020 im Vergleich zu 1990, 20% Anteil erneuerbare Energien+Joint Implementation/Clean Development Mechanismen unter Annahme eines CO₂-Preises von 30€/t + Einbeziehung der erneuerbaren Energien in den Emissionshandel), Februar 2008, „Current Policy“ berücksichtigt dabei die aktuelle Gesetzgebung in allen Sektoren: Emissionsgrenzwerte auf Grundlage der IVU-Richtlinie (IPPC Directive, siehe IPPC (1996)) für Feuerungsprozesse in der Industrie und in Großfeuerungsanlagen, EURO VI für schwere Nutzfahrzeuge und die Nationalen Emissionshöchstmengen auf Grundlage der NEC-Richtlinie (NEC, 2001).

³⁵ OPTV5: optimiertes Emissionsszenario unter Annahme einer Energieprojektion, die konsistent mit dem Energie-&Klimapaket der Europäischen Kommission ist. Das Szenario erreicht im Jahr 2020 die Ziele der Thematischen Strategie zur Luftreinhaltung.

³⁶ MRRV5: Dieses Szenario quantifiziert die maximal mögliche Minderung mit Hilfe technischer Maßnahmen im RAINS-Modell. Das RAINS-Modell (Regional Air Pollution Information and Simulation model) ist das Vorgängermodell des GAINS-Modells und berücksichtigt keine nichttechnischen Maßnahmen.

6 Modellierung von Luftschadstoffen und immissionsseitige Bewertung der Referenzszenarien

6.1 Überblick und Auswertemethodik

Die immissionsseitigen Auswirkungen der Referenzszenarien für Deutschland wurden mit Ausbreitungsrechnungen auf der Basis von Chemie-Aerosol-Transportmodellen bestimmt. Als Ausbreitungsmodell kam hauptsächlich das im Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin entwickelte REM-CALGRID-Modell (RCG-Modell) zur Anwendung.

Das RCG-Modell kann zur Bestimmung der Luftqualität und des Eintrags von Schadstoffen in den Boden in der europaweiten und der nationalen Raumskala (Auflösungen von ca. 30x30 km² bis circa 7 x 7 km²) und in der urbanen Raumskala (Ballungsgebiet, Auflösung von ca. 1 x 1 km² und höher) verwendet werden. Die aus höher-skaligen Modellanwendungen abgeleitete Hintergrundbelastung wird als Randbedingung für kleiner-skalige Berechnungen verwendet („one-way-nesting“).

Die Berechnung erfolgt auf Stundenbasis für das ganze Jahr, so dass auch die in den EU-Richtlinien verlangten Überschreitungshäufigkeiten direkt berechnet werden können. Betrachtet werden alle relevanten Spurenstoffe in der Gasphase und deren chemische Reaktionen sowie die Feinstaubproblematik. Bei den Partikeln können neben der Gesamtsumme der Partikel < 10 µm (PM10) auch die Einzelkomponenten PM10-PM2.5 (PM_{coarse}), PM2.5, EC (Elementary Carbon), OC (Organic Carbon), die anorganischen Sekundäraerosole SO₄, NH₄, und NO₃ sowie einige organische Aerosole getrennt ausgewiesen werden.

Das RCG-Modell entstand aus der Verschmelzung des ursprünglich für die großräumige Skala entwickelten REM3-Modells (Stern, 1994) und des für die urbane Skala entwickelten CALGRID-Modells (Yamartino et al., 1992). Beide Modelle wurden bereits im Rahmen des Aktionsprogramms und Maßnahmenplans Ozon (AMPO) für episodenzugehörige Szenario-rechnungen eingesetzt (Mutz et al., 1997). In mehreren vom Umweltbundesamt geförderten F&E-Vorhaben wurden die wissenschaftlichen Module überarbeitet, ergänzt, und auf den Stand des Wissens gebracht (Stern 2003, 2004). Die Parametrisierungen der physikalisch-chemischen Prozesse erfolgten mit Modellierungsansätzen mittlerer Komplexität, um die auf Langfristberechnungen abzielende Anwendung des Modells gewährleisten zu können. In der praktischen Anwendung bedeutet dies, dass die physikalisch-chemischen Parametrisierungen so gewählt wurden, dass einerseits eine dem Problem angemessene Darstellung der relevanten Prozesse gewährleistet ist und andererseits der Rechenzeitbedarf des Modells eine Erstellung von Jahresläufen auf einem modernen PC gestattet.

Die wesentlichsten Bestandteile des RCG-Modells sind:

- Ein dynamisches oder festes vertikales Koordinatensystem mit einer beliebigen Anzahl von Modellschichten. In der Horizontalen Wahl zwischen einem geographischen oder einem rechtwinkligen Koordinatensystem,
- Ein absolut massenerhaltendes „operator-splitting“-Verfahren,
- Ein sehr genauer und trotzdem nicht-rechenintensiver Algorithmus für die Horizontaladvektion,
- Module für die trockene und nasse Deposition,
- Die neueste Version des Carbon-Bond-IV Mechanismus für die chemischen Gasphasenreaktionen,
- Die Behandlung der PM10- und PM2.5-Problematik,

- Ein Aerosol-Modul zur Bestimmung der sekundären anorganischen Aerosole,
- Ein Aerosol-Modul zur Bestimmung der sekundären organischen Aerosole,
- Module zur Bestimmung der biogenen Emissionen auf der Basis von Biomassen,
- Ein Emissionsmanagementsystem zum einfachen Umsetzen von Emissionsszenarien in die Emissionsdatenbasis,
- Auswerte-Module zur Berechnung der in den EU-Richtlinien zur Luftqualität festgeschriebenen Beurteilungsgrößen,
- Skalen-übergreifende Modellanwendungen („one-way-nesting“).

Grundlage der hier vorgestellten Modellrechnungen waren die ausgehend von der Emissionsreferenz 2005 entwickelten deutschen (Jörß et al., 2010, Jörß und Degel, 2010) und europäischen Emissionsprognosen (Denier van der Gon et al., 2009, 2010) für die Referenzjahre 2010, 2015 und 2020, die die Änderung der Emissionen aufgrund von bereits beschlossenen und eingeleiteten technischen und nicht-technischen Maßnahmen beschreiben (CLE-Szenario „current legislation“). In diesem Kapitel werden folgende Teilaspekte des Arbeitspakets 2 vorgestellt:

- PM10-Ursachenanalyse der Ausgangssituation für das Referenzjahr 2005 auf der Basis hypothetischer Szenarien,
- Berechnung der PM10-, PM2.5- und NO₂-Konzentrationsminderungen für die CLE-Emissionsreferenzen 2010, 2015 und 2020,
- Prognose der Luftqualität und Abschätzung von NO₂- und PM10-Grenzwertüberschreitungen in den Jahren 2010, 2015 und 2020 auf Basis der CLE-Szenarien,
- Abschätzung der Unsicherheiten bzw. Ergebnisbandbreiten durch Berücksichtigung einer Emissionsbandbreite und die Anwendung alternativer Ausbreitungsmodelle oder alternativer meteorologischer Treiber,
- Ballungsraumberechnungen

Ausführliche Darstellungen können in den PAREST-Berichten Stern (2010a, 2010b, 2010c, 2010d, 2010e, 2010f, 2010g, 2010h) und Kerschbaumer (2010a, 2010b) gefunden werden.

Die Auswertungen basieren hauptsächlich auf Anwendungen des RCG-Modells für Deutschland in einer Auflösung von 0.0625° Breite und 0.125° Länge. Dies entspricht in Mitteleuropa einer Maschenweite von circa 7 bis 8 km. Die Ballungsraumrechnungen erfolgten in einer Auflösung von circa 2 x 2 km². Die deutschlandweiten Ausbreitungsrechnungen sind zur Berücksichtigung des Ferntransports in europaweite Berechnungen eingebettet (Stern, 2009). Als meteorologisches Referenzjahr wurde das Jahr 2005 gewählt, das unter immissionsklimatologischen Gesichtspunkten ein mittelstark belastetes Jahr war. Die Ergebnisvisualisierung erfolgte mit dem FLADIS-Darstellungstool (IVU, 2009). Der Schwerpunkt der quantitativen Auswertungen lag zum Einen auf einer mittleren Betrachtung für ganz Deutschland. Zum anderen wurde die Fläche Deutschlands in Abhängigkeit von der Bevölkerungsdichte in vier Klassen mit steigender Bevölkerungsdichte (ländlich bis Ballungsraum, BVK1 bis BVK4) aufgeteilt:

- Klasse 1: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte < 100 Einwohner/km²
- Klasse 2: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte > 100, < 510 Einwohner/km²
- Klasse 3: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte > 510, < 945 Einwohner/km²

- Klasse 4: Gebiete mit einer Bevölkerungsdichte > 945 Einwohner/km²

Eine sechste Bewertungszahl wurde aus einer Mittelung der Ergebnisse für die städtischen Hintergrundstationen abgeleitet, die für die Bestimmung des AEI für PM_{2.5} (Average Exposure Indicator) ausgewählt wurden. Da in dicht besiedelten Arealen sehr viel mehr Personen von einem lokalen Minderungspotenzial profitieren als in dünner besiedelten Gebieten, wurden die Ergebnisse noch mit der lokalen Bevölkerungsdichte gewichtet.

Abbildung 6-1 zeigt die aus den Daten abgeleitete Bevölkerungsdichte in Deutschland aggregiert im hier verwendeten Rechenraster von 0.125° Länge x 0.0625° Breite. In den dicht besiedelten Ballungsräumen Deutschlands liegt die Bevölkerungsdichte in der hier verwendeten Auflösung von circa 8 x 7 km² zwischen circa 5000 bis über 10000 Einwohner pro km².

Bevoelkerungsdichte in 4 Klassen im Raster Nest 2

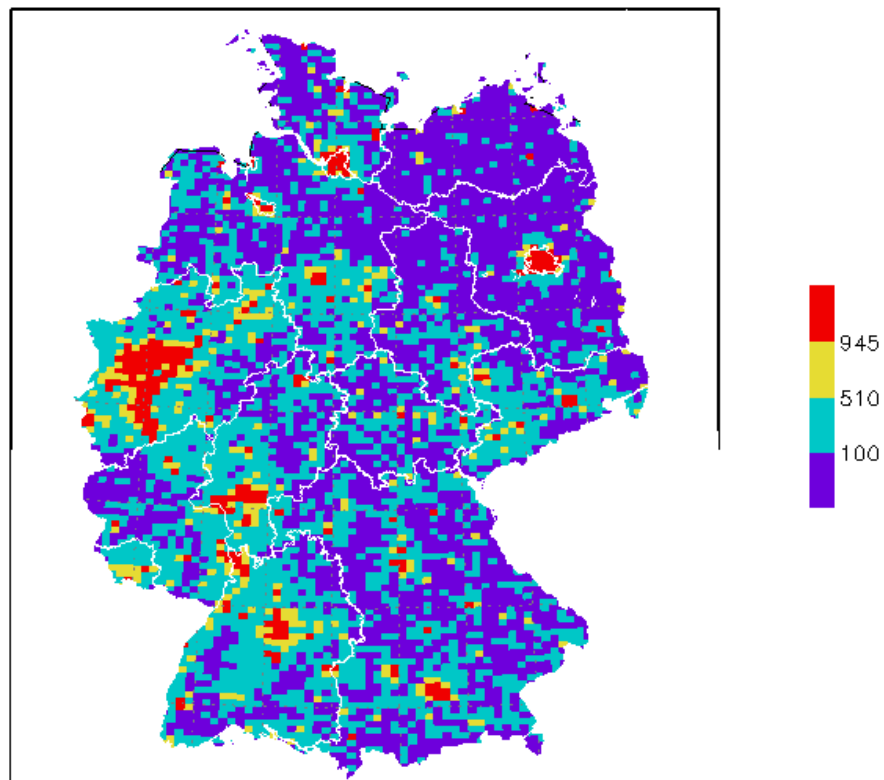


Abbildung 6-1: Bevölkerungsdichte in Einwohner/km² in 4 Klassen. Zur Klassendefinition siehe Text. Die Auflösung entspricht der Auflösung des Nestes 2, Deutschland fein: 0.0625° Breite, 0.125° Länge, circa 8 km x 7 km.

6.2 PM10-Ursachenanalyse für das Referenzjahr 2005 auf der Basis hypothetischer Szenarien

Die Ursachenanalyse basierte auf verursachergruppen- und stoffbezogenen hypothetischen Szenarien (Stern, 2010a). Dazu wurden die Basisemissionen 2005 von SO₂, NO_x, NMVOC, PM10 und NH₃ für 10 Verursachergruppen (SNAPs) in Deutschland systematisch variiert. Das umfassendste Szenario ist die Verminderung aller deutschen anthropogenen Emissionen um 100%. Aus diesem Szenario lässt sich ableiten, dass in Deutschland zwischen 49% (ländliche Gebiete, Bevölkerungsklasse 1) bis 63% (Ballungsgebiete, Bevölkerungsklasse 4) der PM10-Jahresmittelwerte ursächlich den deutschen Emissionen zugeschrieben werden können. Absolut entspricht dies einem maximal möglichen Minderungspotenzial von circa 7 µg/m³ in ländlichen Regionen und circa 14 µg/m³ in Ballungsräumen (Abbildung 6-2). Dieses Minderungspotenzial kann in etwa folgenden Stoffen, unabhängig von der Verursachergruppe, zugeordnet werden:

Tabelle 6-1: Stoffbezogene Beiträge zum maximal möglichen Minderungspotenzial für den hypothetischen Fall einer 100%-igen Reduzierung der deutschen anthropogenen Emissionen. Emissionsreferenz 2005.

-100% aller deutschen Emissionen	Minderungspotenzialbeiträge pro emittiertem Stoff
Städtischer Hintergrund	
max. Minderungspotenzial	PM10: circa 2/3
14 µg/m ³	Summe der Vorläufer NH ₃ , NO _x , SO ₂ , NMVOC circa 1/3
Ländlicher Hintergrund	
max. Minderungspotenzial	Summe der Vorläufer NH ₃ , NO _x , SO ₂ , NMVOC circa 2/3
7 µg/m ³	PM10: circa 1/3

In Ballungsräumen sind also die primären PM10-Emissionen für circa 2/3, in ländlichen Regionen nur für circa 1/3 für die von den deutschen Emissionen verursachten PM10-Immissionen verantwortlich. Die Summe der gasförmigen Vorläuferemissionen, die über komplexe physikalisch/chemische Prozesse zur PM10-Bildung beitragen, stellt in ländlichen Regionen circa 2/3, in Ballungsräumen dagegen nur circa 1/3 des PM10-Bildungspotenzials, wobei der größte Einzelbeitrag den NH₃-Emissionen der Landwirtschaft zugeordnet werden kann.

Das Minderungspotenzial für die Hauptverursachergruppen zeigt die Tabelle 6-2. In Ballungsräumen tragen demnach die Emissionen der industriellen Gruppen (SNAP 1, 3, 4, 5, 9) und die Verkehrsemissionen (Auspuff-, Abrieb- und Wiederaufwirbelungsemissionen) zu etwa je einem Drittel zum PM10-Bildungspotenzial bei. In ländlichen Regionen sind die Emissionen der Landwirtschaft (hauptsächlich NH₃-Emissionen) mit circa 50% am PM10-Bildungspotenzial beteiligt. Diese Beiträge wurden durch die jeweilige komplette Abschaltung der Emissionen einzelner Stoffe oder einzelner Verursachergruppen ermittelt.

Tabelle 6-2: Verursachergruppenbezogene Beiträge zum maximal möglichen Minderungspotenzial für den hypothetischen Fall einer 100%-igen Reduzierung der deutschen anthropogenen Emissionen. Emissionsreferenz 2005.

-100% aller deutschen Emissionen	Minderungspotenzialbeiträge pro Verursachergruppe
Städtischer Hintergrund	
max. Minderungspotenzial	Industrie und Straßenverkehr: circa je 1/3
14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Landwirtschaft: circa 1/4
Ländlicher Hintergrund	
max. Minderungspotenzial	Landwirtschaft circa 1/2
7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Straßenverkehr und Industrie circa je 1/4

Vermindert man die Emissionen anstatt um 100% jeweils nur um (realistischere) 25%, verschieben sich die oben angeführten Beiträge in dem Sinne, dass die Beiträge der direkten PM10-Emissionen zum gesamten Minderungspotenzial (-25% aller deutschen Emissionen) zunehmen während die Beiträge der gasförmigen Vorläuferemissionen abnehmen (Tabelle 6-3).

Bei den verursachergruppenbezogenen Beiträgen stellen die Emissionen der industriellen Prozesse und des Kfz-Verkehrs auch bei einer 25%igen Emissionsminderung in den Ballungsräumen die größten Anteile am Minderungspotenzial (Tabelle 6-4). Die Rolle der Landwirtschaft, die bei einer 100%igen Minderung der Emissionen noch 23% des Minderungspotenzials in den Ballungsräumen stellt, wird bei einer nur 25%igen Minderung aber geringer (14%). In den ländlichen Regionen liefert die Landwirtschaft auch bei einer nur 25%igen Emissionsminderung nach wie vor den höchsten Beitrag zum gesamten PM10-Minderungspotenzial, ihr Anteil ist aber deutlich geringer als bei einer 100%igen Emissionsminderung. Dies ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass insbesondere das PM10-Minderungspotenzial der NH_3 -Emissionen, die den Hauptteil der landwirtschaftlichen Emissionen stellen, in einem nicht-linearen Zusammenhang mit der NH_3 -Minderungsmenge steht.

Tabelle 6-3: Stoffbezogene Beiträge zum maximal möglichen Minderungspotenzial für den hypothetischen Fall einer 25%-igen Reduzierung der deutschen anthropogenen Emissionen. Emissionsreferenz 2005.

-25% aller deutschen Emissionen	Minderungspotenzialbeiträge pro emittiertem Stoff
Städtischer Hintergrund	
max. Minderungspotenzial	PM10: circa 3/4
3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Vorläufer NH_3 , NO_x , SO_2 , NMVOC circa 1/4
Ländlicher Hintergrund	
max. Minderungspotenzial	Vorläufer NH_3 , NO_x , SO_2 , NMVOC circa 1/2
1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM10: circa 1/2

Tabelle 6-4: Verursachergruppenbezogene Beiträge zum maximal möglichen Minderungspotenzial für den hypothetischen Fall einer 25%-igen Reduzierung der deutschen anthropogenen Emissionen. Emissionsreferenz 2005.

-25% aller deutschen Emissionen	Minderungspotenzialbeiträge pro Verursachergruppe
Städtischer Hintergrund	
max. Minderungspotenzial	Industrie und Verkehr: circa je 1/3
3 µg/m ³	Landwirtschaft: circa 1/6
Ländlicher Hintergrund	
max. Minderungspotenzial	Landwirtschaft circa 1/3
1.5 µg/m ³	Kfz-Verkehr circa 1/4
	Industrie: circa 1/5

Bei der relativen Betrachtung muss berücksichtigt werden, dass die geminderten Stoffbeiträge unterschiedlich hoch sind. Eine 25%-ige Minderung der NH₃-Emissionen bedeutet eine circa dreimal höhere absolute Minderung in Kilotonnen als eine 25%-ige Minderung der PM₁₀-Emissionen. Bei einer 25%-igen Minderung der Stoffe ist das Minderungspotenzial einer Kilotonne PM_{2.5}-Emissionen circa 5mal höher als das Minderungspotenzial einer Kilotonne NH₃-Emissionen. Infolge der nicht-linearen Zusammenhänge zwischen NH₃-Minderungen und den daraus resultierenden PM₁₀-Änderungen ändert sich das Minderungspotenzial der NH₃-Emissionen aber drastisch mit der Menge der geminderten Emissionen wie in Abbildung 6-3 für eine stufenweise Minderung der NH₃-Emissionen von 5% bis 100% gezeigt wird. Dies bedeutet, dass das PM₁₀-Immissionsminderungspotenzial einer Kilotonne geminderter NH₃-Emissionen mit zunehmender NH₃-Emissionsminderung stark ansteigt. Es muss betont werden, dass die Beiträge der einzelnen Stoffe und Verursachergruppen wegen dieser Nicht-Linearitäten im PM₁₀-Bildungssystem nur als Abschätzung betrachtet werden können.

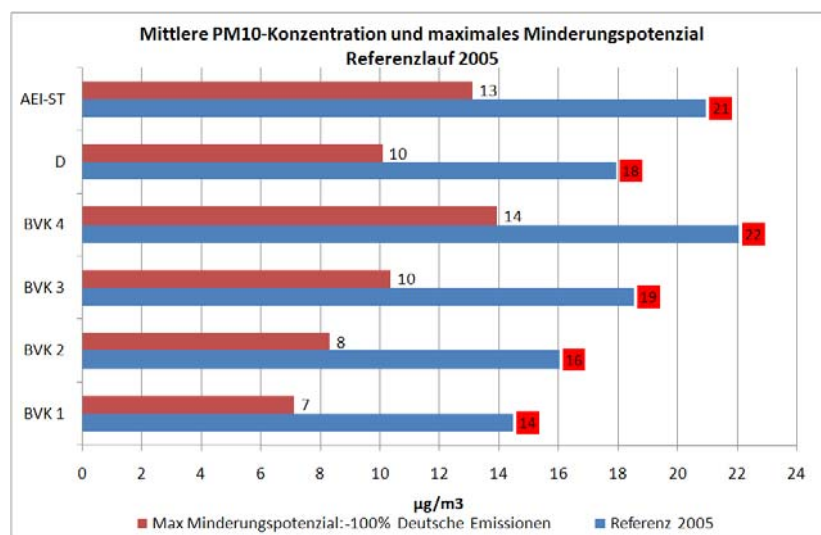


Abbildung 6-2: Mittlere bevölkerungsgewichtete PM₁₀-Konzentrationen der Referenz 2005 und maximal mögliches PM₁₀-Minderungspotenzial (-100% der anthropogenen Emissionen in Deutschland).

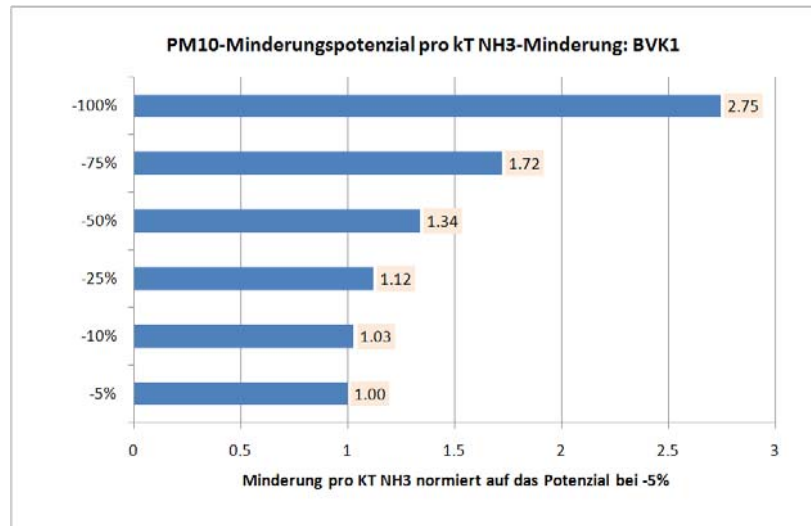


Abbildung 6-3: PM10-Minderungspotenzial der NH₃-Emissionen normiert auf das Potenzial einer Emissionsminderung um 5%.

Es lässt sich festhalten:

- In Ballungsgebieten ist die direkte Minderung der PM10-Emissionen die effektivste Maßnahme zur Absenkung der PM10-Konzentrationen, die Hauptverursacher sind Industrie und Straßenverkehr,
- In ländlichen Gebieten ist das Minderungspotenzial der PM10-Emissionen und der gasförmigen Vorläuferemissionen etwa gleich groß, der Hauptverursacher ist die Landwirtschaft gefolgt vom Straßenverkehr und der Industrie,
- Das PM10-Minderungspotenzial pro Kilotonne geminderter Vorläuferemissionen (außer NMVOC), in besonderem Maße das von NH₃, ist abhängig von der Reduktionsmenge und steigt mit wachsender Minderungsmenge.

6.3 Berechnung der Konzentrationsminderungen für die CLE-Emissionsreferenzen 2010, 2015 und 2020

Die aufgrund der bereits heute eingeleiteten Maßnahmen erreichbaren Minderungen der PM10-, PM2.5- und NO₂-Jahresmittelwerte in Deutschland wurden mit dem RCG-Modell berechnet und ausgewertet (Stern 2010b, 2010c). In Abbildung 6-4 sind die ausgehend von den Konzentrationen für die Referenz 2005 bis 2020 erreichbaren mittleren Immissionsminderungen dargestellt. Im deutschlandweiten Mittel sinken die PM10-Jahresmittelwerte danach ausgehend vom Jahr 2005 durch die bis 2010 umgesetzten Maßnahmen um circa 2.1 µg/m³, durch die bis 2015 umgesetzten Maßnahmen um 2.9 µg/m³ und durch die bis 2020 umgesetzten Maßnahmen um 3.4 µg/m³. Bezogen auf die Konzentrationen der Referenz 2005 entspricht dies bis 2020 einer relativen Abnahme von 19%. Für die ländlichen Gebiete (Bevölkerungsklasse 1, BVK1) berechnet sich für den Zeitraum 2005 bis 2020 eine mittlere Minderung von 2.9 µg/m³ (entspricht -20%, bezogen auf 2005), für die Ballungsräume (BVK4) von 3.9

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (entspricht -18%, bezogen auf 2005). Die für die PM_{2.5}-Jahresmittelwerte erreichbaren Minderungen sind etwas geringer. Die NO₂-Jahresmittelwerte sinken im deutschlandweiten Mittel durch die bis 2010 umgesetzten Maßnahmen um knapp 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, durch die bis 2015 umgesetzten Maßnahmen um 7,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und durch die bis 2020 umgesetzten Maßnahmen um 9,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Bezogen auf die NO₂-Konzentrationen der Referenz 2005 entspricht dies bis 2020 einer relativen Abnahme von 46%. Für die ländlichen Gebiete (Bevölkerungsklasse 1, BVK1) berechnet sich für den Zeitraum 2005 bis 2020 eine mittlere Minderung von knapp 6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (entspricht -47%, bezogen auf 2005), für die Ballungsräume (BVK4) von mehr als 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (entspricht -44%, bezogen auf 2005). Die größten Abnahmen der Konzentrationen werden demnach für PM₁₀ und PM_{2.5} bereits durch die bis zum Jahre 2010 umgesetzten Maßnahmen erreicht. Bei NO₂ halten sich die Abnahmen von 2005 bis 2010 und von 2010 bis 2015 in etwa die Waage.

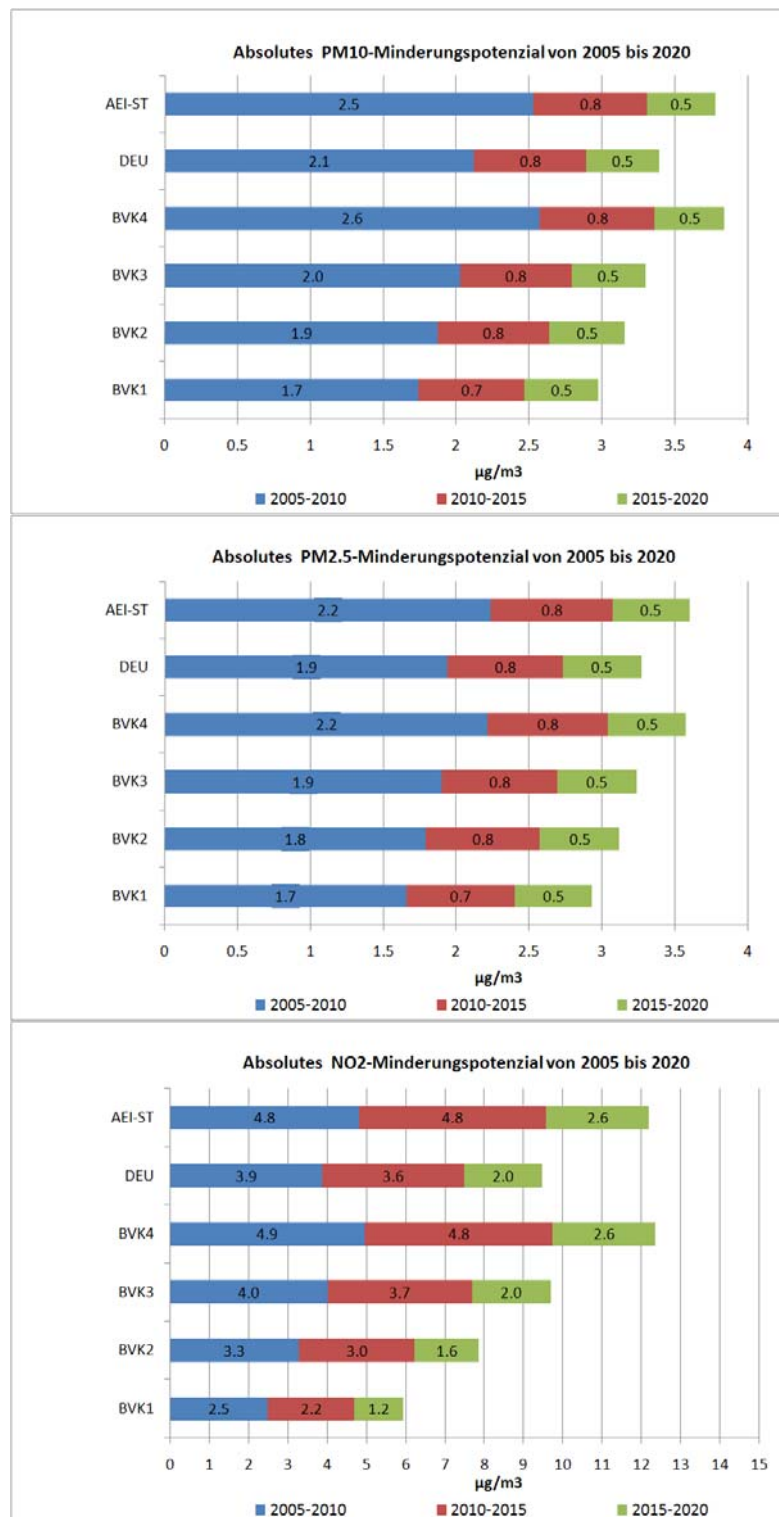


Abbildung 6-4: Absolute PM10-, PM2.5- und NO₂-Immissionsminderungen in µg/m³, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015 und 2015 bis 2020 (Referenzszenarien) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 6.1.

6.4 Prognose der Luftqualität und Abschätzung von NO₂- und PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen in den Jahren 2010, 2015 und 2020 auf Basis der CLE-Emissionsreferenzen

Mit Hilfe einer Datenassimilationstechnik, der Optimalen Interpolation (OI), wurde eine flächendeckende Prognose der O₃-, PM₁₀- und NO₂-Luftqualität in Deutschland für die Jahre 2010, 2015 und 2020 erstellt (Stern, 2010f). Die OI benutzt die Modellergebnisse von 2005 als Hintergrundfeld, in das die vorliegenden Messungen integriert werden. Dazu werden Repräsentativitätsgebiete der Messungen aus den statistisch abgeleiteten Strukturen (räumliche Autokovarianz) gewonnen. Die Interpolation erfolgt für ein Raster mit einer Seitenlänge von circa 8 km. Bei der Interpolation werden nur Stationen verwendet, die nicht im direkten Einflussbereich lokaler Emissionen liegen, d. h. verkehrsnahe Messungen werden in der OI nicht berücksichtigt.

Auf Basis der OI-Felder wurde eine Abschätzung vorgenommen, ob die Grenzwerte der europäischen Luftqualitätsrichtlinie (2008/50/EG) im Jahre 2015 und 2020 eingehalten werden können. Zudem wurde untersucht, was die in der Luftqualitätsrichtlinie festgelegten Regelungen für die Feinstäube PM_{2.5} für die PM_{2.5}-Belastung in Deutschland bedeuten und ob das nationale Ziel für die Reduktion der PM_{2.5}-Belastung unter den Emissionsbedingungen des Jahres 2020 erreicht werden kann. Ausgangspunkt für die Prognose der Luftqualität und die Abschätzungen der Grenzwertüberschreitungen von PM₁₀ und NO₂ war das Jahr 2005, das Referenzjahr des PAREST-Projekts, Zieljahre waren 2010, 2015 und 2020. Für diese Jahre wurden mit Hilfe der OI und der RCG-Ergebnisse für das Ausgangsjahr 2005 sowie für die Zieljahre 2010, 2015 und 2020 Felder der gegenwärtigen (2005) und der zukünftigen (2010, 2015 und 2020) Luftqualität erstellt. Eine Anwendung der OI-Methodik zur Beschreibung der zukünftigen Luftqualität ist möglich, wenn man die aus einer Szenariorechnung ermittelten Immissionsänderungen (Immissionsdeltas 2005-2010, 2005-2015 und 2005-2020) dem OI-Ausgangsfeld für das Jahr 2005 aufträgt.

PM₁₀ und NO₂-Grenzwertüberschreitungen in Deutschland betreffen im Wesentlichen den PM₁₀-Kurzfristgrenzwert (nicht mehr als 35 Tage im Jahr mit einem PM₁₀-Tagesmittelwert > 50 µg/m³) und den NO₂-Jahresmittelwert, der 40 µg/m³ nicht überschreiten darf. Grenzwertüberschreitungen bei Feinstaub und Stickstoffdioxid treten überwiegend an verkehrsnahen Stationen auf (Umweltbundesamt, 2009) und werden damit insbesondere für Stickstoffdioxid durch die Beiträge lokaler Emissionen ausgelöst. Nur bei PM₁₀ liefert der Ferntransport einen größeren Beitrag zu den lokalen Immissionen. Aus diesem Grunde wurden hier nur Grenzwertüberschreitungen an Verkehrsstationen betrachtet. Die im Rahmen des PAREST-Projekts ausgeführten Modellrechnungen für Deutschland basieren auf einer Auflösung von 0.0625° Breite und 0.125° Länge. Dies entspricht in Mitteleuropa einer Maschenweite von circa 7 bis 8 km. Die Bestimmung des Beitrags lokaler Emissionen zur lokalen Belastung kann damit nicht direkt vorgenommen werden, da dazu höher auflösende Berechnungen bis hinein in eine Straßenschlucht notwendig sind. Die PAREST-Berechnungen repräsentieren weitestgehend den regionalen, in großen Ballungsräumen auch den urbanen Hintergrund, auf den die von lokalen Emissionen verursachten Immissionsbeiträge aufsetzen. Damit können die im PAREST-Projekt erstellten Immissionsberechnungen nicht direkt für die Abschätzung von Grenzwertüberschreitungen benutzt werden. In der hier vorgestellten Methodik werden die PAREST-Berechnungen daher nur benutzt, um die zeitliche Entwicklung des regional/urbanen Hintergrunds abzuschätzen. Die eigentliche Abschätzung der Grenzwertüberschreitungen an verkehrsnahen Stationen erfolgte mit Hilfe einer Methodik, die die Konzentrationsänderung als Folge der lokalen Emissionsänderung (Änderung der Verkehrsemissio-

nen) und der Änderung des Hintergrunds abschätzt und diese Änderung auf die Messung überträgt. Die Abschätzung der Anzahl von Überschreitungen des PM₁₀-Tagesmittelgrenzwerts basiert auf statistischen Beziehungen zwischen dem Jahresmittelwert und der Anzahl von Überschreitungen (Wiegand und Diegmann, 2009).

Die potenziellen Grenzwertverletzungen der Ozonkenngrößen wurden anhand der flächendeckenden Prognosen für Deutschland abgeschätzt. Diese Prognosen repräsentieren weitestgehend den regionalen, in großen Ballungsräumen auch den urbanen Hintergrund, was zur Ozonbeschreibung ausreicht, da hohe Ozonkonzentrationen eher in den ländlichen Regionen und nicht in Ballungsräumen mit hoher Emissionsdichte auftreten. Grenzwertüberschreitungen bei Ozon treten für die Emissionsreferenz 2005 beim AOT₄₀-Wert zum Schutz der Vegetation und beim maximalen 8-h-Mittelwert auf (der höchste 8-h-Mittelwert eines Tages von 120 µg/m³ darf an höchstens 25 Tagen pro Kalenderjahr überschritten werden, gemittelt über 3 Jahre). Unter den Bedingungen der Emissionsreferenz 2020, die den Zustand beschreibt, der nach Umsetzung aller heute bereits beschlossenen Minderungen im Jahre 2020 eintreten soll (CLE-Szenario, „current legislation“), gehen die für 2005 noch großflächig auftretenden Grenzwertüberschreitungen zwar stark zurück, es kommt aber nicht flächendeckend in Deutschland zu einer Einhaltung der Grenzwerte. Dies gilt in verstärktem Maße für photochemisch hoch-aktive Jahre. Verwendet man statt dem photochemisch eher durchschnittlich aktiven meteorologischen Referenzjahr 2005 das extreme Jahr 2003, so muss in vielen Regionen Deutschlands auch unter den CLE-Emissionsbedingungen von 2020 noch mit Überschreitungen der Ozon-Grenzwerte gerechnet werden.

Die Anwendung der Methodik zur Abschätzung von Grenzwertverletzungen des PM₁₀-Kurzfristgrenzwertes auf alle Verkehrsstationen, an denen im Jahre 2005 an mehr als 35 Tagen Überschreitungen des PM₁₀-Tagesmittelwerts von 50 µg/m³ beobachtet wurden, zeigt, dass im Jahre 2015 und auch noch im Jahre 2020 an einer Anzahl dieser Stationen weiterhin mit mehr als 35 Überschreitungen des PM₁₀-Kurzfristgrenzwerts zu rechnen ist. Im Jahre 2015 ist dies nach der Abschätzung noch für 11 von 49 Stationen der Fall (diese 11 Stationen wiesen alle im Jahr 2005 mehr als 55 Überschreitungstage auf). Für das Jahr 2020 kann noch an 8 von 49 Stationen mit einer zu hohen Anzahl von Überschreitungstagen gerechnet werden (im Jahr 2005 konnten an diesen 8 Stationen mehr als 60 Überschreitungstage beobachtet werden). Der Großteil der Abnahme der Anzahl von Überschreitungstagen ist der Minderung des Hintergrunds zuzuschreiben. Der Anteil der lokalen Minderung der Verkehrsemissionen ist deutlich geringer, da die lokale PM₁₀-Zusatzbelastung auch nur circa 1/3 der Gesamtbelastung in einer Straßenschlucht beträgt.

Die Emissionsreferenz 2020 beschreibt die durch die bereits beschlossenen und bis 2020 umgesetzten Maßnahmen erreichbaren Emissionsminderungen. Als weiteres Szenario wurde auch das MFR-Szenario 2020 untersucht, das die durch technische und nicht-technische Maßnahmen über die Referenz 2020 hinaus noch möglichen Emissionsminderungspotenziale beschreibt. Auch unter den Emissionsbedingungen des MFR-Szenarios 2020 kommt es noch zu Überschreitungen der zulässigen 35 Tage mit einem PM₁₀-Tagesmittelwert > 50 µg/m³. Die Anzahl der Stationen mit Grenzwertverletzungen ist aber geringer als für die Emissionsreferenz 2020 (6 anstatt 8 Stationen von 49). Die Grenzwertverletzungen treten alle an Stationen auf, die im Jahre 2005 mehr als circa 65 Überschreitungstage aufwiesen.

Ebenfalls untersucht wurden die Auswirkungen einer Umsetzung des so genannten Klimaschutzszenarios (siehe dazu Kapitel 7). Grundlage des Klimaschutzszenarios ist das MWMS (Mit weiteren Maßnahmen Szenario) der Studie Politiksszenarien IV, das von einer deutlich stärkeren Minderung der PM₁₀-Emissionen des Verkehrs ausgeht als das MFR-Szenario 2020. Unter den Emissionsbedingungen des Klimaschutzszenarios MWMS kommt es nach

der hier vorgenommenen Abschätzung nur noch an 2 Stationen zu Überschreitungen der zulässigen 35 Tage mit einem PM₁₀-Tagesmittelwert $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Diese beiden Stationen weisen im Jahre 2005 mehr als 75 Überschreitungstage auf. Das auf das Klimaschutzszenario MWMS aufsetzende MFR-Szenario 2020 enthält die durch technische und nicht-technische Maßnahmen über das Klimaschutzszenario MWMS 2020 hinaus noch möglichen Emissionsminderungspotenziale. Unter den Emissionsbedingungen dieses Szenarios kommt es an keiner der Verkehrsstationen mehr zu Überschreitungen der zulässigen 35 Tage mit einem PM₁₀-Tagesmittelwert $> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nach der hier vorgenommenen Abschätzung müssen die Emissionen also weit über das Maß der CLE-Emissionsreferenz 2020 hinaus gemindert werden, um auch an hoch belasteten Verkehrsstationen eine Überschreitung der zulässigen 35 Tage zu vermeiden. Unter extrem ungünstigen meteorologischen Bedingungen, wie sie z.B. im Jahre 2003 herrschten, reichen sogar nicht einmal die Minderungen des Klimaschutzszenarios MWMS zuzüglich des MFR-Szenarios 2020 aus, um die Einhaltung des PM₁₀-Kurzfristgrenzwertes an allen Stationen zu gewährleisten.

Die Abschätzung möglicher NO₂-Grenzwertüberschreitungen wurde für alle Verkehrsstationen durchgeführt, an denen im Jahre 2005 ein NO₂-Jahresmittelwert von mehr als $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurde. Da es insbesondere für die zukünftige Entwicklung der NO_x-Verkehrsemissionen sehr unterschiedliche Prognosen gibt, wurden hier verschiedene Prognosen untersucht. Die Berechnung der Verkehrsemissionen erfolgte im PAREST-Projekt standardmäßig mit dem vom Umweltbundesamt verwendeten Verkehrsmodell TREMOD 4.17 (Transport Emission Model) auf der Grundlage der Emissionsfaktoren des HBEFA 2.1 mit Modifikationen von IER (Kugler et al., 2010; Jörß et al., 2010), genannt TREMOD 4.17M. Alternativ zu TREMOD 4.17M wurden im Rahmen des Projekts auch Emissionsdatensätze für 2015 und 2020 erstellt, in denen die Verkehrsemissionen mit dem Modell TREMOVE (Version 2.7) berechnet wurden (Kugler et al., 2010). TREMOVE ist das Verkehrsmodell, das von der Europäischen Kommission für die Entwicklung von Verkehrsszenarien verwendet wird. Die mit TREMOVE 2.7 berechneten Auspuffemissionen sind insbesondere für NO_x deutlich höher als die mit TREMOD 4.17M berechneten Emissionen. Die mit dem Modell TREMOVE 2.7 berechneten relativen Abnahmen der Auspuffemissionen von 2005 nach 2015 und 2020 (-45% bzw. -59%) sind niedriger als die auf Basis des Modells TREMOD 4.17 (-62% bis 2015 bzw. -75% bis 2020). Als dritte Abschätzung wurden noch die NO_x-Minderungen von Dünnebeil und Lambrecht (2007) herangezogen, die auf der Basis einer anderen Version des Verkehrsmodells TREMOD (IFEU-TREMOD) Abnahmen von 41% bis 2015 und 54% bis 2020 berechnen.

Bei Verwendung der Verkehrsemissionen nach TREMOVE 2.7 muss für das Jahr 2015 an einer deutlich höheren Anzahl von Stationen mit Grenzwertverletzungen gerechnet werden als bei der Verwendung der Emissionen nach TREMOD 4.17M, was auf die geringere Abnahme der NO_x-Verkehrsemissionen und damit auch des Hintergrunds bei der Verwendung von TREMOVE 2.7 zurückzuführen ist. Auf Grundlage der von Dünnebeil und Lambrecht (2007) mit IFEU-TREMOD berechneten zukünftigen Emissionsentwicklung des Verkehrs und der dort verwendeten Annahmen zur Abnahme der NO₂-Hintergrundkonzentrationen sind im Jahr 2015 noch mehr Grenzwertverletzungen zu erwarten als für die Emissionsentwicklung nach TREMOVE 2.7. Für 2015 gilt dies in etwa für alle Stationen, an denen im Jahre 2005 ein NO₂-Jahresmittelwert von mehr als $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurde. Grenzwertüberschreitungen im Jahre 2020 ergeben sich noch an Stationen, an denen im Jahr 2005 ein NO₂-Jahresmittelwert $> 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gemessen wurde. Sowohl auf Basis der TREMOD 4.17M- als auch auf Basis der TREMOVE 2.7-Emissionsentwicklungen kommt es im Jahre 2020 verglichen mit den IFEU-TREMOD-Rechnungen zu deutlich weniger Grenzwertverletzungen, da die für die beiden Szenarien TREMOD 4.17M und TREMOVE 2.7 verwendeten Verkehrsemissionen und

Hintergrundkonzentrationen bis 2020 stärker abnehmen als von Dünnebeil und Lambrecht (2007) angenommen. Die Tabelle 6-5 fasst die Ergebnisse der Abschätzung zusammen. Es muss betont werden, dass die Unsicherheit der Abschätzungen groß ist, da der hier verwendete Ansatz auf sehr vielen Annahmen beruht. Die Abschätzungen sollen deshalb auch nur Hinweise auf mögliche Einhaltung bzw. Nichteinhaltung der Grenzwerte in Straßenschluchten geben („Screening“) und können keinesfalls adäquate Modellrechnungen ersetzen. Dies gilt auch für die weiter oben diskutierten PM₁₀-Grenzwertüberschreitungen.

Tabelle 6-5: Anzahl der Stationen mit Verletzungen des NO₂-Grenzwerts von 40 µg/m³ in Abhängigkeit verschiedener Emissionsentwicklungen. IFEU-TREMODO beschreibt die Verkehrsentwicklung gemäß der TREMOD-Anwendung von Dünnebeil und Lambrecht (2007).

68 Stationen mit Grenzwertverletzungen 2005	Grenzwertverletzungen 2015 Stationsanzahl	Grenzwertverletzungen 2020 Stationsanzahl
PAREST-TREMODO 4.17M	6	1
PAREST-TREMOVE 2.7	26	6
IFEU-TREMODO	29	20

6.5 Nationales Ziel zur Reduktion der PM_{2.5}-Exposition

In der neuen Luftqualitäts-Richtlinie 2008/50/EG wurden zum ersten Mal Regelungen für die Feinstäube PM_{2.5} getroffen. Die Ausgangsbasis zur Bestimmung des nationalen Ziels für die Reduktion der PM_{2.5}-Exposition ist der gleitende PM_{2.5}-Jahresmittelwert, der aus dem gemessenen Durchschnittswert über 3 Jahre an 36 Hintergrundstationen gebildet werden soll. Die Höhe dieses Durchschnittswertes bestimmt dann das nationale Ziel, das die bis 2020 zu erreichende Minderung der PM_{2.5}-Belastung relativ zur Ausgangsbelastung angibt³⁷. Da noch keine 3-Jahresmittelwerte vorliegen, wurde das nationale Ziel anhand der OI-Berechnungen für PM_{2.5} und den vorliegenden Messungen für 2008 bestimmt. Rechnung und Messung führen für 2008 zu einer Ausgangsbelastung von circa 15 µg/m³, was eine notwendige Minderung der PM_{2.5}-Belastung von 15% bis 2020 bedeuten würde. Die mit Hilfe der Ausbreitungsrechnungen ermittelte Abnahme der PM_{2.5}-Ausgangsbelastung von 2008 bis 2020 reicht nicht aus, um das Reduzierungsziel von 15% zu erreichen. Es ist zu erwarten, dass die Ausgangsbelastung gemittelt aus den Messungen der Jahre 2008, 2009 und 2010 höher sein wird als diejenige für 2008. Eine Abschätzung unter Verwendung von bis zum jetzigen Zeitpunkt (April 2010) verfügbaren PM₁₀-Messungen führt zu einer mittleren PM_{2.5}-Ausgangsbelastung von circa 17 µg/m³, womit das Reduzierungsziel von 15% bis 2020 noch weniger einzuhalten ist. Unter der Voraussetzung, dass die Ausgangsbelastung unter 18 µg/m³ bleibt, kann man erst unter den Emissionsvoraussetzungen des MFR-Szenarios 2020 mit einer Erreichung des Reduzierungsziels rechnen. Für eine Ausgangsbelastung von 18 µg/m³ oder mehr sind aber selbst die Emissionsminderungen des MFR-Szenarios 2020 mit großer Wahrscheinlichkeit zu gering, um das dann notwendige Reduzierungsziel von 20% zu erreichen.

³⁷ Die Ziele für die Reduzierung der PM_{2.5}-Exposition sind in Anhang XIV der Richtlinie 2008/50/EG aufgeführt: Ausgangskonzentration < 8,5 µg/m³ = 8,5 µg/m³ → Reduktionsziel 0%, Ausgangskonzentration > 8,5 µg/m³ bis < 13 µg/m³ → Reduktionsziel 10%, Ausgangskonzentration = 13 µg/m³ bis < 18 µg/m³ → Reduktionsziel 15%, Ausgangskonzentration = 18 µg/m³ bis < 22 µg/m³ → Reduktionsziel 20%, Ausgangskonzentration ≤ 22 µg/m³ → es sind alle angemessenen Maßnahmen zu ergreifen, um das Ziel von 18 µg/m³ zu erreichen.

6.6 Analyse der Unsicherheiten/Bandbreiten in der im PAREST-Projekt verwendeten Kausalkette Emission-Transmission-Immission

In diesem Kapitel werden die im PAREST-Projekt zur Abschätzung der Unsicherheit in der Kausalkette Emission-Transmission-Immission durchgeführten Untersuchungen vorgestellt. Diese umfassten hauptsächlich die durch die Unsicherheiten in den Emissionsdatenbasen sowie die durch die Anwendung verschiedener Modelle bzw. verschiedener Modellkombinationen bedingten Bandbreiten der Immissionsergebnisse.

Neben dem RCG-Modell, das standardmäßig mit dem auf Beobachtungen basierenden meteorologischen Treiber TRAMPER betrieben wird, kamen im PAREST-Projekt auch noch andere Modelle bzw. alternative Modellkombinationen zum Einsatz. Insgesamt wurden angewandt:

- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem diagnostischen TRAMPER-System: RCG-TRAMPER, Standardmodellkonfiguration in PAREST
- RCG, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Wettermodell COSMO-EU des Deutschen Wetterdienstes: RCG-COSMO-EU
- LOTOS-EUROS, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Wettermodell des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage, EZMW
- COSMO-MUSCAT, meteorologischer Antrieb mit dem prognostischen Modell COSMO des Deutschen Wetterdienstes.

Die Anwendung mehrerer Modelle bzw. Modellkombinationen diente der Ermittlung einer Ergebnisbandbreite und der Ergebnisabsicherung (Stern, 2010e, 2010g, Kerschbaumer, 2010a, 2010b, Wolke und Renner, 2010).

Die immissionsseitigen Auswirkungen der Unsicherheiten in den Emissionsreferenzen wurden ausschließlich durch Anwendungen des RCG-TRAMPER-Modells mit den im PAREST-Projekt erstellten unteren und oberen Emissionsschranken untersucht. Diese Unsicherheitsabschätzungen beziehen sich nur auf die deutschen Emissionen. Die Referenzemissionen außerhalb von Deutschland blieben bei dieser Betrachtung daher unverändert. Die größten Emissionsabweichungen nach oben gibt es in den Referenzen 2005, 2010, 2015 und 2020 in der Summe über alle Emissionen für die NO_x - und PM_{10} -Emissionen. Nach unten treten die größten Abweichungen bei den NH_3 - und den PM -Emissionen auf. Insgesamt die geringsten Abweichungen werden für die SO_2 -Emissionen ermittelt. Im Mittel sind die möglichen Abweichungen nach oben größer als diejenigen nach unten.

Die durch die Unsicherheitsbereiche der Emission verursachten Immissionsbandbreiten der Referenzen 2005, 2010, 2015 und 2020 wurden für die PM_{10} - und die NO_2 -Jahresmittelwerte berechnet.

In ländlichen Regionen beträgt die durch die Unsicherheitsbereiche der Emissionen verursachte mittlere Bandbreite der NO_2 -Jahresmittelwerte $4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, die der PM_{10} -Jahresmittelwerte $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Die für den Referenzfall 2005 berechneten NO_2 -Jahresmittelwerte könnten damit im Extremfall der unteren Emissionsschwelle im Mittel $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger (PM_{10} -Jahresmittelwerte $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) oder im Falle der oberen Emissionsschwelle um $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höher liegen (PM_{10} -Jahresmittelwerte $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

In Ballungsräumen beträgt die mittlere NO_2 -Spannbreite $5.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und reicht von $-1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ bis zu $+3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für die PM_{10} -Jahresmittelwerte wird eine Immissionsbandbreite von $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ berechnet, womit die auf den mittleren Emissionen beruhende Immissionsreferenz 2005 in Ballungsräumen bis zu $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ niedriger oder bis zu $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ höher ausfallen könnte.

In Prozenten ausgedrückt könnten die für den Referenzfall 2005 berechneten NO_2 -Jahresmittelwerte in ländlichen Regionen auch maximal knapp 9% niedriger oder maximal 25% höher liegen. Der entsprechende Bereich für die PM_{10} -Jahresmittelwerte reicht von -5% bis +7%. In Ballungsräumen umfasst die durch die Emissionsunsicherheiten hervorgerufene relative Bandbreite der NO_2 -Immissionen den Bereich von knapp -7% bis zu knapp +13%, derjenige der PM_{10} -Immissionen den Bereich von -9% bis knapp +14%.

Die für die Emissionsreferenz 2020 ermittelten Immissionsbandbreiten sind absolut betrachtet niedriger als diejenigen für die Emissionsreferenz 2005, was auf die niedrigeren Emissionen der Referenz 2020 zurückzuführen ist. Die relativen Bandbreiten sind aber denen für die Referenz 2005 ähnlich.

Das Minderungspotenzial von der Ausgangssituation 2005 bis zu den Jahren 2010, 2015 und 2020 wurde zur Abschätzung der Potenzialbandbreite auch mit den für diese Referenzjahre abgeleiteten unteren und oberen Emissionsschranken berechnet. Die relative Schwankungsbreite des mittleren NO_2 -Minderungspotenzials, d.h. des Potenzials das auf den mittleren Emissionsabschätzungen beruht, reicht in ländlichen Regionen von circa -8% (untere Emissionsschranke) bis circa +10% (obere Emissionsschranke). Die entsprechende Schwankungsbreite des PM_{10} -Minderungspotenzials reicht von circa -5% bis +3%. In Ballungsräumen liegt die relative Schwankungsbreite des mittleren NO_2 -Minderungspotenzials zwischen -5% und +6%, diejenige des mittleren PM_{10} -Minderungspotenzials zwischen -9% und +13%.

Auch die Methodik der Berechnung der Verkehrsemissionen stellt eine Unsicherheit dar, die in den oben diskutierten Emissionsbandbreiten nicht erfasst ist. Die Berechnung der Verkehrsemissionen erfolgte im PAREST-Projekt mit einer modifizierten Version des vom Umweltbundesamt verwendeten Verkehrsmodells TREMOD 4.17 (Transport Emission Model, hier genannt TREMOD 4.17M). Alternativ dazu wurden im Rahmen des Projekts auch Emissionsdatensätze erstellt, in denen die Verkehrsemissionen mit dem europäischen Modell TREMOVE, Version 2.7 berechnet wurden.

Die mit den beiden unterschiedlichen Berechnungsmethoden der Verkehrsemissionen ermittelten PM_{10} -Minderungspotenziale von 2005 nach 2020 sind vergleichbar (Stern, 2010d). Damit erhöht sich der Unsicherheitsbereich des Minderungspotenzials für PM_{10} nicht, wenn man die Verkehrsemissionen anstatt mit dem Verkehrsmodell TREMOD 4.17M mit dem Verkehrsmodell TREMOVE 2.7 berechnet. Für das NO_2 -Minderungspotenzial gilt dies nur begrenzt. In ländlichen Regionen liegt das auf der Basis von TREMOVE 2.7 berechnete Minderungspotenzial zwar nahe bei dem mittleren Potenzial auf der Basis von TREMOD 4.17M, in Ballungsgebieten ist das TREMOVE 2.7-Minderungspotenzial aber deutlich geringer als das Minderungspotenzial, das auf den mittleren Referenzemissionen unter Verwendung von TREMOD 4.17M beruht. Dies bedeutet, dass die auf Basis der mit TREMOVE 2.7 berechneten Verkehrsemissionen prognostizierten NO_2 -Abnahmen geringer sind als diejenigen auf Basis von TREMOD 4.17M. Das mit den TREMOVE-Verkehrsemissionen berechnete NO_2 -Minderungspotenzial ist sogar etwas geringer als das für die untere Emissionsschranke berechnete Potenzial, obwohl im TREMOVE 2.7-Lauf alle Emissionen außer den Verkehrsemissionen dem mittleren Stand entsprechen. Dies bedeutet, dass allein der Austausch der Berechnungsmethodik der Verkehrsemissionen eine Ergebnisbandbreite bewirken kann, die in

der Größenordnung der hier als Summe für alle Verursachergruppen berechneten Emissionsbandbreite liegt.

Die Beurteilung der mit den vier unterschiedlichen Modellkombinationen berechneten Jahresmittelwerte für die Emissionsreferenz 2005 erfolgte zum Einen durch die Ermittlung der Abweichungen vom Ensemblemittel, zum anderen durch den Vergleich mit Messungen (Stern, 2010e, 2010g).

Für den PM10-Jahresmittelwert streuen die Modellergebnisse um circa -35% bis +30% um das Ensemblemittel, d.h. den Mittelwert berechnet aus allen Einzelergebnissen. Die niedrigsten Werte berechnet das Modell LOTOS-EUROS, die höchsten Werte das Modell RCG-TRAMPER. Bei den NO₂-Jahresmittelwerten reicht die Streuung um den Mittelwert von circa -15% bis +35%. Die in PAREST standardmäßig verwendete Modellkonfiguration RCG-TRAMPER liegt damit am oberen Ende der Ergebnisbandbreite. Hauptursache der höheren Konzentrationen ist die Verwendung des auf Beobachtungen basierenden meteorologischen Treibers TRAMPER, der im Gegensatz zu den prognostischen Treibern der anderen Modelle zu Werten einiger Grenzschichtvariablen führt, die hohe Konzentrationen begünstigen.

In der räumlich gemittelten Auswertung werden die beobachteten PM10-Jahresmittelwerte im Jahr 2005 von allen Modellen unterschätzt, was ein noch nicht gelöstes Problem der meisten Modellrechnungen ist (Stern et al., 2008). Die gemessenen NO₂-Jahresmittelwerte werden von RCG-TRAMPER im Mittel überschätzt, alle anderen Modellkombinationen unterschätzen. Die Modellkombination RCG-TRAMPER weist im zeitlichen (Jahr) und räumlichen (Bewertungsklassen) Mittel von allen untersuchten Modellergebnissen die geringsten Abweichungen von den interpolierten Messfeldern für PM10, NO₂ (und auch Ozon) auf. Insgesamt umfasst die Bandbreite aller Modellergebnisse bei den PM10-Jahresmittelwerten einen Bereich von circa -55% bis -10%, bei den NO₂-Jahresmittelwerten einen Bereich von circa -25% bis +10%. Diese Abweichungen der Modellergebnisse von Beobachtungen beziehen sich auf mittlere Auswertungen für die Bewertungsklassen. Im Einzelfall, d.h. im direkten Vergleich von Stationsbeobachtungen mit den entsprechenden Modellergebnissen, können die Abweichungen größer sein und unter speziellen meteorologischen Bedingungen insbesondere bei PM10 auch den Faktor 2 (100%) erreichen.

In einem weiteren Schritt wurden die Bandbreiten der Minderungspotenziale 2005 bis 2020 bestimmt. Die verschiedenen Modelle prognostizieren bis 2020 eine Abnahme der PM10-Jahresmittelwerte zwischen 19% und 24% in ländlichen Regionen und zwischen 17% und 22% in Ballungsräumen. Die Bandbreite der ermittelten Abnahmen der NO₂-Jahresmittelwerte umfasst den Bereich von 42% bis 47% für ländliche Regionen und 33% bis 44% für Ballungsräume. Bezogen auf die aus allen Einzelergebnissen bestimmten mittleren relativen Abnahmen bedeutet dies für die bis 2020 erreichbaren Minderungspotenziale einen Unsicherheitsbereich von -20% bis + 20%.

Das umfassendste im PAREST-Projekt betrachtete Maßnahmenbündel ist das so genannte MFR-Szenario („Maximum Feasible Reduction“). Dieses Szenario umfasst alle technischen und nicht-technischen Einzelmaßnahmen, die noch zusätzlich zu den bereits in der Emissionsreferenz 2020 für das CLE-Szenario umgesetzten Maßnahmen ergriffen werden könnten. Dieses Szenario wurde ebenfalls mit allen Modellkombinationen berechnet. Die Modelle prognostizierten für das MFR2020-Szenario in Ballungsräumen eine weitere Abnahme der PM10-Jahresmittelwerte zwischen 23% und 31% und der NO₂-Jahresmittelwerte zwischen 17% und 29%. Die höchsten relativen Verstärkungen des Minderungspotenzials werden mit dem LOTOS-EUROS-Modell, die geringsten mit dem RCG-COSMO-EU-Modell berechnet. Das im PAREST-Projekt verwendete Standard-Modell RCG-TRAMPER berechnet in Ballungsräu-

men eine mit dem MFR2020-Szenario erreichbare Verstärkung des CLE2020-Minderungspotenzials von 28% für die PM10-Jahresmittelwerte und 17% für die NO₂-Jahresmittelwerte.

Die Bandbreiten der mit den Maßnahmen des CLE-Szenarios und des CLE-Szenarios+MFR2020 bis 2020 erreichbaren relativen Minderungen sind nochmals in der Tabelle 6-6 zusammengefasst.

Tabelle 6-6: Die auf Basis der Modellergebnisse RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS-EUROS und COSMO-MUSCAT ermittelte Bandbreite der relativen PM10- und NO₂-Minderungspotenziale für die Emissionsänderungen 2005 bis 2020.

PM10-Jahresmittelwerte	Bandbreite der Modellergebnisse	Standardmodell RCG-TRAMPER
Relative Abnahme bis 2020, CLE-Szenario	17% bis 22%	18%
Relative Abnahme bis 2020, CLE-Szenario+MFR2020	21% bis 28%	23%
NO₂-Jahresmittelwerte		
Relative Abnahme bis 2020, CLE-Szenario	33% bis 44%	44%
Relative Abnahme bis 2020, CLE-Szenario+MFR2020	43% bis 52%	51%

Insgesamt ergibt sich für die berechneten Jahresmittelwerte infolge der Unsicherheiten in der Emissionsdatenbasis eine PM10-Bandbreite von circa -10% bis +15% und eine NO₂-Bandbreite von circa -10% bis +25%. Die Bandbreiten der Immissionsergebnisse infolge der Anwendung verschiedener Modelle umfasst für PM10 den Bereich von -35% bis +30%, für NO₂ den Bereich von circa -15% bis +35%, jeweils bezogen auf das Ensemble-Mittel. Sie sind damit größer als die Bandbreiten verursacht durch die Unsicherheiten in den Emissionsdaten (ermittelt mit einer Modellanwendung). Die Bandbreiten sind bei einer relativen Auswertung der Modellergebnisse insgesamt deutlich geringer als bei einer absoluten Auswertung.

Neben den Berechnungen unter den meteorologischen Bedingungen des Basisjahrs 2005 wurden auch solche unter den meteorologische Bedingungen der Jahre 2003 und 2006 durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, daß 2005 bezüglich der meteorologischen Bedingungen als ein repräsentatives Jahr betrachtet werden kann während das Jahr 2003 unter immissionsklimatologischen Gesichtspunkten ein extrem ungünstiges Jahr war (Stern, 2010f). Obwohl die Modellergebnisse die meteorologischen Einflüsse gedämpfter widerspiegeln als die Realität, findet sich der aus Messungen ableitbare Einfluss der meteorologischen Bedingungen auf die Immissionen auch in den Ergebnissen der Modellrechnung wieder.

Weitere Sensitivitätsberechnungen wurden zum Einfluss der biogenen Emissionen auf die Immissionen durchgeführt. Dazu wurden neueste Erkenntnisse zur Bestimmung der biogenen Emissionen aus dem EU-Projekt NATAIR (NATAIR, 2007) in das RCG-Modell eingebracht. Die Ergebnisse zeigen, daß die Verwendung der NATAIR-Methodik die berechnete Situation in Deutschland nur geringfügig ändert (Kerschbaumer, 2010c).

Auch der Einfluss des globalen Hintergrunds auf die Modelleregebnisse wurde untersucht. Dazu wurden die standardmäßig im RCG-Modell benutzten Hintergrundkonzentrationen durch Daten des globalen TM5-Modells (Krol, 2005) ersetzt. Es zeigte sich, dass der Austausch der Randbedingungen die berechnete Situation in Deutschland nur wenig ändert (Kerschbaumer und Hannig, 2010). Durch die Koppelung des RCG-Modells mit dem globalen TM5-Modell wurde aber die Möglichkeit geschaffen, den Einfluss globaler Szenarien auf die Immissionssituation in Deutschland zu betrachten.

6.7 Ballungsraumberechnungen

Im Rahmen des Projekts wurde das RCG-Modell auch auf die Ballungsräume Berlin, München und Ruhrgebiet angewandt (Stern, 2010h). Hauptziel der Anwendung war eine immissionsseitige Abschätzung der Unterschiede, die sich durch die Verwendung unterschiedlicher Emissionsdatenbasen ergeben. Der im Rahmen des PAREST-Projekts für Deutschland erstellte Referenz-Emissionsdatensatz beruht auf dem so genannten „Top-down“-Ansatz. Der „Top-down“-Ansatz berücksichtigt keine lokalen Informationen, die z.B. aus Emissionserklärungen stammen, da diese Informationen im Allgemeinen nicht vorliegen, sondern leitet die Emissionen aus deutschlandweiten Brennstoffverbräuchen, Produktionsmengen, Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren ab. Diese nationalen Emissionen werden dann in Abhängigkeit von einer Vielzahl von Verteilparametern räumlich aufgelöst. Für die drei Ballungsräume wurden für das Referenzjahr 2005 alternativ zu dem Standard-Emissionsdatensatz auch Emissionsdatensätze erstellt, die auf lokalen Emissionen („bottom-up“-Ansatz) beruhen (Uzbasich et al., 2010). Diese Datensätze wurden hier neben dem PAREST-Datensatz für die Ausbreitungsrechnungen in den drei Ballungsräumen zur Klärung der Frage benutzt, wie weit die Verwendung unterschiedlicher Emissionsdaten zu unterschiedlichen Immissionen führt.

Die Ergebnisse der Ballungsraumberechnungen in einer Auflösung von circa $2 \times 2 \text{ km}^2$ wurden mit den im PAREST-Projekt durchgeführten größerskaligen Berechnungen (Modellgebiet Europa, Auflösung circa $30 \times 30 \text{ km}^2$; Deutschland grob, Auflösung circa $16 \times 14 \text{ km}^2$; Deutschland fein, Auflösung circa $8 \times 7 \text{ km}^2$) verglichen. Dazu zeigen Abbildung 6-5 und Abbildung 6-6 die für den Ballungsraum Berlin in den 4 verschiedenen Auflösungen berechneten PM₁₀-Jahresmittelwerte. In der Auflösung des Europegebiets (Abbildung 6-5 oben) hebt sich das Stadtgebiet von Berlin kaum im Immissionsfeld ab. Mit wachsender Auflösung treten die durch die Emissionsstrukturen geprägten Immissionsstrukturen immer deutlicher hervor. Details sind aber erst in den Ergebnissen der hoch aufgelösten Ballungsraumrechnungen sichtbar (Abbildung 6-6 unten). Es lässt sich festhalten, dass die im PAREST-Projekt für die Auswertung der Emissionsszenarien gewählte Gittergröße von circa $8 \times 7 \text{ km}^2$ (Modellgebiet Deutschland fein) für mittlere Betrachtungen, d.h. für Mittelwerte über Ballungsräumen ausreichend ist, um größere Stadtgebiete angemessen abzubilden. Für detaillierte Betrachtungen, die die durch die Emissionsverteilung vorgegebenen Immissionsstrukturen des städtischen Hintergrunds erfassen wollen, sind aber Modellrechnungen mit einer Auflösung von mindestens $2 \times 2 \text{ km}^2$, besser noch $1 \times 1 \text{ km}^2$ notwendig.

Aufgrund der durchgeführten Berechnungen konnte nicht festgestellt werden, dass einer der beiden Emissionsdatensätze („top-down“ versus „bottom-up“) zu einer besseren Abbildung der beobachteten Konzentrationen führte. In Teilen der Modellgebiete ergeben sich aber beträchtliche Konzentrationsunterschiede. Dies ist nicht verwunderlich, da die RCG-Ergebnisse lediglich die bereits im Vergleich der Emissionsdatenbasen festgestellten zum Teil großen Unterschiede (Uzbasich et al., 2010) widerspiegeln.

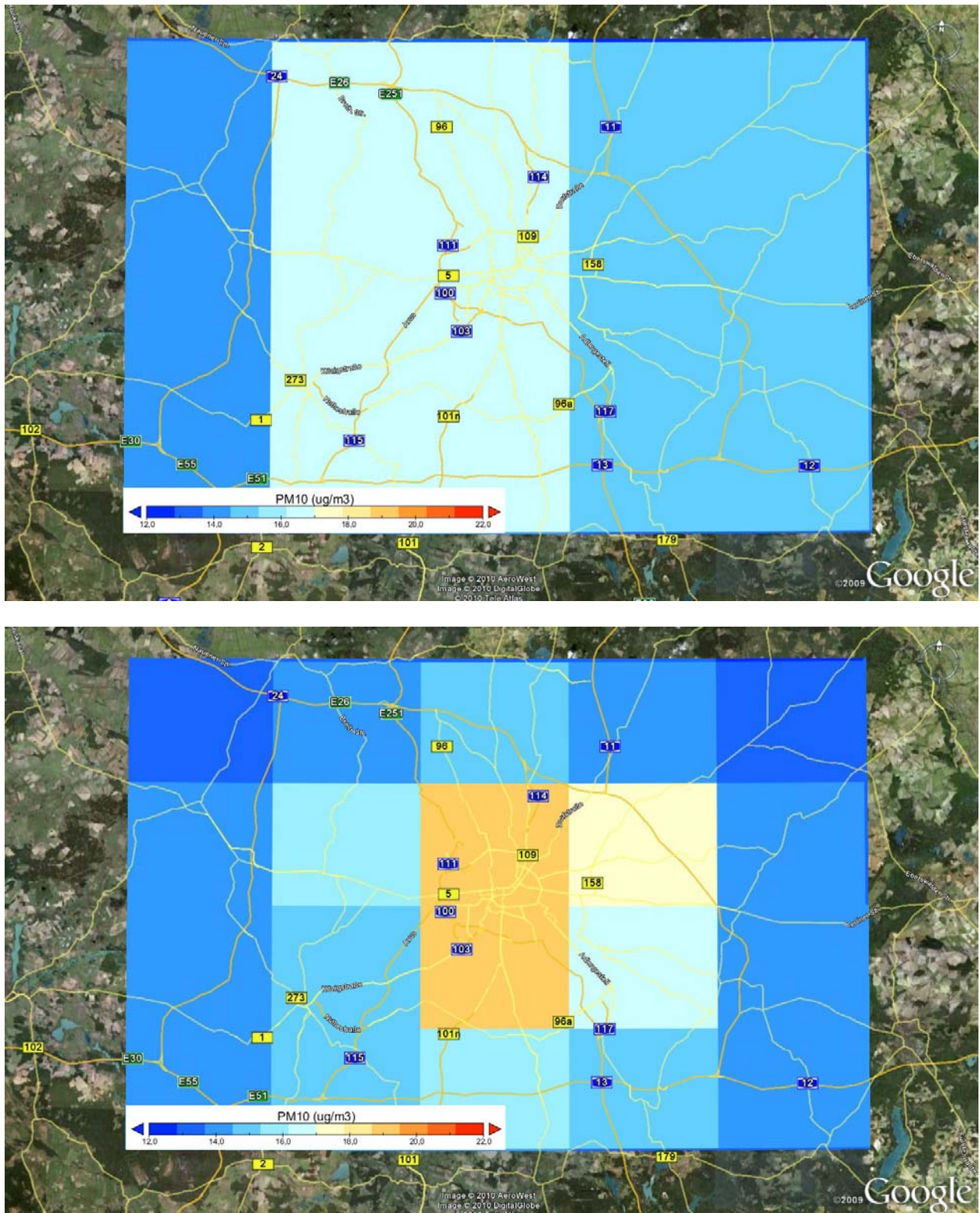


Abbildung 6-5: Berechnete PM10-Jahresmittelwerte für den Ballungsraum Berlin. PAREST-Emissionsreferenz 2005. Meteorologische Referenz 2005. Oben: Gitterauflösung 0.5° Länge x 0.25° Breite (Europagitter). Unten: Gitterauflösung 0.25° Länge x 0.125° Breite (Deutschland grob, Nest1)

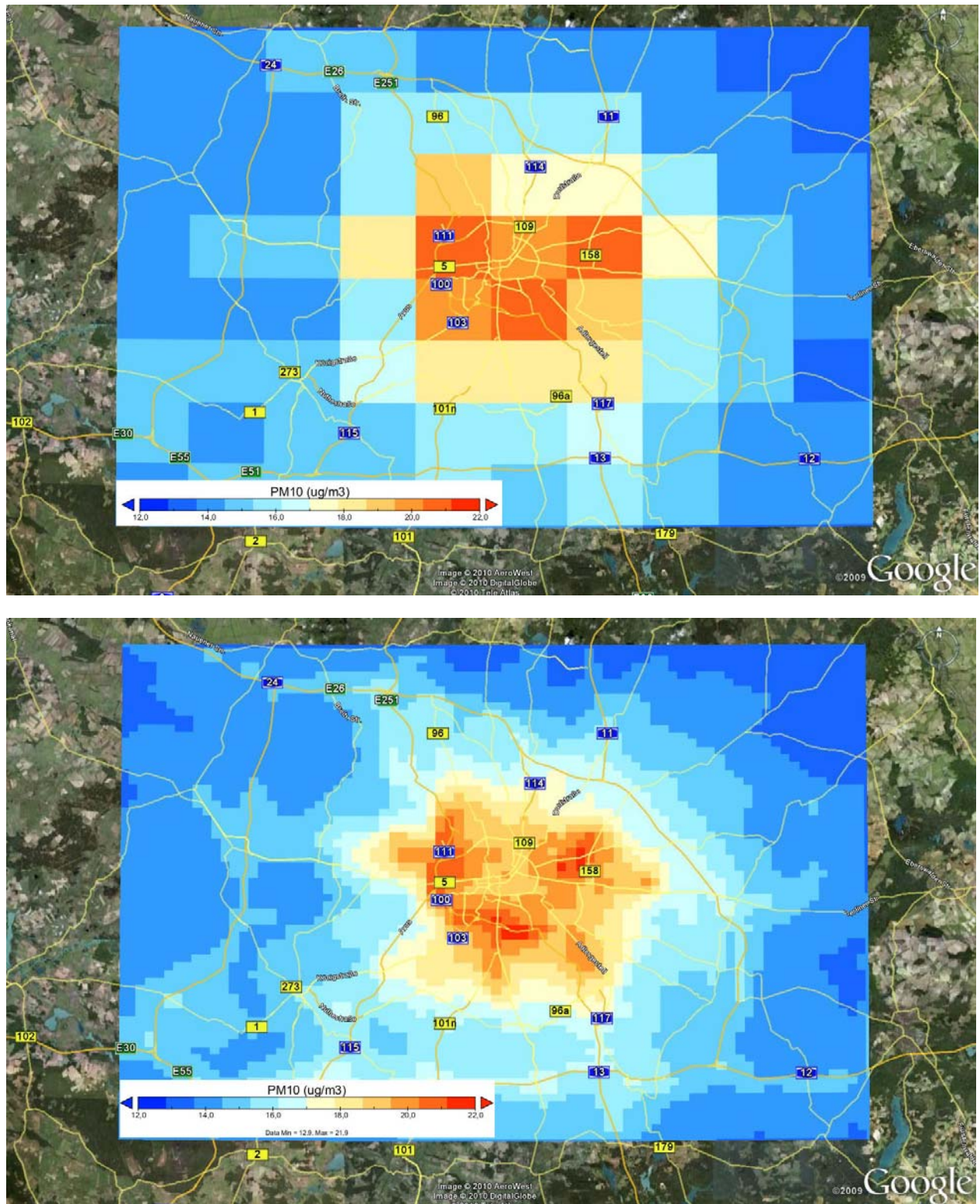


Abbildung 6-6: Berechnete PM10-Jahresmittelwerte für den Ballungsraum Berlin. PAREST-Emissionsreferenz 2005. Meteorologische Referenz 2005. Oben: Gitterauflösung 0,125° Länge x 0,0625° Breite (Deutschland fein). Unten: Ballungsraumberechnung mit Gitterauflösung 0,015625° Länge x 0,0078125° Breite, Emissionsgitter 0,015625° x 0,015625°

Die Verwendung der lokalen Emissionen führte in Berlin zu NO₂-Jahresmittelwerten, die innerhalb einer Bandbreite von -33% bis + 31% bezogen auf die Ergebnisse mit dem PAREST-Emissionsdatensatz liegen. Die größten negativen Abweichungen ergaben sich im Bereich des Flughafens Tegel sowie im Umfeld einer neuen Autobahn, deren Emissionen im verwendeten lokalen Datensatz noch nicht enthalten waren. Höhere NO₂-Jahresmittelwerte wurden auf Basis der lokalen Daten in den Innenstadtbezirken, niedrigere Werte in den Stadtrandbezirken berechnet. Die entsprechende Ergebnisspanne in München betrug -42% bis +25%, im Ruhrgebiet -25% bis + 20%. Wie in Berlin ergab sich die größte negative Abweichung bei den NO₂-Jahresmittelwerten auch in München und im Ruhrgebiet im Bereich der Flughäfen. In der PAREST-Emissionsdatenbasis sind bei den Flughafenemissionen sowohl die Emissionen am Boden als auch diejenigen in der Lande- und Startphase (LTO – landing and take-off) berücksichtigt. Bei der Immissionsmodellierung wurden die LTO-Emissionen alle der bodennahen Schicht zugeordnet, was unter Umständen zu einer Überschätzung der bodennahen Konzentrationen führen kann. Wie weit LTO-Emissionen auch bei den lokalen Emissionsdaten berücksichtigt sind, konnte nicht geklärt werden. Abgesehen von den hohen Konzentrationsunterschieden im Umfeld der Flughäfen, sind die NO₂-Konzentrationsunterschiede für Berlin und München hauptsächlich auf lokale Emissionsunterschiede der verkehrsbedingten NO_x-Emissionen zurückzuführen. Im Ruhrgebiet, dessen Emissionsstruktur weit mehr von den industriellen Emissionen geprägt ist als in den anderen beiden Ballungsgebieten, spielt zusätzlich die unterschiedliche horizontale und vertikale Verteilung der industriellen Emissionen eine wichtige Rolle.

Generell sind die Unterschiede zwischen den lokalen Emissionsdaten und den PAREST-Emissionsdaten für PM₁₀ größer als für die Stickoxide. In Berlin enthält der lokale Emissionsdatensatz mehr als 20% höhere, in München und im Ruhrgebiet dagegen zwischen 40 und 50% niedrigere PM₁₀-Emissionen. Dementsprechend werden in Berlin vor allem im Stadtzentrum auf Basis der lokalen Daten um mehr als 30% höhere PM₁₀-Jahresmittelwerte berechnet als bei Verwendung der PAREST-Emissionsdaten. In München sind die PM₁₀-Jahresmittelwerte dagegen nahezu im gesamten Modellgebiet um circa 30% niedriger, wenn man die Emissionen des Bayerischen Katasters benutzt. Lediglich im Umfeld des Flughafens werden höhere PM₁₀-Konzentrationen berechnet als mit dem PAREST-Emissionsdatensatz. Die Situation im Ruhrgebiet ist wieder durch den hohen Anteil der industriellen Emissionen geprägt. Die in den beiden Datensätzen sehr unterschiedliche räumliche Verteilung der industriellen Emissionen führt lokal zu sehr großen Konzentrationsunterschieden, die hier aber nicht belastbar quantifiziert werden können, da der im Rahmen des PAREST-Projekts erstellte lokale Emissionsdatensatz auf Basis der Emissionsdaten des Landes Nordrhein-Westfalen bezüglich der verwendeten Schornsteinhöhen für die PM₁₀-Punktquellen fehlerhaft war.

Aus dem Vergleich mit Messungen lässt sich nur schwer entscheiden, ob einer der beiden Emissionsdatensätze zu einer besseren Abbildung der beobachteten Konzentrationen führt. Tendenziell werden in Berlin die PM₁₀-Messungen der Stadtzentums-Stationen auf Basis der lokalen Emissionsdaten besser reproduziert als auf Basis der PAREST-Daten. In München ist es umgekehrt. Die Unterschiede in der Simulation der NO₂-Messungen sind deutlich geringer als diejenigen in der Simulation der PM₁₀-Konzentrationen.

7 Maßnahmenzenarien: Emissionsminderungspotenziale und Kosten

Ein wesentliches Ziel des PAREST-Projekts war es, kosteneffektive Maßnahmenbündel zur Minderung der PM₁₀- und PM_{2.5}-Konzentrationen in Deutschland zu identifizieren, die über die bisherigen gesetzlichen Maßnahmen („Current legislation“) hinausgehen. Dazu wurden Minderungsmöglichkeiten für die primären Emissionen von PM₁₀ und PM_{2.5} identifiziert und darüber hinaus auch für die sekundären Aerosolvorläufersubstanzen NO_x, SO₂, NMVOC und NH₃.

In einem ersten Schritt wurden Einzelmaßnahmen für folgende Sektoren definiert:

- Kleinf Feuerungsanlagen
- Großfeuerungsanlagen
- Industrieprozesse
- Straßenverkehr
- Andere mobile Maschinen
- Lösemittelanwendung
- Landwirtschaft

Insgesamt wurden für die betrachteten Sektoren 75 Maßnahmen identifiziert, beschrieben und bewertet, insbesondere hinsichtlich der Quantifizierung von Minderungspotenzialen und Kosten. Auf Basis der identifizierten Maßnahmen konnte für jeden der betrachteten Schadstoffe das mögliche Minderungspotenzial (Maximum Feasible Reduction (MFR)) gegenüber dem Referenzfall (Current legislation) für die Jahre 2010, 2015 und 2020 quantifiziert werden. Auf dieser Grundlage wurden, in Abstimmung mit dem Umweltbundesamt, Maßnahmenbündel für die Modellierung generiert, um die immissionsseitigen Minderungen gegenüber dem Referenzfall zu quantifizieren.

Außerdem wurden die Auswirkungen von klimapolitischen Maßnahmen auf die Luftqualität in Deutschland analysiert. Dazu wurde das Klimaschutzszenario „MWMS (Mit weiteren Maßnahmen)“ aus „Politikszenerarien IV“ (Matthes et al., 2008), bei dem es sich um ein Minderungsszenario gegenüber dem Referenzszenario „MMS“ (Mit Maßnahmen) aus Matthes et al. (2008) handelt, als zusätzliches Sensitivitätsszenario modelliert. Den Klimaschutzszenarien „MMS“ und „MWMS“ liegen eine andere Energieprojektion sowie entsprechende Klimaschutzmaßnahmen zugrunde. Die Modellierung des Minderungsszenarios „MWMS“ wurde daher im Rahmen des PAREST-Projekts als Sensitivitätsszenario betrachtet. Es wurden darüber hinaus drei weitere Sensitivitätsszenarien modelliert, in denen das „MWMS“-Szenario mit besonders attraktiven Maßnahmenbündeln aus PAREST kombiniert wurde. Ziel dieser Sensitivitätsszenarien war es zu untersuchen, wie sich die Kombination von Klimaschutzszenarien mit Maßnahmen zur Verminderung der Luftverschmutzung immissionsseitig auswirkt.

Es wurden außerdem hypothetische Maßnahmen bewertet: das Szenario „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“ sowie ein Szenario, in dem alle in Deutschland betriebenen Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen ausgetauscht wurden.

Im Folgenden wird zunächst allgemein die Methode der Bewertung der identifizierten Einzelmaßnahmen beschrieben. In einem weiteren Schritt werden die Ergebnisse für die Einzelmaßnahmen dargestellt. Auf dieser Grundlage werden die modellierten Maßnahmenbündel beschrieben. In einem letzten Schritt wird dann die Kosteneffektivität der betrachteten Maßnahmenbündel quantifiziert.

7.1 Methode zur Bewertung der Einzelmaßnahmen

Um Einzelmaßnahmen zu bewerten, wurden die Maßnahmen in weitgehend einheitlicher Weise beschrieben. Dazu wurden für alle Einzelmaßnahmen Maßnahmenblätter erstellt, die systematisch folgende Punkte enthalten:

- Titel der Maßnahme
- Kurzbeschreibung der Maßnahme
- Quantifizierung des Minderungspotenzials
- Ansatz
- Stand der Umsetzung
- Kosten der Maßnahme
- Synergien/Wechselwirkungen mit anderen Umweltzielen (bspw. Klimaschutz)

Eine ausführliche Beschreibung aller Maßnahmen ist in Theloke et al. (2010) zu finden. Darin wird die Herleitung der Minderungspotenziale detailliert dargestellt, die zur Modellierung der Konzentrationen verwendet wurden. In Theloke et al. (2010) wird auch die Herleitung der quantifizierten Gesamtkosten der Maßnahmen beschrieben. Zusätzlich wurden in Kuhn et al. (2010) aufgrund einzelner Maßnahmen entstehende Nutzenverluste mit Kosten belegt. Zur Ermittlung der Kosten einzelner Maßnahmen wurden die technischen Kosten in Kombination mit den Kosten, die maßnahmenspezifischen Nutzenverlusten zuzuordnen sind, betrachtet.

7.2 Ergebnisse der Bewertung der Einzelmaßnahmen

Es wurden insgesamt 75 Einzelmaßnahmen ausgewählt. Die in Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-7 dargestellten Maßnahmen aus den betrachteten Sektoren Landwirtschaft (Tabelle 7-1), Löse-mittelanwendung (Tabelle 7-2), Kleinf Feuerungsanlagen (Tabelle 7-3), Produktionsprozesse (Tabelle 7-4), Großfeuerungsanlagen (Tabelle 7-5), Straßenverkehr (Tabelle 7-6) und andere mobile Quellen (Tabelle 7-7) wurden in enger Abstimmung mit den Fachverantwortlichen des Umweltbundesamtes identifiziert und bewertet.

Tabelle 7-1: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Landwirtschaft

	Sektor	Subsektor	Maßnahmentitel
A001	Landwirtschaft	Tierhaltung	Anpassung der Milcheiweißgehalte an ein verändertes Verbraucherverhalten
A002	Landwirtschaft	Tierhaltung	Verkürzung der Mastdauer bei Mastbullen
A003	Landwirtschaft	Tierhaltung	Verkürzung der Mastdauer bei Mastschweinen
A004	Landwirtschaft	Tierhaltung	Verkürzung der Mastdauer bei Masthähnchen und -hühnchen
A005	Landwirtschaft	Tierhaltung	Verringerter Aufenthalt im Stall- Verlängerung des Weidegangs bei Milchkühen
A006	Landwirtschaft	Tierhaltung	Umstellung auf Festmistverfahren
A007	Landwirtschaft	Tierhaltung	Einsatz von Abluftreinigungsanlagen in der Schweinehaltung
A008	Landwirtschaft	Tierhaltung	Abdeckung der Wirtschaftsdüngerlager
A009	Landwirtschaft	Tierhaltung	Veränderung der Ausbringtechnik und Verringerung der Zeit bis zur Einarbeitung
A010	Landwirtschaft	Pflanzenbau	Anpassung der Düngermengen an den Düngerbedarf
A011	Landwirtschaft	Pflanzenbau	Verringerter Einsatz von Harnstoffdüngern
A012	Landwirtschaft	Pflanzenbau	Maßnahme: Kombination von Düngung nach Empfehlung und verringertem Einsatz von Harnstoff-Düngern
A013	Landwirtschaft	Pflanzenbau	Einsatz von Leguminosen zur N-Versorgung der Pflanzenbestände

Tabelle 7-2: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Lösemittelanwendung

	Sektor	Subsektor	Maßnahmentitel
L001	Lösemittelanwendung	Aerosolsprays	Reduktion der NMVOC-Emissionen aus Aerosolspray-Anwendungen
L002	Lösemittelanwendung	Bogenoffsetdruck	Reduktion der NMVOC-Emissionen aus Bogenoffsetdruck
L003	Lösemittelanwendung	Oberflächenreinigung	Reduktion der NMVOC-Emissionen aus Oberflächenreinigungsprozessen
L004	Lösemittelanwendung	Maschinenbau	Reduktion der NMVOC-Emissionen aus dem Maschinenbau
L005	Lösemittelanwendung	Schreinerhandwerk	Reduktion der NMVOC-Emissionen im Schreinerhandwerk
L006	Lösemittelanwendung	Siebdruck	Reduktion der NMVOC-Emissionen im Siebdruck

Tabelle 7-3: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Kleinf Feuerungsanlagen

	Sektor	Subsektor	Maßnahmentitel
K001	Kleinf Feuerungsanlagen	Erdgasfeuerungen	Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für NO _x bei gasbefeuer-ten Kleinf Feuerungsanlagen im Rahmen der geplanten Novellie-rung der 1. BImSchV
K002	Kleinf Feuerungsanlagen	Erdgasfeuerungen	Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für NO _x bei gasbefeuer-ten Kleinf Feuerungsanlagen im Rahmen der geplanten Ökodesign-Richtlinie
K003	Kleinf Feuerungsanlagen	Holzfeuerungen	Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für Staub bei Kleinf Feuerungsanlagen mit festen Brennstoffen im Rahmen der geplanten Novellierung der 1.BImSchV
K004	Kleinf Feuerungsanlagen	Ölfeuerungen	Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für NO _x bei ölbefeuer-ten Kleinf Feuerungsanlagen im Rahmen der geplanten Novellierung der 1. BImSchV
K005	Kleinf Feuerungsanlagen	Ölfeuerungen	Verschärfung der Emissionsgrenzwerte für NO _x bei ölbefeuer-ten Kleinf Feuerungsanlagen im Rahmen der geplanten Ökodesign-Richtlinie

Tabelle 7-4: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Produktionsprozesse

	Sektor	Subsektor	Maßnahmentitel
P001	Industrieprozesse	Zement	Absenkung des Emissionsgrenzwertes für NO _x auf < 200 mg/Nm ³ für alle Anlagen zur Herstellung von Zement
P002	Industrieprozesse	Glas	Absenkung des Emissionsgrenzwertes für NO _x auf < 500 mg/Nm ³ für Anlagen zur Herstellung von Glas
P003	Industrieprozesse	Sinter	Absenkung des Emissionsgrenzwertes für NO _x auf < 100 mg/Nm ³ für Sinteranlagen
P004	Industrieprozesse	Walzstahl	Absenkung des Emissionsgrenzwertes für NO _x auf < 200 mg/Nm ³ für Anlagen zur Herstellung von Walzstahl
P005	Industrieprozesse	Sinter	Absenkung des Emissionsgrenzwertes für SO ₂ auf < 100 mg/Nm ³ für Sinteranlagen
P006	Industrieprozesse	Schwefelsäureherstellung	Absenkung der SO ₂ -Emissionsgrenzwertes durch sekundäre Abgasreinigungseinrichtung bei Doppelkontaktanlagen
P007	Industrieprozesse	Zement	Absenkung des Emissionsgrenzwertes für Staub auf < 10 mg/Nm ³ für alle Anlagen zur Herstellung von Zement
P008	Industrieprozesse	Glas	Absenkung des Emissionsgrenzwertes für Staub auf < 10 mg/Nm ³ für alle Anlagen zur Glasherstellung
P009	Industrieprozesse	Sinter	Absenkung des Emissionsgrenzwertes für Staub auf < 10 mg/Nm ³ für Sinteranlagen
P0010	Industrieprozesse	Düngemittelproduktion	Absenkung der NH ₃ Emissionsgrenzwertes auf <45 mg/Nm ³ Herstellung stickstoffhaltiger Düngemittel

Tabelle 7-5: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Großfeuerungsanlagen

	Sektor	Subsektor	Maßnahmentitel
G001	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen 50-100MW	Verschärfung des NO _x -Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW im Rahmen der geplanten IED-Richtlinie (KOM 844 vom 26.05.2009)
G002	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>100MW	Verschärfung des NO _x -Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen > 100 MW FWL im Rahmen der geplanten IED-Richtlinie (KOM 844 vom 26.05.2009)
G003	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>50-100MW	Vorschläge des UBA zur Verschärfung des NO _x -Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie.
G004	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>100MW	Vorschläge des UBA zur Verschärfung des NO _x -Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen >100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie.
G005	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>50-100MW	Verschärfung des Staub-Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie
G006	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>100MW	Verschärfung des Staub-Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen >100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie
G007	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>50-100MW	Vorschläge des UBA zur Verschärfung des Staub-Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie.
G008	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>100MW	Vorschläge des UBA zur Verschärfung des Staub-Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen >100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie.
G009	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>50MW	Absenkung des Staub-Emissionsgrenzwertes von 20 mg/Nm ³ auf 10 mg/Nm ³ im Tagesmittel sowohl für bestehende als auch für neue kohlegefeuerte Großfeuerungsanlagen >50 MW FWL
G010	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen 50-100MW	Verschärfung des SO ₂ -Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie
G011	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>100MW	Verschärfung des SO ₂ -Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen >100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie
G012	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen 50-100MW	Vorschläge des UBA zur Verschärfung des SO ₂ -Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie.
G013	Großfeuerungsanlagen	Kohlefeuerungen>100MW	Vorschläge des UBA zur Verschärfung des SO ₂ -Emissionsgrenzwertes bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen > 100 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie.
G014	Großfeuerungsanlagen	Erdgaskesself Feuerungen >50 MW	Verschärfung des NO _x -Emissionsgrenzwertes für Erdgaskesself Feuerungen >50 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie
G015	Großfeuerungsanlagen	Erdgaskesself Feuerungen >50 MW	Absenkung des NO _x -Emissionsgrenzwertes auf 20 mg/Nm ³ im Jahresmittel für Erdgaskesself Feuerungen >50 MW
G016	Großfeuerungsanlagen	Gasturbinen_Erdgas>50MW	Verschärfung des NO _x -Emissionsgrenzwertes für erdgasgefeuerte Gasturbinen > 50 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie
G017	Großfeuerungsanlagen	Gasturbinen_Erdgas>50MW	Vorschläge des UBA zur Verschärfung des NO _x -Emissionsgrenzwertes für erdgasgefeuerte Gasturbinen >50 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie
G018	Großfeuerungsanlagen	Ölkesself Feuerungen >50MW	Verschärfung des SO ₂ -Emissionsgrenzwertes bei Ölkesself Feuerungen > 50 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie
G019	Großfeuerungsanlagen	Ölkesself Feuerungen >50MW	Vorschläge des UBA zur Verschärfung des SO ₂ -Emissionsgrenzwertes bei Ölkesself Feuerungen >50 MW im Rahmen der geplanten Novellierung der IED-Richtlinie.

Tabelle 7-6: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Straßenverkehr

	Sektor	Subsektor	Maßnahmentitel
V001	Straßenverkehr	MZR	Grenzwert für Verdunstungsemissionen bei motorisierten Zweirädern
V002	Straßenverkehr	Pkw	Förderung der Nachrüstung von Pkw mit Dieselpartikelfiltern
V003	Straßenverkehr	Pkw AB	Tempolimit 120 km/h auf Bundesautobahnen
V004	Straßenverkehr	Pkw AO	Tempolimit von 80 km/h auf Bundesstrassen
V005	Straßenverkehr	Pkw	Angleichung der Mineralölsteuersätze von Diesel an Ottokraftstoff
V006	Straßenverkehr	Pkw, LNf, SNF io	Gebietsbezogene Verkehrsverbote für bestimmte Fahrzeuggruppen (Umweltzonen)
V007	Straßenverkehr	Pkw, LNf, SNF io	Tempolimits innerorts
V008	Straßenverkehr	Pkw io	Verlagerung von Pkw-Fahrten innerorts aufs Fahrrad
V009	Straßenverkehr	Pkw, LNf, SNF	Förderprogramm zum kraftstoffsparenden Fahren
V010	Straßenverkehr	Pkw, LNf, SNF	Förderung der Nutzung von Leichtlaufölen
V011	Straßenverkehr	Pkw, LNf, SNF	Förderung der Nutzung von Leichtlaufreifen
V012	Straßenverkehr	SNF	Nachrüstung von schweren Nutzfahrzeugen mit SCR

Tabelle 7-7: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Andere mobile Quellen

	Sektor	Subsektor	Maßnahmentitel
MM001	Sonstiger Verkehr	Off-Road Diesel	Fortschreibung der Grenzwerte für mobile Maschinen und Geräte (Dieselmotoren)
MM002	Sonstiger Verkehr	Off-Road Otto	Fortschreibung der Grenzwerte für mobile Maschinen und Geräte (Ottomotoren)
MM003	Sonstiger Verkehr	Off-Road Flüssiggas	Grenzwerte für Fremdzündungsmotoren > 18kW in mobilen Maschinen
MM004	Sonstiger Verkehr	Off-Road Otto	Grenzwert für Verdunstungsemissionen bei mobilen Maschinen
MM005	Sonstiger Verkehr	Off-Road Otto	Nutzungsbeschränkungen für hoch emittierende Baumaschinen in innerstädtischen Gebieten
MM006	Sonstiger Verkehr	Schienenverkehr	Weiterentwicklung der Grenzwerte für Diesellokomotiven
MM007	Sonstiger Verkehr	Schienenverkehr	Differenzierung der Trassenpreise im Schienenverkehr
MM008	Sonstiger Verkehr	Binnenschiff	Weiterentwicklung der Grenzwerte in der Binnenschifffahrt
MM009	Sonstiger Verkehr	Flugverkehr	Kosteninternalisierung im Flugverkehr (Kerosinsteuer und Einbeziehung in den Emissionshandel)
MM010	Sonstiger Verkehr	Flugverkehr	Emissionsabhängige Landeentgelte im Flugverkehr

Für die in Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-7 dargestellten Maßnahmen wurden in Theloke et al. (2010a), soweit möglich, Minderungspotenziale für die Jahre 2010, 2015 und 2020 gegenüber dem in Jörß et al. (2010) beschriebenen PAREST-Referenzszenario quantifiziert. In Tabelle 7-8 bis Tabelle 7-14 sind nur die Ergebnisse für das Referenzjahr 2020 dargestellt, da dieses Bezugsjahr den Fokus der Modellierung darstellte.

In Tabelle 7-8 bis Tabelle 7-14 sind die auf Grundlage von Dämmgen et al. (2008), Jörß et al. (2010), Theloke et al. (2010a) und Kuhn et al. (2010) berechneten Minderungspotenziale und Kosten der betrachteten Maßnahmen zusammengestellt. Insbesondere die abgeschätzten Kosten geben lediglich eine Größenordnung der voraussichtlichen Minderungskosten der Maßnahme wieder und sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, die im Rahmen des PAREST-Projekts nicht abgeschätzt wurden. Die Größenordnung der spezifischen Maßnahmenkosten wird jedoch als plausibel betrachtet. Allerdings ist hierbei zu berücksichtigen, dass die Maßnahmenkosten zum Teil von der Höhe des abgeschätzten Minderungspotenzials abhängig sind.

In Tabelle 7-8 bis Tabelle 7-14 sind die Kosten der einzelnen Maßnahmen in zwei Spalten dargestellt. Diese unterscheiden sich insofern, als dass in der einen Spalte „Kosten ohne Nutzenverluste“ lediglich die „technischen“ Kosten der Maßnahme berücksichtigt sind. Darunter werden z.B. auch Kosten für die Beschilderung sowie für Informationskampagnen bei so genannten „nicht-technischen“ Maßnahmen (z.B. Tempolimit, innerorts) gefasst. In der anderen Spalte sind zusätzlich Nutzenverluste berücksichtigt. Dabei wurden in Kuhn et al. (2010) insbesondere Zeitverluste und Komfortverluste betrachtet. Eine Bewertung des Nutzens (Benefits) wurde hier nicht durchgeführt, da keine Auswirkungen auf externe Kosten berücksichtigt wurden. Daher wurden z.B. auch keine Auswirkungen auf die Lärmbelastung der Bevölkerung durch verkehrliche Maßnahmen erfasst. Es wurden bei den Tempolimit-Maßnahmen ebenfalls keine Auswirkungen auf das Unfallrisiko berücksichtigt. Im Rahmen von Sensitivitätsrechnungen wurde festgestellt, dass die aufgrund von Maßnahmen verursachten Zeitverluste, alle anderen Effekte um Größenordnungen übersteigen.

Tabelle 7-8: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Landwirtschaft
(Die Potenziale sind zum Teil nicht addierbar)

	Maßnahmen- Kurzbeschreibung	Minderung 2020 gegenüber dem Referenzszenario [t]						Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (ohne Nutzenverluste)	Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (mit Nutzenverlusten)
		NM VOC	NO _x	SO ₂	NH ₃	PM10	PM2.5		
A001	Anpassung der Milch- eiweißgehalte				5000	0	0	0	0
A002	Verkürzung Mastdauer –Mastbullen				0	0	0	0	0
A003	Verkürzung Mastdauer –Mastschweine				0	0	0	0	0
A004	Verkürzung Mastdauer Masthähnchen + - hähnchen				0	0	0	0	0
A005	Verringerter Aufenthalt im Stall-Verlängerung des Weidegangs bei Milchkühen				4000	20	10	0	0
A006	Umstellung auf Fest- mistverfahren				6000	-100	-50	192	192
A007	Abluftreinigungsanla- gen- Schweinehaltung				20000	3000	400	32	32
A008	Abdeckung Wirt- schaftsdüngerlager				5000	0	0	13	13
A009	Veränderung der Aus- bringtechnik und Ver- ringerung der Zeit bis zur Einarbeitung				20000	0	0	0	0
A010	Anpassung der Dün- germengen an den Düngerbedarf				25000	0	0	0	0
A011	Verringerter Einsatz von Harnstoffdüngern				30000	0	0	3.6	3.6
A012	Maßnahme: Kombina- tion von A010 und A011				40000	0	0	3.6	3.6
A013	Einsatz von Legumino- sen zur N-Versorgung der Pflanzenbestände				0	0	0	nq	nq

Tabelle 7-9: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Lösemittelanwendung

	Maßnahmen-Kurzbeschreibung	Minderung 2020 gegenüber dem Referenzszenario [t]						Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (ohne Nutzenverluste)	Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (mit Nutzenverlusten)
		NM VOC	NO _x	SO ₂	NH ₃	PM10	PM2.5		
L001	NM VOC-Emissionen aus Aerosolspray-Anwendungen	15284						7.6	7.6
L002	NM VOC-Emissionen aus Bogenoffsetdruck	19105						191	191
L003	NM VOC-Emissionen aus Oberflächenreinigung	12980						0	0
L004	NM VOC-Emissionen aus dem Maschinenbau	12768						128	128
L005	NM VOC-Emissionen im Schreinerhandwerk	7980						0	0
L006	NM VOC-Emissionen im Siebdruck	4585						45.9	45.9

Tabelle 7-10: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Kleinf Feuerungsanlagen (Die Potenziale sind zum Teil nicht addierbar)

	Maßnahmen-Kurzbeschreibung	Minderung 2020 gegenüber dem Referenzszenario [t]						Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (ohne Nutzenverluste)	Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (mit Nutzenverlusten)
		NM VOC	NO _x	SO ₂	NH ₃	PM10	PM2.5		
K001	NO _x bei gasbefeuelten Kleinf Feuerungsanlagen im Rahmen der geplanten Novellierung der 1. BImSchV		2855					158	158
K002	NO _x bei gasbefeuelten Kleinf Feuerungsanlagen im Rahmen der geplanten Ökodesign-Richtlinie		5856					475	475
K003	Staub bei Kleinf Feuerungsanlagen mit festen Brennstoffen im Rahmen der geplanten Novellierung der 1. BImSchV					9913	9180	580	580
K004	NO _x bei ölbefeuelten Kleinf Feuerungsanlagen im Rahmen der geplanten Novellierung der 1. BImSchV		828					97.2	97.2
K005	NO _x bei ölbefeuelten Kleinf Feuerungsanlagen im Rahmen der geplanten Ökodesign-Richtlinie		6417					292	292

Tabelle 7-11: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Produktionsprozesse

	Maßnahmen-Kurzbeschreibung	Minderung 2020 gegenüber dem Referenzszenario [t]						Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (ohne Nutzenverluste)	Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (mit Nutzenverlusten)
		NM VOC	NO _x	SO ₂	NH ₃	PM10	PM25		
P001	Emissionsgrenzwert für NO _x auf < 200 mg/Nm ³ -Herstellung von Zement		12332					39.7	39.7
P002	Emissionsgrenzwert für NO _x auf < 500 mg/Nm ³ Herstellung von Glas		4221					15.8	15.8
P003	Emissionsgrenzwert für NO _x auf < 100 mg/Nm ³ Sinteranlagen		7435					54.9	54.9
P004	Emissionsgrenzwert für NO _x auf < 200 mg/Nm ³ Herstellung von Walzstahl		6072					94.5	94.5
P005	Emissionsgrenzwert für SO ₂ auf < 100 mg/Nm ³ Sinteranlagen			18362				59.9	59.9
P006	SO ₂ -Emissionsgrenzwert durch sekundäre Abgasreinigungseinrichtung bei Doppelkontaktanlagen Schwefelsäureherstellung			3199				9.5	9.5
P007	Emissionsgrenzwert für Staub auf < 10 mg/Nm ³ Zementherstellung					769	701	44.9	44.9
P008	Emissionsgrenzwert Staub auf < 10 mg/Nm ³ Glasherstellung					266	156	29.2	29.2
P009	Emissionsgrenzwert für Staub auf < 10 mg/Nm ³ Sinteranlagen					3713	1228	48.3	48.3
P010	Absenkung der NH ₃ Emissionsgrenzwertes auf <45 mg/Nm ³ Herstellung stickstoffhaltiger Düngemittel				1103			Keine	Keine

Tabelle 7-12: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Großfeuerungsanlagen (Die Potenziale sind zum Teil nicht addierbar)

	Maßnahmen-Kurzbeschreibung	Minderung 2020 gegenüber dem Referenzszenario [t]				Kosten (ohne Nutzen- verlustraten)	Kosten (mit Nutzenver- lusten)
		NO _x	SO ₂	PM10	PM25	[10 ⁶ Euro 2000]	
G001	NO _x -Emissionsgrenzwert bei kohle-gefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW-IED-Richtlinie	467				0.3	0.3
G002	NO _x -Emissionsgrenzwert bei kohle-gefeuerten Großfeuerungsanlagen > 100 MW FWL-IED-Richtlinie	11180				49.5	49.5
G003	NO _x -Emissionsgrenzwertes bei kohle-gefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW IED-Richtlinie (UBA-Vorschlag)	467				0.3	0.3
G004	NO _x -Emissionsgrenzwert bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen >100 MW -IED-Richtlinie (UBA-Vorschlag)	11996				49.4	49.4
G005	Staub-Emissionsgrenzwert bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW – IED-Richtlinie			kM		Keine	
G006	Staub-Emissionsgrenzwert bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen >100 MW – IED-Richtlinie			kM		Keine	
G007	Staub-Emissionsgrenzwert bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW - IED-Richtlinie (UBA-Vorschlag)			kM		Keine	
G008	Staub-Emissionsgrenzwert bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen >100 -IED-Richtlinie (UBA-Vorschlag)			kM		Keine	
G009	Staub-Emissionsgrenzwert von 10 mg/Nm ³ im Tages-mittel sowohl für bestehende als auch für neue kohlegefeuerte Großfeuerungsanlagen >50 MW FWL			3493	3105	7.2	7.2
G010	SO ₂ -Emissionsgrenzwert bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW - IED-Richtlinie		1163			2.3	2.3
G011	SO ₂ -Emissionsgrenzwert bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen >100 MW - IED-Richtlinie		83780			19.8	19.8
G012	SO ₂ -Emissionsgrenzwert bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen 50-100 MW - IED-Richtlinie (UBA-Vorschlag)		890			2.3	2.3
G013	SO ₂ -Emissionsgrenzwert bei kohlegefeuerten Großfeuerungsanlagen > 100 IED-Richtlinie (UBA-Vorschlag)		85773			19.8	19.8
G014	NO _x -Emissionsgrenzwert für Erdgaskesselfeuerungen >50 MW – IED-Richtlinie	3169				21.7	21.7
G015	NO _x -Emissionsgrenzwert von 20 mg/Nm ³ im Jahresmittel für Erdgaskesselfeuerungen >50 MW	7202				96.9	96.9
G016	NO _x -Emissionsgrenzwert für erdgasgefeuerte Gasturbinen > 50 MW IED-Richtlinie	9900				32.3	32.3
G017	NO _x -Emissionsgrenzwertes für erdgasgefeuerte Gasturbinen >50 MW - IED-Richtlinie (UBA-Vorschlag)	17319				144	144
G018	SO ₂ -Emissions-grenzwert bei Ölkessel-feuerungen > 50 MW - IED-Richtlinie		kM			Keine	
G019	SO ₂ -Emissionsgrenzwert bei Ölkesselfeuerungen >50 MW - IED-Richtlinie (UBA-Vorschlag)		1346			26.0	26.0

Tabelle 7-13: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Straßenverkehr

	Maßnahmen-Kurzbeschreibung	Minderung 2020 gegenüber dem Referenzszenario [t]						Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (ohne Nutzenverluste)	Kosten [10 ⁶ Euro ₂₀₀₀] (mit Nutzenverlusten)
		NMVOC	NO _x	SO ₂	NH ₃	PM ₁₀	PM _{2.5}		
V001	Grenzwert für Verdunstungsemissionen motorisierte Zweiräder	2789	0	0	0	0	0	103	103
V002	Förderung der Nachrüstung von Pkw mit Dieselpartikelfiltern	0	0	-100	0	8	8	3.8	3.8
V003	Tempolimit 120 km/h Bundesautobahnen	317	4344	14	0	21	21	-490	-10.4
V004	Tempolimit 80 km/h Bundesstrassen	129	1156	5	0	9	9	-423	4377
V005	Angleichung der Mineralölsteuersätze von Diesel an Ottokraftstoff	1460	6100	0	0	1540	380	-243	-243
V006	Umweltzonen	Nur für ausgewählte Gebiete berechnet							
V007	Tempolimits innerorts	0	0	0	0	571	134	34.3	30334
V008	Verlagerung von Pkw-Fahrten innerorts aufs Fahrrad	1013	901	7	59	529	134	-0.2	51.3
V009	Förderprogramm zum kraftstoffsparenden Fahren	152	878	4	19	13	13	-93.5	-93.5
V010	Förderung der Nutzung von Leichtlaufölen	574	1597	16	75	21	21	2.6	2.6
V011	Förderung der Nutzung von Leichtlaufreifen	574	1597	16	75	21	21	7.0	7.0
V012	Nachrüstung von schweren Nutzfahrzeugen mit SCR	0	4751	0	0	0	0	92.5	92.5

7.3 Betrachtete Maßnahmenbündel

Auf Grundlage der identifizierten Einzelmaßnahmen wurde eine Vielzahl von Maßnahmenbündeln generiert, die entsprechend räumlich aufgelöst, für die chemische Transport-Modellierung verwendet wurden. Auf dieser Grundlage konnten dann jeweils die immissionsseitigen Auswirkungen der Maßnahmenbündel quantifiziert werden.

In Tabelle 7-15 sind die modellierten maßnahmenbündelbasierten Minderungsszenarien beschrieben^{38,39}. Tabelle 7-16 zeigt, welche Einzelmaßnahmen in den jeweiligen Maßnahmenbündeln enthalten sind. In Tabelle 7-17 sind die den jeweiligen Maßnahmenbündeln zugeordneten Minderungspotenziale für das Jahr 2020 dargestellt. Sie ergeben sich jeweils aus der Addition der Minderungspotenziale der Einzelmaßnahmen.

³⁸ Die Nummerierung der Maßnahmenbündel in der Tabelle ergab sich projekthistorisch. Bei den Maßnahmenbündeln 1-19 handelt es sich um vorläufige Testmaßnahmenbündel um die Operationskette von der Emission bis zur Immission zu testen. Bei den Maßnahmenbündeln M36 bis M42 handelte es sich um hypothetische Szenarien, bei denen jeweils einzelne Quellgruppen (Straßenverkehr, Landwirtschaft, Kleinf Feuerungen usw.) auf Null hinsichtlich ihrer Emissionen gesetzt wurden. Bei den Maßnahmenbündeln M55 bis M70 handelte es sich um Sensitivitätsszenarien. Hier wurde Sensitivitäten hinsichtlich verschiedener Meteorologien, verschiedener Verkehrsmodelle, oberer und unterer Unsicherheitsbereiche, der Verwendung anderer Meteorologietreiber und der Verwendung anderer Chemie-Transportmodelle (LOTOS-EUROS, LM-MUSCAT) untersucht. Bei den Maßnahmenbündeln M71 und M72 handelte es sich um hypothetische Szenarien unter Berücksichtigung offener Verbrennungsprozesse.

³⁹ Verwendete Abkürzungen: MFR: Maximal erreichbare Reduktion; NT: Nichttechnisch; T: Technisch; A: Landwirtschaft; L: Lösemittelanwendung; K: Kleinf Feuerungen; G: Großfeuerungen; P: Produktionsprozesse; V: Straßenverkehr; MM: Mobile Maschinen; KFA: Kleinf Feuerungsanlagen; GFA: Großfeuerungsanlagen; UBA: Umweltbundesamt; IED: Industrieemissions-Direktive; IND: Industrie.

Tabelle 7-15: Maßnahmenbündelbasierte Minderungsszenarien

Nr.	Maßnahmenbezeichnung	Beschreibung des Maßnahmenbündels
M20	MFR_Szenario	Szenario Maximal erreichbare Reduktion
M21	MFR_Szenario_NT	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Nichttechnische Maßnahmen
M22	MFR_Szenario_T	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Technische Maßnahmen
M23	MFR_Szenario_A	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Landwirtschaft
M24	MFR_Szenario_L	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Lösemittelanwendung
M25	MFR_Szenario_K	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Kleinf Feuerungen
M26	MFR_Szenario_G	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Großfeuerungen
M27	MFR_Szenario_P	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Produktionsprozesse
M28	MFR_Szenario_V	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Straßenverkehr
M29	MFR_Szenario_MM	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Andere Mobile Quellen
M30	MFR_Szenario_A_NT	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Landwirtschaft nichttechnische Maßnahmen
M31	MFR_Szenario_A_T	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Landwirtschaft technische Maßnahmen
M32	MFR_Szenario_V_T	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Straßenverkehr _technische Maßnahmen
M33	MFR_Szenario_V_NT	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Straßenverkehr nichttechnische Maßnahmen
M34	MFR_Szenario_MM_T	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _andere mobile Quellen technische Maßnahmen
M35	MFR_Szenario_MM_NT	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _andere mobile Quellen nichttechnische Maßnahmen
M43	MFR_Szenario_Tierhaltung	Szenario Maximal erreichbar Reduktion Tierhaltung
M44	Szenario KFA Ökodesign	Kleinf Feuerungsanlagen Ökodesign Direktive
M45	Szenario KFA 1 BImSchV	Kleinf Feuerungsanlagen 1 BImSchV Novellierung
M46	Szenario_GFA_IED	Großfeuerungsanlagen Implementierung der Industrieemissions Direktive
M47	Szenario_GFA_UBA_IED	Großfeuerungsanlagen Implementierung der Industrieemissions Direktive auf Basis der UBA-Vorschläge
M48	MFR_Szenario_IND_NOx	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Produktionsprozesse _NO _x
M49	MFR_Szenario_IND_Staub	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Produktionsprozesse PM
M50	Szenario_Tempolimit	Straßenverkehr_Tempolimit für Autobahnen, Bundesstraßen und Stadtstraßen
M51	Szenario_A012	Maßnahme: Kombination von Düngung nach Empfehlung und verringertem Einsatz von Harnstoff-Düngern
M52	Szenario_G009	Absenkung des Staub-Emissionsgrenzwertes von 20 mg/Nm ³ auf 10 mg/Nm ³ im Tagesmittel sowohl für bestehende als auch für neue kohlegefeuerte Großfeuerungsanlagen >50 MW FWL
M53	Szenario_V012	Nachrüstung von schweren Nutzfahrzeugen mit SCR
M54	Szenario_MM009	Kosteninternalisierung im Flugverkehr (Kerosinsteuer und Einbeziehung in den Emissionshandel)
M73	Szenario_A007	Einsatz von Abluftreinigungsanlagen in der Schweinehaltung
M74	Szenario_A009	Veränderung der Ausbringtechnik und Verringerung der Zeit bis zur Einarbeitung

Tabelle 7-16: Maßnahmenbündelbasierte Minderungsszenarien-Berücksichtigte Einzelmaßnahmen

Nr.	Beschreibung des Maßnahmenbündels	Berücksichtigte Einzelmaßnahmen
M20	Szenario Maximal erreichbare Reduktion	A001-A009, A012, L001-L006, K002, K003, K005, G003, G004, G009, G010, G013, G015, G017, G019, P001-P010, V001-V005, V007-V012, M001-MM004, M006-MM010
M21	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Nichttechnische Maßnahmen	A001-A006, A012, V002-V005, V007-V011, MM007, MM009, MM010
M22	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Technische Maßnahmen	A007-A009, L001-L006, K002, K003, K005, G003, G004, G009, G010, G013, G015, G017, G019, P001-P010, V001, V012, MM001-MM004, MM006, MM008
M23	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Landwirtschaft	A001-A009, A012
M24	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Lösemittelanwendung	L001-L006
M25	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Kleinf Feuerungen	K002, K003, K005
M26	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Großfeuerungen	G003, G004, G009, G010, G013, G015, G017, G019
M27	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Produktionsprozesse	P001-P010
M28	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Straßenverkehr	V001-V005, V007-V012
M29	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Andere Mobile Quellen	M001-M004, M006-MM010
M30	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Landwirtschaft nichttechnische Maßnahmen	A001-A006, A012
M31	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Landwirtschaft technische Maßnahmen	A007-A009
M32	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Straßenverkehr _technische Maßnahmen	V001, V012
M33	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Straßenverkehr nichttechnische Maßnahmen	V002-V005, V007-V012
M34	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _andere mobile Quellen _technische Maßnahmen	MM001-MM004, M006, M008
M35	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _andere mobile Quellen nichttechnische Maßnahmen	MM007, M009, M010
M43	Szenario Maximal erreichbar Reduktion _Tierhaltung	A001-A009
M44	Kleinf Feuerungsanlagen Ökodesign Direktive	K002, K005
M45	Kleinf Feuerungsanlagen 1 BImSchV Novellierung	K001, K003, K004
M46	Großfeuerungsanlagen _Implementierung der Industrieemissions Direktive	G001, G002, G006, G010, G011, G014, G016
M47	Großfeuerungsanlagen _Implementierung der Industrieemissions Direktive auf Basis der UBA-Vorschläge	G003, G004, G008, G012, G013, G017, G019
M48	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Produktionsprozesse NO _x	P001-P004
M49	Szenario Maximal erreichbare Reduktion _Produktionsprozesse PM	P007-P009
M50	Straßenverkehr _Tempolimit für Autobahnen, Bundesstraßen und Stadtstraßen	V003, V004, V007
M51	Maßnahme: Kombination von Düngung nach Empfehlung und verringertem Einsatz von Harnstoff-Düngern	A012
M52	Absenkung des Staub-Emissionsgrenzwertes von 20 mg/Nm ³ auf 10 mg/Nm ³ im Tagesmittel sowohl für bestehende als auch für neue kohlegefeuerte Großfeuerungsanlagen >50 MW FWL	G009
M53	Nachrüstung von schweren Nutzfahrzeugen mit SCR	V012
M54	Kosteninternalisierung im Flugverkehr	MM009
M73	Einsatz von Abluftreinigungsanlagen in der Schweinehaltung	A007
M74	Veränderung der Ausbringtontechnik und Verringerung der Zeit bis zur Einarbeitung	A009

Tabelle 7-17: Minderungspotenziale der auf Maßnahmenbündel basierenden Minderungsszenarien für das Bezugsjahr 2020

Nr.		Minderung 2020 [kt]					
		NMVOG	NO _x	SO ₂	NH ₃	PM10	PM2.5
M20	MFR	95	125	110	102	24	16
M21	MFR_NT	6	33	0.5	55	3	1
M22	MFR_T	89	92	110	46	21	15
M23	MFR_A				100	3	0.4
M24	MFR_L	73					
M25	MFR_K	12				10	9
M26	MFR_G		37	88		3	3
M27	MFR_P		30	22	1	5	2
M28	MFR_V	7	22	0.06	0.2	2.7	0.7
M29	MFR_MM	15	24	0.4	0.2	0.5	0.5
M30	MFR_A_NT				55	-0.08	-0.04
M31	MFR_A_T				45	3	0.4
M32	MFR_V_T	3	5				
M33	MFR_V_NT	4	17	0.07	0.2	2.7	0.7
M34	MFR_MM_T	13	8			0.3	0.3
M35	MFR_MM_NT	2	16	0.4	0.2	0.2	0.2
M43	MFR_Tierhaltung				60	3	0.4
M44	Small_combustion_ Ecodesign_Directive		12				
M45	Small_combustion_ 1_BImSchV_Novellierung		4			10	9
M46	Large_Combustion_IED		25	85		0.05	0.04
M47	Large_Combustion_IED_UBA		30	88		0.05	0.04
M48	MFR_Production_processes_NO _x		30				
M49	MFR Production_processes_PM					5	2
M50	Tempolimit für Autobahnen, Bundesstrassen und Stadtverkehr	0.5	7	0.02		0.6	0.2
M51	Kombination von Düngung nach Empfehlung und verringertem Einsatz von Harnstoff- Düngern				40		
M52	Absenkung des Staub-Emissions-grenzwertes auf 10 mg/Nm ³ im Tages-mittel für Großfeue- rungsanlagen >50 MWth					3.5	3.1
M53	Nachrüstung von schweren Nutzfahrzeugen mit SCR		5				
M54	Kosteninternalisierung im Flugverkehr	2	12	0.4	0.2	0.1	0.1
M73	Abluftreinigungsanlagen in der Schweinehal- tung				20	3	0.4
M74	Veränderung der Ausbringtechnik und Verrin- gerung der Zeit bis zur Einarbeitung				20		

In Tabelle 7-18 sind die den jeweiligen Maßnahmenbündeln zugeordneten Kosten dargestellt. Sie ergeben sich jeweils aus der Addition der Kosten der Einzelmaßnahmen.

Mit Hilfe des Chemie-Transport-Modells RCG wurden für alle betrachteten Maßnahmenbündel immissionsseitige Minderungen berechnet (Stern, 2010b). Auf dieser Grundlage konnten Kosteneffektivitäten hinsichtlich der Konzentrationsänderungen von PM10 und PM2.5 berechnet werden.

Tabelle 7-18: Kosten der Maßnahmenbündel

Nr.	Beschreibung des Maßnahmenbündels	Gesamtkosten des Maßnahmenbündels [10 ⁹ €] (ohne Nutzenverluste)	Gesamtkosten des Maßnahmenbündels [10 ⁹ €] (inkl. Nutzenverluste)
M20	Maximum Feasible Reduction Scenario	1.8	37.5
M21	Maximum Feasible Reduction Scenario_Non technical measures	-1.0	34.7
M22	Maximum Feasible Reduction Scenario_Technical measures	2.8	2.8
M23	Maximum Feasible Reduction Scenario_Agricultural	0.2	0.2
M24	Maximum Feasible Reduction Scenario_Solvent use	0.4	0.4
M25	Maximum Feasible Reduction Scenario_Small Combustions	1.4	1.4
M26	Maximum Feasible Reduction Scenario_Large Combustions	0.4	0.4
M27	Maximum Feasible Reduction Scenario_Production processes	0.4	0.4
M28	Maximum Feasible Reduction Scenario_On road traffic	-1.0	34.6
M29	Maximum Feasible Reduction Scenario_Other mobile sources	0.1	0.2
M30	Maximum Feasible Reduction Scenario_Agricultural non technical measures	0.2	0.2
M31	Maximum Feasible Reduction Scenario_Agricultural technical measures	0.04	0.04
M32	Maximum Feasible Reduction Scenario_on road traffic technical measures	0.2	0.2
M33	Maximum Feasible Reduction Scenario_on road traffic non technical measures	-1.2	34.4
M34	Maximum Feasible Reduction Scenario_Other mobile sources technical measures	0.1	0.1
M35	Maximum Feasible Reduction Scenario_Other mobile sources non technical measures	0	27.5
M43	Maximum Feasible Reduction Tierhaltung	0.2	0.2
M44	Small combustion Ecodesign Directive	0.8	0.8
M45	Small combustion 1 BImSchV Novellierung	0.8	0.8
M46	Large Combustion Implementation of the Industrial emission directive	0.1	0.1
M47	Large Combustion Implementation of the Industrial emission directive on base of UBA proposal	0.2	0.2
M48	Maximum Feasible Reduction Scenario_Production processes NO _x	0.2	0.2
M49	Maximum Feasible Reduction Scenario_Production processes PM	0.1	0.1
M50	On road traffic_tempolimit for highways. federal roads and urban roads	-0.9	34.7
M51	Maßnahme: Kombination von Düngung nach Empfehlung und verringertem Einsatz von Harnstoff-Düngern	0.004	0.004
M52	Absenkung des Staub-Emissionsgrenzwertes von 20 mg/Nm ³ auf 10 mg/Nm ³ im Tagesmittel sowohl für bestehende als auch für neue kohlegefeuerte Großfeuerungsanlagen >50 MW FWL	0.01	0.01
M53	Nachrüstung von schweren Nutzfahrzeugen mit SCR	0.1	0.1
M54	Kosteninternalisierung im Flugverkehr (Kerosins-teuer und Einbeziehung in den Emissionshandel)	0	0.02
M73	Einsatz von Abluftreinigungsanlagen in der Schweinehaltung	0.03	0.03
M74	Veränderung der Ausbringtechnik und Verringerung der Zeit bis zur Einarbeitung	0	0

7.4 Sensitivitätsszenarien-Klimaschutzszenarien

Als Alternative zum Referenz-Emissionsszenario (Jörß et al., 2010), das energiewirtschaftlich auf dem PAREST Energie-Referenzszenario beruht, wurden im PAREST-Projekt Berechnungen auf Basis eines Klimaschutzszenarios durchgeführt. Dafür wurde in Abstimmung mit dem UBA das MWMS (Mit weiteren Maßnahmen-Szenario) der Studie Politikszenerarien IV (PSz IV – vgl. Matthes et al., 2008) ausgewählt. Als „Bindeglied“ zwischen der PAREST-Referenz und dem MWMS diente dabei das MMS (Mit Maßnahmen-Szenario) aus PSz IV⁴⁰, welches innerhalb von Politikszenerarien IV das Referenzszenario darstellt. Die Unterschiede zwischen dem MWMS und der PAREST-Referenz können methodisch differenziert werden in

- den Unterschied der beiden Energie-Referenzszenarien „PAREST-Referenz“ und MMS und
- den durch die Modellierung von weiteren Klimaschutzmaßnahmen induzierten Unterschied zwischen MWMS und MMS.

Alle weiteren Details zur Datengenerierung und den Unterschieden zwischen den Energieszenarien sind in Jörß und Degel (2010) ausführlich beschrieben. Auch die im Folgenden kurz skizzierten Emissionsminderungen im MWMS sind dort in größerer Tiefe dargestellt.

Die SO₂-Emissionen im MWMS-Klimaschutzszenario für 2010 sind leicht höher als in der PAREST-Referenz, ab 2015 aber deutlich darunter. Dieses paradox erscheinende Ergebnis ist dadurch begründet, dass im Referenzszenario von PSz IV, also im MMS, im Sektor Haushalte & GHD⁴¹ ein deutlich höherer Einsatz von Kohlen angenommen wird als in der PAREST-Referenz. Dem steht ab 2015 im MMS verglichen mit der PAREST-Referenz ein deutlich geringerer Steinkohleeinsatz in der Stromerzeugung gegenüber, und auch im MWMS ist, verglichen mit dem MMS, ein durch Klimaschutzmaßnahmen induzierter niedrigerer Einsatz von Braun- und Steinkohle, ebenfalls in der Stromerzeugung, zu verzeichnen.

Für NO_x sind die Emissionsreduktionen im MWMS gegenüber der PAREST-Referenz bedeutend: 63 kt NO_x im Jahr 2010 (6 %) bis 156 kt NO_x im Jahr 2020 (17 %). Diese Differenzen stammen zu etwa zwei Fünfteln aus den systematischen Differenzen zwischen dem PSz IV-MMS und der PAREST-Referenz und zu drei Fünfteln aus den in PSz IV modellierten Klimaschutzmaßnahmen. Die systematischen Differenzen zwischen MMS und der PAREST-Referenz liegen vor allem im geringeren Einsatz von Diesel (in land- und forstwirtschaftlichen Maschinen) sowie Erdgas, Heizöl und Brennholz in Haushalten, im geringeren Steinkohleeinsatz in der Stromerzeugung sowie in niedrigeren Prognosen für die Zement- und Glasproduktion im MMS. Die durch Klimaschutzmaßnahmen des MWMS-Klimaschutzszenarios induzierten NO_x-Reduktionen stammen zu ca. 60% aus dem Straßenverkehr und zu geringeren Anteilen aus dem verminderten Einsatz von Braun- und Steinkohle in der Stromerzeugung. Bei den Verkehrsmaßnahmen im MWMS-Klimaschutzszenario stammen die größten Minderungswirkungen aus den Maßnahmen:

- Verdopplung der nominalen LKW-Nutzerkosten bis 2015,
- Flächendeckender Einsatz von Leichtlaufölen und -rädern bis 2020,
- Ausdehnung der LKW-Maut auf alle Fernstraßen sowie auf LKW ab 3.5t zul. Gesamtgewicht,

⁴⁰ Das MMS wird u.a. näher beschrieben in W. Jörß et al. (2010)

⁴¹ GHD = Gewerbe, Handel, Dienstleistungen

- Festsetzung von CO₂-Emissionsgrenzwerten für Neuwagen 2012:130g/km, 2030 100g/km,
- für 2010 auch Einführung der CO₂-emissionsabhängigen Kraftstoffsteuer.

Die genannten Verkehrsmaßnahmen sind näher beschrieben im Endbericht von Politiksszenarien IV, Kapitel 5.1.4 (Matthes et al., 2008).

Für die NMVOC-Emissionen ergeben sich im MWMS leicht niedrigere Emissionen, die im Saldo für 2020 den Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr zuzuordnen sind. Dabei sind dieselben Maßnahmen von Relevanz, die schon für Stickoxide genannt wurden.

Relevante Änderungen der PM₁₀-Emissionen gegenüber der PAREST-Referenz ergeben sich im MWMS erst ab 2015, 2020 erreichen sie 5 %. Diese errechneten Reduktionen sind in etwa zur einen Hälfte durch systematische Unterschiede zwischen der PSz-IV-Referenz (MMS) und der PAREST-Referenz begründet, zur anderen Hälfte durch Klimaschutzmaßnahmen im MWMS-Szenario. Minderungswirksam für PM₁₀ sind vor allem Klimaschutzmaßnahmen im Straßenverkehr sowie bei der Stromerzeugung.

Relevante Änderungen der PM_{2.5}-Emissionen gegenüber der PAREST-Referenz ergeben sich auch erst ab 2015, 2020 erreichen sie 7 %. Die Emissionsminderungsrate von 2000 bis 2020 steigt deshalb von 33 % (PAREST-Referenz) auf 38 % (MWMS). Die zwischen dem MWMS und der PAREST-Referenz errechneten Reduktionen sind zu ca. zwei Dritteln durch systematische Unterschiede zwischen der PSz-IV-Referenz (MMS) und der PAREST-Referenz begründet, und zu nur einem Drittel durch Klimaschutzmaßnahmen des MWMS. Die systematischen Differenzen zwischen dem MMS und der PAREST-Referenz liegen v.a. in den im MMS niedrigeren Annahmen für den Brennholzeinsatz in Haushalten. Im MWMS-Klimaschutzszenario fällt auf, dass Emissionssteigerungen gegenüber dem MMS durch einen erhöhten Brennholzeinsatz in Haushalten mehr als ausgeglichen werden durch Klimaschutzmaßnahmen im Straßenverkehr sowie durch weniger Braun- und Steinkohleeinsatz bei der Stromerzeugung. Für die Ammoniakemissionen ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede zwischen der PAREST-Referenz und dem MWMS-Szenario.

In Tabelle 7-19 sind die Emissionen im PAREST-Referenz-Szenario für das Referenzjahr 2020 sowie im Vergleich dazu die Emissionen im MWMS-Klimaschutzszenario (Matthes et al., 2008) für alle im PAREST-Projekt betrachteten Luftschadstoffe aufgelöst nach Sektoren dargestellt (Jörß und Degel, 2010).

Tabelle 7-19 Emissionen im PAREST-Referenzszenario für das Jahr 2020 und im Vergleich dazu die sektorweise aufgelösten Emissionen im MWMS-Klimaschutzszenario für 2020

Sector	NMVOC		Nox		SO2		NH3		PM10		PM2.5	
	PAREST_REF	MWMS	PAREST_REF	MWMS	PAREST_REF	MWMS	PAREST_REF	MWMS	PAREST_REF	MWMS	PAREST_REF	MWMS
	kt											
01 Combustion in energy and transformation industries	8	6	282	216	257	169	3	2	10	7	9	6
02 Non-industrial combustion plants	95	93	93	78	36	58	3	2	33	33	30	30
03 Combustion in manufacturing industry	4	3	65	58	62	50	1	1	16	17	8	8
04 Production processes	78	77	67	61	91	93	10	10	43	43	12	13
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geothermal energy	12	12	0	0	6	6	0	0	4	4	1	1
06 Solvent and other product use	800	800	0	0	0	0	2	2	9	9	9	9
07 Road transport	82	64	164	117	1	1	8	6	78	60	19	15
08 Other mobil sources and machinery	47	42	150	134	1	1	1	1	8	7	8	7
09 Waste treatment and disposal	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10 Agriculture	255	255	82	82	0	0	582	582	28	28	6	6
Summe	1381	1353	904	747	455	377	609	607	228	209	101	95
07_1 Road transport gasoline	26	24	24	21	0	0	7	6	0	0	0	0
07_2 Road transport diesel	45	29	140	96	1	0	1	1	2	2	2	2
07_3 Road transport LPG	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)	11	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break and road wear)	0	0	0	0	0	0	0	0	22	18	12	9
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)	0	0	0	0	0	0	0	0	53	41	5	4
04_01 Production processes, high altitude	78	77	67	61	91	93	10	10	12	13	6	6
04_02 Production processes, low altitude	0	0	0	0	0	0	0	0	30	30	6	6

Das MWMS-Klimaschutzszenario wurde räumlich aufgelöst und die immissionsseitigen Auswirkungen mit Hilfe des RCG-Modells berechnet. Die Ergebnisse sind Stern (2010b) zu entnehmen.

In einem weiteren Schritt wurden auf das MWMS-Klimaschutzszenario die folgenden Maßnahmenbündel angewendet:

- M20 (MFR)
- M23 (MFR_Landwirtschaft)
- M25 (MFR_Kleinf Feuerungen)

Zur Berechnung der Minderungspotenziale des Maßnahmenbündels M20 wurden zunächst Verkehrsmaßnahmen identifiziert, die im PAREST-MFR-Szenario und im MWMS-Klimaschutzszenario identisch waren. Dabei handelt es sich um folgende Maßnahmen:

- Angleichung der Mineralölsteuersätze von Diesel an die für Ottokraftstoffe
- Förderung der Nutzung von Leichtlaufölen
- Förderung der Nutzung von Leichtlaufreifen
- Kosteninternalisierung im Flugverkehr (Kerosinsteuer und Einbeziehung in den Emissionshandel)

Diese Maßnahmen wurden also bei der Anwendung des PAREST-MFR-Szenarios auf das MWMS-Klimaschutzszenario nicht berücksichtigt, um Doppelzählungen zu vermeiden. Auf dieser Grundlage ergaben sich für die drei Maßnahmenbündel, die auf das MWMS-Klimaschutzszenario angewendet wurden, die in Tabelle 7-20 dargestellten Minderungs-potenziale gegenüber der PAREST-Referenz (Jörß et al., 2010).

Tabelle 7-20 Minderungspotenziale des MWMS-Klimaschutzszenarios und dessen Kombination mit den PAREST-Maßnahmenbündeln M20, M23 und M25 gegenüber dem PAREST-Referenzszenario für das Bezugsjahr 2020

	Minderungspotenziale gegenüber der PAREST-Referenz					
	NMVOC	NO _x	SO ₂	NH ₃	PM10	PM2.5
	kt					
MWMS	28	157	78	0	19	7
MWMS plus MFR (M20)	118	246	153	104	39	20
MWMS plus MFR_A (M23)	28	157	78	103	22,3	7.3
MWMS plus MFR K (M25)	28	166	78	3	28,4	15.3

Für die Klimaschutzmaßnahmen und ihre Kombinationen wurden keine Kosten abgeschätzt und damit auch keine Kosteneffektivitäten hinsichtlich ihrer immissionsmindernden Wirkung. Es wurde lediglich ausgerechnet, welche Konzentrationsminderungen durch diese Maßnahmenkombinationen erzielt werden können.

7.5 Hypothetische Szenarien

Im Rahmen des PAREST-Projekts wurden zusätzliche hypothetische Szenarien hinsichtlich ihrer Minderungspotenziale und immissionsseitigen Auswirkungen bewertet. Als hypothetische Maßnahmen wurden folgende Szenarien betrachtet:

- „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“
- „Ersatz aller Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen“

Diese Szenarien dienen verschiedenen Zwecken: Das Szenario „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“ untersucht die Fragestellung, welche Auswirkungen ein reduzierter Fleischkonsum auf die Schadstoffkonzentrationen in Deutschland hätte. Das Szenario „Ersatz aller Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen“ sollte die Fragestellung beantworten, welchen Beitrag Holzfeuerungen in Deutschland an der Feinstaubbelastung, insbesondere in ländlichen Gebieten, haben.

Im Folgenden werden die zugrunde liegenden Annahmen der betrachteten hypothetischen Szenarien detailliert beschrieben und die emissionsseitigen Auswirkungen quantifiziert.

7.5.1 Verringerung des Protein-Konsums der deutschen Bevölkerung – Aufklärung der Verbraucherinnen und Verbraucher („Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“)

Dieses Szenario wird in Dämmgen et al. (2008) beschrieben. Der mittlere Protein-Bedarf⁴² einer deutschen Frau beträgt etwa 50 g/d, der eines Mannes ungefähr 60 g/d. Empfohlen wer-

⁴² Tierisches und nicht-tierisches Eiweiß

den etwa 30 g/d tierisches Eiweiß. In Adolf et al. (1995) werden als tatsächliche Protein-Aufnahmen mit der Nahrung im Mittel 71.8 g/d für Frauen und 93.5 g/d für Männer angegeben. Davon waren bei Frauen 42 g/d (30 %) tierisches Eiweiß, bei Männern 55.6 g/d (52 %). Ähnliche Anteile für tierisches Protein weist der Ernährungsbericht 2004 (DGE, 2004) auf.

Ein großer Teil der Krankheiten wird auf chronische Fehlernährung zurückgeführt, insbesondere durch zu geringe Anteile an Obst und Gemüse (DGE, 2004, Kap. 1.5.4.2). Eine bessere Aufklärung der Bevölkerung würde zu einem geringeren Protein- und Fett-Verzehr führen und die Märkte insbesondere für Nahrungsmittel tierischer Herkunft entlasten. Dies wäre nicht nur im Bereich der Tierproduktion selbst in der Größenordnung von 20 bis 30 % für alle Gase (also auch für NH_3) emissionsmindernd, sondern würde auch zu erheblichen Minderungen der Emissionen aus dem Pflanzenbau und im Vorleistungsbereich führen. Es würden sich allerdings die Einkommensstrukturen der Landwirtschaft verändern.

Bei weltweit offenen Märkten führt eine Verringerung des Eiweiß-Konsums in Deutschland nicht notwendigerweise zu einer Reduktion der Fleisch- und Milchproduktion, sondern eher zu einer Erhöhung der Exporte und wäre deshalb nicht emissionsmindernd. Diese Tatsache wird aber in diesem hypothetischen Szenario ausgeklammert.

In Kuhn et al. (2010) werden dieser Maßnahme Gesamtkosten von insgesamt 2.7 Mrd. Euro zugeordnet.

7.5.2 Ersatz aller Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen

Um die Auswirkungen der Holzfeuerungen auf die immissionsseitigen Luftschadstoffkonzentrationen zu untersuchen, wurden in einem hypothetischen Szenario für das Referenzjahr 2020 in der Quellgruppe „Kleinfeuerungsanlagen in Privathaushalten mit einer Feuerungs-wärmeleistung < 50 MW“ alle Feuerungsanlagen mit dem Energieträger „naturbelassenes Brennholz“ durch Feuerungsanlagen mit dem Energieträger Heizöl EL ersetzt. Unterschiede zwischen den Wirkungsgraden von Holz- und Ölfeuerungen wurden vernachlässigt. Deutschlandweit wurde in dieser Quellgruppe ein Endenergieeinsatz von insgesamt 296 PJ im Jahr 2020 angenommen. Je nach Energieträger (naturbelassenes Brennholz oder Öl) und den brennstoffspezifischen Emissionsfaktoren ergeben sich unterschiedliche jährliche Emissionsfrachten für die einzelnen betrachteten Luftschadstoffe, die in Tabelle 7-21 absolut dargestellt sind.

Dieser hypothetischen Maßnahme werden Kosten von insgesamt etwa 1,73 Mrd. Euro zugeordnet. Dabei wurde auf die Kostenabschätzungen aus Theloke et al. (2010a) für die Neuanschaffung von modernen Öl-Brennwertkesseln zurückgegriffen. Dies bedeutet, dass es sich eher um eine obere Kostenabschätzung handelt.

Tabelle 7-21: Herleitung der Differenz der Emissionsfrachten für das hypothetische Szenario, das im Referenzjahr 2020 alle „Kleinfeuerungsanlagen in Privathaushalten mit einer Feuerungswärmeleistung < 50 MW“ mit dem Energieträger „naturbelassenes Brennholz“ durch Ölfeuerungen ersetzt.

		Schadstoff				
		NO _x (als NO ₂)	NM VOC	SO _x (als SO ₂)	NH ₃	PM10
Basisszenario	Emissionsfaktor(kg/TJ)	52.4	289.1	6.6	0.5	95.2
	Emissionsfracht absolut (kt/a)	15.5	85.6	1.9	0.1	28.2
Ölszenario	Emissionsfaktor(kg/TJ)	32.6	1.5	32.1	2.5	0.8
	Emissionsfracht absolut (kt/a)	9.7	0.4	9.5	0.7	0.2
Differenz	Differenz (Öl-Holz) (kt/a)	- 5.9	-85.2	7.6	0.6	-28.0

8 Modellierung von Luftschadstoffen: Bewertung der Minderungspotenziale von zusätzlichen emissionsmindernden Maßnahmen

8.1 PM10 und PM2.5

Dieses Kapitel dokumentiert die immissionsseitigen Auswirkungen zusätzlicher emissionsmindernder Maßnahmen auf die PM10 und PM2.5-Luftqualität in Deutschland. Die immissionsseitigen Auswirkungen der geplanten Maßnahmen wurden auf der Basis von Berechnungen mit dem Chemie-Aerosol-Transportmodell REM-CALGRID (RCG) bestimmt. Grundlage der Szenarienrechnungen sind die im Rahmen des F&E-Vorhabens entwickelten Emissionsabschätzungen, die die Änderung der Emissionen aufgrund von technischen oder nicht-technischen Maßnahmen beschreiben. Die den Berechnungen zugrunde liegende horizontale Auflösung beträgt 0.125° Länge und 0.0625° Breite oder circa 7 km x 8 km. Das meteorologische Referenzjahr ist 2005.

Die Auswertung der Maßnahmenberechnungen erfolgte auf Basis der RCG-Ergebnisse für die Jahresmittelwerte der Stoffe PM10 und PM2.5 (Stern, 2010b). Ausgangspunkt waren die für die Emissionsreferenz 2020 berechneten Immissionsverteilungen in Deutschland. Diese Emissionsreferenz 2020 beschreibt den Zustand, der nach Umsetzung jetzt bereits beschlossener Maßnahmen im Jahr 2020 erreicht werden soll (CLE-Szenario, „current legislation“). Die hier diskutierten Maßnahmenbündel setzen auf diese Emissionsreferenz auf und umfassen weitere Minderungspotenziale, die über diejenigen der Referenz 2020 hinausgehen. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt im relativen Vergleich der Auswirkungen der zusätzlichen Maßnahmenbündel auf die Immissionsverteilung der Referenz 2020.

Es wurden folgende Maßnahmenbündel betrachtet⁴³:

- MFR, gesamt, MFR nicht-technisch, MFR technisch: M20, M21, M22
- MFR, pro Verursachergruppe: M22 bis M29
- MFR, Landwirtschaft, nicht-technisch, technisch: M30, M31
- MFR, Verkehr, technisch, nicht-technisch: M32, M33
- MFR, Sonstiger Verkehr, technisch, nicht-technisch: M34, M35
- MFR, Landwirtschaft, Tierhaltung: M43
- Kleinfeuerungsanlagen, Ökodesign: M44
- Kleinfeuerungsanlagen, 1. BImSchV: M45
- Großfeuerungsanlagen, IED-Richtlinie: M46
- Großfeuerungsanlagen, IED-Richtlinie, UBA-Entwurf: M47
- MFR, Industrie, NOx: M48
- MFR, Industrie, Feinstaub: M49
- Verkehr, Tempolimit: M50
- Landwirtschaft, Maßnahme A012: M51
- Großfeuerungsanlagen, Maßnahme G010: M52
- Verkehr, Maßnahme V012: M53
- Sonstiger Verkehr, Maßnahme M009: M54
- Landwirtschaft, Maßnahme A007: M73
- Landwirtschaft, Maßnahme A009: M74

⁴³ Die zugeordneten Maßnahmenbündel-Codierungen wurden in Kapitel 7 definiert.

Die Gruppe der MFR-Szenarien („Maximal feasible reduction“) gibt für jede Verursachergruppe die nach dem gegenwärtigen technischen und politischen Stand maximal mögliche Emissionsreduktion an. Das MFR-Szenario M20 beschreibt die maximal mögliche Reduktion in der Summe über alle Verursachergruppen. Darüber hinaus wurden folgende hypothetische Szenarien (siehe dazu auch Stern, 2010i) mit einbezogen:

- Kleinf Feuerungsanlagen: Ersatz von Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen: M59
- Landwirtschaft: Reduzierter Fleischverbrauch : M15

Ebenso mit einbezogen in die Auswertung wurden Maßnahmenbündel, die eine andere Emissionsreferenz 2020 beschreiben, bzw. auf einer anderen Referenz 2020 aufsetzen:

- Klimaschutzszenario 2020 MMS: M76
- Klimaschutzszenario 2020 MWMS: M77
- Klimaschutzszenario 2020 MWMS + Maßnahmenbündel M20 (MFR): M83
- Klimaschutzszenario 2020 MWMS + Maßnahmenbündel M23 (MFR-Landwirtschaft): M84
- Klimaschutzszenario 2020 MWMS+ Maßnahmenbündel M25 (MFR-Kleinf Feuerungen): M94

Details zu diesen Emissionsszenarien können in Theloke et al. (2010b) und Jörß und Degel (2010) gefunden werden.

Die mittlere Bewertung der Maßnahmenbündel erfolgte bevölkerungsgewichtet für die 4 Klassen mit zunehmender Bevölkerungsdichte (BVK1 bis BVK4), für Deutschland gesamt (D) und für die zur Berechnung des AEI (Average Exposure Index) ausgewählten städtischen Hintergrundstationen (siehe Kapitel 6.1). Ausgangspunkt der Betrachtung waren die bevölkerungsgewichteten PM10- und PM2.5-Konzentrationen der Referenz 2020 für diese Klassen. Die zusätzlichen Maßnahmenkombinationen setzen dann auf den Emissionszustand der Referenz 2020 auf.

Im Vorlauf zu den eigentlichen maßnahmenbündelbezogenen Berechnungen der Immissionsminderungspotenziale wurde zuerst für jede Verursachergruppe das maximal mögliche PM10-Minderungspotenzial für Deutschland berechnet, das nach Umsetzung des CLE-Szenarios 2020 (Emissionsreferenz 2020) noch zur Verfügung steht. Dieses hypothetische Minderungspotenzial ergibt sich aus der 100%igen Reduktion der im Jahre 2020 noch vorhandenen Emissionen einer Verursachergruppe. Das so berechnete maximal mögliche PM10-Minderungspotenzial liegt im Mittel bei circa $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für ganz Deutschland, circa $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die ländlichen Regionen und circa $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ für die Ballungsräume. Die verbleibende PM10-Immission in der Größenordnung von 6 bis $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ setzt sich dann zusammen aus dem Beitrag des Ferntransports über die Grenzen nach Deutschland und dem Beitrag der natürlichen Quellen in Deutschland. Der Beitrag der verursacherspezifischen Emissionen zu diesem maximalen PM10-Minderungspotenzial wurde durch sukzessives Nullsetzen der Emissionen jeder Verursachergruppe abgeschätzt. Für inerte Schadstoffe führt die Addition der Einzelbeiträge exakt zu diesem maximalen Minderungspotenzial. Für chemisch reagierende Stoffe ist dies nur näherungsweise der Fall, was eine Folge der nichtlinearen Beziehungen zwischen den Vorläuferemissionen und den über eine komplexe Kette chemischer Reaktionen entstehenden Folgeprodukten wie den sekundären Aerosolen oder NO_2 ist. Eine Änderung der Zusammensetzung der Emissionen führt auch zu einer Änderung der chemischen Abläufe und damit zu einer Änderung der Konzentrationsbeiträge. Aus diesen Gründen können die berechneten Bei-

träge der einzelnen Verursachergruppen zum PM10-Gesamtinderungspotenzial auch nur als Näherung betrachtet werden. Dies gilt insbesondere für die stark von den sekundären Aerosolen bestimmten Beiträge in ländlichen Regionen.

Es ergibt sich folgende Rangfolge für die bevölkerungsgewichteten Beiträge:

Für Deutschland (gesamt):

1. Landwirtschaft (29% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
2. Straßenverkehr (24% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
3. Industrielle Prozesse (16% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
4. Kleinf Feuerungsanlagen (13% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
5. Energietransformation (9% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
6. Industrielle Verbrennung (5% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
7. Lösemittel- und Produktanwendungen (5% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
8. Sonstiger Verkehr (4% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
9. Extraktion und Verteilung von Brennstoffen (2% des maximal möglichen Minderungspotenzials)

Für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1):

1. Landwirtschaft (47% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
2. Straßenverkehr (18% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
3. Kleinf Feuerungsanlagen (12% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
4. Energietransformation (12% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
5. Industrielle Prozesse (11% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
6. Sonstiger Verkehr (5% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
7. Industrielle Verbrennung (5% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
8. Lösemittel- und Produktanwendungen (2% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
9. Extraktion und Verteilung von Brennstoffen (2% des maximal möglichen Minderungspotenzials)

Für Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4):

1. Straßenverkehr (26% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
2. Landwirtschaft (20% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
3. Industrielle Prozesse (19% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
4. Kleinf Feuerungsanlagen (13% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
5. Energietransformation (8% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
6. Lösemittel- und Produktanwendungen (6% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
7. Industrielle Verbrennung (4% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
8. Extraktion und Verteilung von Brennstoffen (4% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
9. Sonstiger Verkehr (3% des maximal möglichen Minderungspotenzials)

Für ganz Deutschland hat die Landwirtschaft den größten Anteil am maximal möglichen Minderungspotenzial und repräsentiert zusammen mit dem Straßenverkehr mehr als die Hälfte dieses Potenzials. Auf den nächsten Plätzen liegen eng zusammen die industriellen Pro-

zessemissionen und die Kleinverbraucher. Danach folgen die Energietransformation, die industrielle Verbrennung, die Lösemittel- und Produktanwendungen, der sonstige Verkehr sowie die Extraktion und Verteilung von Brennstoffen. In den ländlichen Regionen stellt die Landwirtschaft nahezu die Hälfte des gesamtmöglichen Potenzials. Es folgt der Straßenverkehr mit einem Potenzial, das weniger als die Hälfte des Potenzials der Landwirtschaft beträgt. Auf den nächsten Plätzen liegen eng zusammen die Kleinverbraucher, die Energieerzeugung und die industriellen Prozessemissionen. In den Ballungsräumen ergibt sich eine deutlich andere Rangfolge. An erster Stelle liegt der Straßenverkehr, der etwas mehr als ein Viertel des gesamtmöglichen Potenzials stellt. Es sei angemerkt, dass dies im Wesentlichen auf die hohen nicht-auspuffgebundenen PM₁₀-Emissionen des Verkehrs zurückzuführen ist. Die Auspuffemissionen selbst stellen im Jahre 2020 nur noch ein sehr geringes PM₁₀-Minderungspotenzial. An zweiter und dritter Stelle der Rangfolge in Ballungsgebieten liegen mit einem Beitrag von circa einem Fünftel des gesamtmöglichen Potenzials die Landwirtschaft und die industriellen Prozessemissionen.

Die Maßnahmenbündel beschreiben die gegenwärtig mit technischen und nicht-technischen Maßnahmen noch erreichbaren Emissionsminderungen. Das umfassendste Maßnahmenbündel ist das MFR-Szenario M20, das alle technischen und nicht-technischen Einzelmaßnahmen bündelt. Dieses Szenario beschreibt also die maximalen Emissionsminderungen, die mit heute umsetzbaren Maßnahmen erreicht werden können. Bei den PM₁₀- und den PM_{2.5}-Emissionen führt das MFR-Szenario noch zu einer weiteren Senkung der Emissionen um circa 11% bezogen auf die Emissionen der Referenz 2020. Die entsprechenden Senkungen sind für NO_x:-14%, NMVOC:-7%, SO₂:-24% und für NH₃:-17%. Die theoretisch maximal möglichen Emissionsminderungspotenziale von 100% werden also zu weniger als einem Viertel ausgeschöpft.

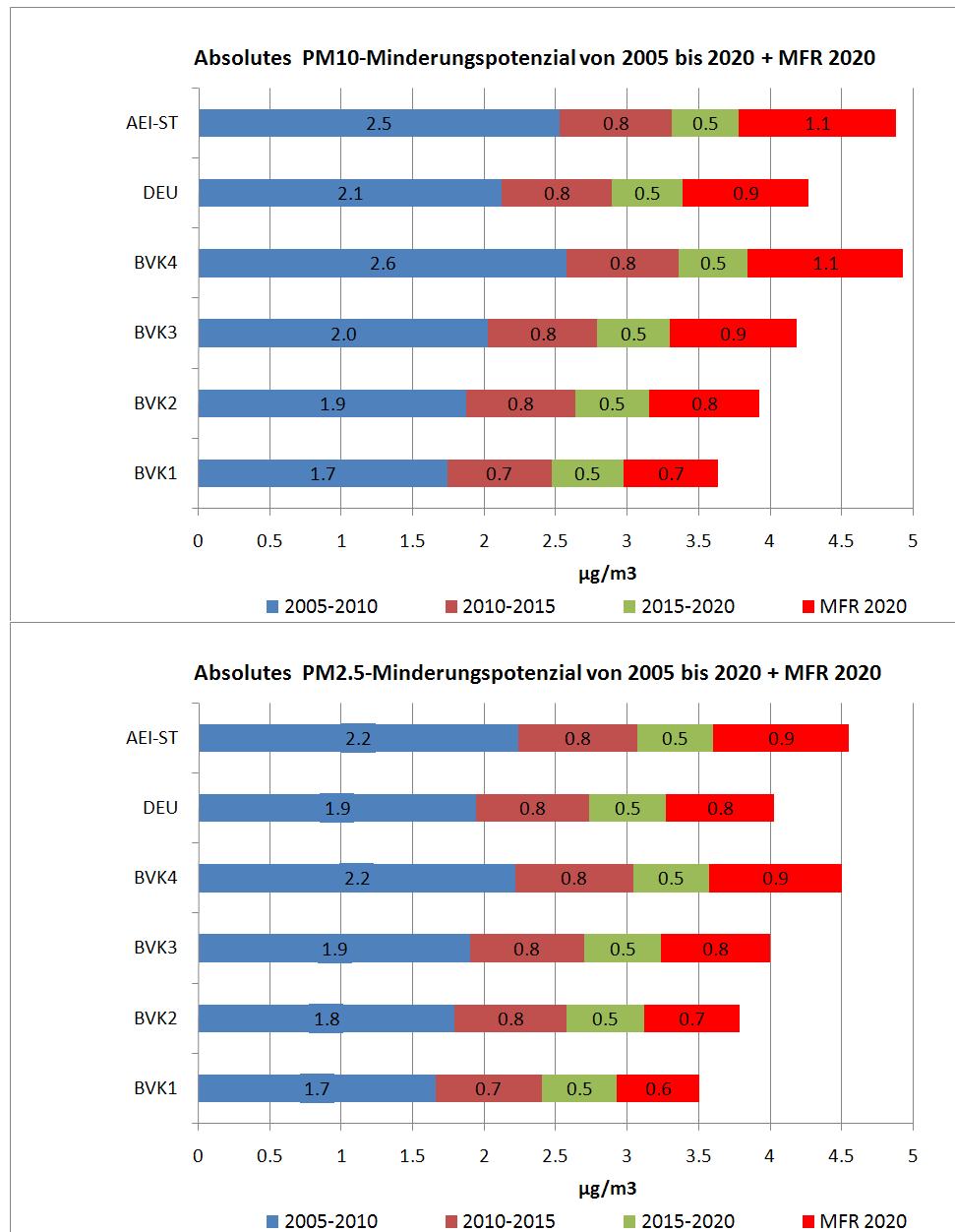


Abbildung 8-1: Absolute PM10- und PM2.5-Immissionsminderungen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015, 2015 bis 2020 (Referenzszenarien) und durch die zusätzlichen Maßnahmen des MFR-Szenarios M20 erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die 6 Bewertungsklassen. Weitere Erläuterungen im Text.

In Abbildung 8-1 sind die für das MFR-Szenario noch erreichbaren mittleren PM10- und PM2.5-Minderungspotenziale zusätzlich zu den durch die Referenzen 2010, 2015 und 2020 ausgehend vom Immissionszustand 2005 erreichbaren Immissionsminderungen dargestellt. Im deutschlandweiten Mittel sinken die PM10-Jahresmittelwerte danach durch die bis 2010 umgesetzten Maßnahmen um circa $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, durch die bis 2015 umgesetzten Maßnahmen um $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und durch die bis 2020 umgesetzten Maßnahmen um $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für die ländlichen Gebiete (Bevölkerungsklasse 1, BVK1) berechnet sich für den Zeitraum 2005 bis 2020 eine mittlere Minderung von $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, für die Ballungsräume (BVK4) von $3.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Für die PM2.5-Jahresmittelwerte liegen die erreichbaren Minderungen darunter. In Ballungsge-

bieten kann die bis 2020 erreichbare Minderung der PM10-Jahresmittelwerte mit der Umsetzung der MFR-Maßnahmen noch um $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, in ländlichen Gebieten um $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ und im deutschlandweiten Mittel um $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ erhöht werden. Tabelle 8-1 zeigt die durch das MFR-Szenario zusätzlich erreichbaren Minderungspotenziale relativ zu der Minderung, die durch die der Referenz 2020 zugrundeliegenden Maßnahmen bis 2020 erreicht werden. Das MFR-Maßnahmenbündel (M20) verstärkt demnach die mit der Emissionsreferenz 2020 erreichbare Abnahme der PM10-Jahresmittelwerte in Deutschland (gesamt) um circa 26%, in Ballungsräumen um circa 28% und in ländlichen Regionen um circa 22%. Den größeren Anteil an dieser zusätzlichen Minderung haben die technischen Maßnahmen des MFR-Szenarios. Dasselbe gilt für das zusätzliche PM2.5-Minderungspotenzial.

Neben den verursachergruppenübergreifenden MFR-Szenarien wurden auch die MFR-Szenarien pro Verursachergruppe auf ihre Wirksamkeit zur weiteren Senkung der PM10- und PM2.5-Immissionen untersucht. Bezogen auf das mit dem MFR-Szenario (M20) erreichbare zusätzliche Minderungspotenzial ergibt sich für PM10 folgende Rangfolge der Wirksamkeit:

Für Deutschland (gesamt):

1. M25, MFR-Kleinf Feuerungsanlagen (31% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M26, MFR-Großfeuerungsanlagen (24% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M23, MFR-Landwirtschaft (20% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M27, MFR-Industrielle Prozesse (11% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M28, MFR-Straßenverkehr (10% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
6. M29, MFR-Sonstiger Verkehr (6% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
7. M24, MFR-Lösemittel (<1% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)

Für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1):

1. M23, MFR-Landwirtschaft (26% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M26, MFR-Großfeuerungsanlagen (26% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M25, MFR-Kleinf Feuerungsanlagen (24% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M27, MFR-Industrielle Prozesse (11% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M28, MFR-Straßenverkehr (9% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
6. M29, MFR-Sonstiger Verkehr (5% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
7. M24, MFR-Lösemittel (<1% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)

Für Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4):

1. M25, MFR Kleinf Feuerungsanlagen (33% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M26, MFR-Großfeuerungsanlagen (23% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M23, MFR-Landwirtschaft (16% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M27, MFR-Industrielle Prozesse (11% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M28, MFR-Straßenverkehr (11% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
6. M29, MFR-Sonstiger Verkehr (6% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
7. M24, MFR-Lösemittel (1% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)

Aus der Gruppe der verursacherspezifischen MFR-Szenarien haben die Landwirtschaft in den ländlichen Gebieten und die Kleinf Feuerungsanlagen in den Ballungsräumen sowie auch in ganz Deutschland das höchste zusätzliche PM10-Minderungspotenzial. Bei den PM2.5-Potenzialen (hier nicht dargestellt) für den ländlichen Raum ist die Bedeutung der Landwirtschaft mit 22% des MFR-Potenzials geringer als bei den PM10-Potenzialen und steht nur auf dem

dritten Platz der Rangliste. Höhere PM_{2.5}-Minderungspotenziale werden für die Großfeuerungsanlagen (29%) und die Kleinf Feuerungsanlagen (26%) berechnet. Für die Ballungsräume ergibt sich für PM_{2.5} und PM₁₀ nahezu dieselbe Rangfolge. Lediglich der Straßenverkehr und der Sonstige Verkehr tauschen die Plätze. Für Deutschland (gesamt) ist die Reihenfolge für PM₁₀ und PM_{2.5} identisch. Lediglich die Anteile der einzelnen sektorspezifischen Maßnahmenbündel am Minderungspotenzial des MFR Szenarios M20 verändern sich.

Die wirksamste Maßnahmenkombination zur Senkung der PM₁₀- und PM_{2.5}-Konzentrationen aus dem Bereich Landwirtschaft ist das Maßnahmenbündel M43 „MFR-Tierhaltung“, das in Deutschland (gesamt) 61%, in Ballungsgebieten über 50% und in ländlichen Regionen weit über 60% des PM₁₀-Minderungspotenzials des MFR-Szenarios Landwirtschaft (M23) erreicht. Maßnahmenbündel M43 ist eine Mischung von technischen und nicht-technischen Maßnahmen und für sich genommen wirksamer als das Bündel der technischen (M31), bzw. nicht-technischen Maßnahmen (M30) in der Landwirtschaft. Die Einzelmaßnahme A007 (M73, „Einsatz von Abluftreinigungen im der Schweinehaltung“) deckt für den ländlichen Raum nahezu das ganze Minderungspotenzial des Bündels der technischen Maßnahmen ab. In den Ballungsgebieten macht sich diese Maßnahme dagegen weniger in einer PM₁₀-Minderung bemerkbar. Am wenigsten Wirkung zeigt die Maßnahme A009 (M74, „Tierhaltung, Veränderung der Ausbringtechnik und Verringerung der Zeit bis zur Einarbeitung“).

Bei den Kleinf Feuerungsanlagen deckt das Maßnahmenbündel M45 (Novellierung der 1. BImSchV) nahezu das gesamte PM₁₀-Minderungspotenzial des MFR-Szenarios Kleinf Feuerungen (M25) ab. Der Beitrag des Maßnahmenbündels M44 („Ökodesign“) zur Senkung der PM₁₀-Belastung ist dagegen geringfügig.

Das durch die Novellierung der IED-Richtlinie erreichbare Minderungspotenzial bei den Großfeuerungsanlagen beträgt in Deutschland (gesamt) 71% bis 76%, im ländlichen Raum zwischen 80% bis 85% und in den Ballungsräumen zwischen 65% und 70% des Potenzials des MFR-Maßnahmenbündels Großfeuerungsanlagen (M26) (die höheren Anteile gelten für das Szenario „Großfeuerungsanlagen, IED-Richtlinie, UBA-Entwurf“: M47). Die Absenkung des Staubemissionsgrenzwerts für kohlegefeuerte Anlagen (Maßnahmenbündel M52, Einzelmaßnahme G010) hat deutlich geringere Auswirkungen (circa 20% des MFR-Potenzials von M26 in Deutschland (gesamt), in ländlichen Regionen circa 10% und in Ballungsgebieten circa 25% des MFR-Potenzials von M26).

Von den beiden Maßnahmenbündeln M48 (MFR_IND_NO_x) und M49 (MFR_IND_Staub) der Verursachergruppe „Industrielle Prozesse“ ist die direkte Minderung der PM₁₀-Emissionen (M49) in Ballungsräumen die deutlich wirksamere Maßnahme zur Senkung der PM₁₀-Belastung, die knapp 50% des Gesamtpotenzials des Maßnahmenbündels M27 (MFR-Industrieprozesse) abdeckt (M48 circa 12%). In den ländlichen Gebieten ist das Minderungspotential von M48 und M49 ähnlich hoch. Jedes der beiden Maßnahmenbündel trägt mit circa 25% zum MFR-Potenzial von M27 bei. Im deutschlandweiten Mittel trägt M49 circa 40%, M48 circa 20% zum MFR-Potenzial von M27 bei.

Der überwiegende Anteil des MFR-Potenzials des Straßenverkehrs wird von den nicht-technischen Maßnahmenbündeln erreicht. Ein umfassendes Tempolimit (Maßnahmenbündel M50) bewirkt eine stärkere Reduzierung der PM₁₀-Belastung als das Bündel der weiteren technischen Maßnahmen (Maßnahmenbündel MFR-T, M32). Insgesamt sind die Auswirkungen aber gering. Auch die Nachrüstung von schweren Nutzfahrzeugen mit SCR (Maßnahmenbün-

del M53) hat nur geringe mindernde Auswirkungen auf die PM10-Belastung, da diese Maßnahme ausschließlich NO_x-Emissionen mindert.

In der Verursachergruppe „Sonstiger Verkehr“ stellen die technischen und nicht-technischen Maßnahmenbündel ungefähr je die Hälfte des gesamten MFR-Potenzials. Die Einzelmaßnahme MM009 (Kosteninternalisierung im Flugverkehr) trägt circa 90% zum Potenzial der nicht-technischen Maßnahmen bei.

Im Vergleich der Maßnahmenbündel ergibt sich für die sechs wirksamsten Maßnahmenbündel die Rangfolge:

Für Deutschland (gesamt):

1. M45: Kleinf Feuerungsanlagen, Novellierung der 1. BImSchV, (30% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M47: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, UBA-Entwurf, (18% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M46: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, (17% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M43: Landwirtschaft, MFR-Tierhaltung, (13% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M73: Landwirtschaft, Maßnahme A007, „Einsatz von Abluftreinigungen im der Schweinehaltung“ (7% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
6. M51: Landwirtschaft, Maßnahme A012, „Kombination von Dünger nach Empfehlung und verringerter Einsatz von Harnstoff-Dünger“, (7% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)

Für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1):

1. M45: Kleinf Feuerungsanlagen, Novellierung der 1. BImSchV, (23% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M47: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, UBA-Entwurf, (22% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M46: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, (20% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M43: Landwirtschaft, MFR-Tierhaltung, (17% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M73: Landwirtschaft, Maßnahme A007, „Einsatz von Abluftreinigungen im der Schweinehaltung“ (10% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
6. M51: Landwirtschaft, Maßnahme A012, „Kombination von Dünger nach Empfehlung und verringerter Einsatz von Harnstoff-Dünger“, (9% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)

Für Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4):

1. M45: Kleinf Feuerungsanlagen, Novellierung der 1. BImSchV, (33% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M47: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, UBA-Entwurf, (16% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M46: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, (15% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)

4. M43: Landwirtschaft, MFR-Tierhaltung, (9% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M52: Großfeuerungsanlagen, Absenkung des Staubemissionsgrenzwertes, (6% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
6. M51: Landwirtschaft, Maßnahme A012, „Kombination von Dünger nach Empfehlung und verringerter Einsatz von Harnstoff-Dünger“, (6% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)

Die Reihenfolge der vier wirksamsten Maßnahmen ist identisch für Deutschland (gesamt), die ländlichen Regionen und die Ballungsgebiete. Die Novellierung der 1. BImSchV für die Kleinf Feuerungsanlagen ist damit für alle Regionen Deutschlands die wirksamste Maßnahme zur weiteren Senkung der PM10- und auch der PM2.5-Belastungen (hier nicht dargestellt). An zweiter Stelle folgt die Novellierung der IED-Richtlinie, dann die Maßnahmen zur Reduzierung der Emissionen aus der Tierhaltung. Weiterführende Maßnahmen aus dem Verkehrssektor spielen nur eine untergeordnete Rolle. Insgesamt stellen die Emissionen des Straßenverkehrs in den Ballungsräumen jedoch das höchste Minderungspotenzial dar. In den ländlichen Regionen und im Deutschlandmittel hat die Verursachergruppe Landwirtschaft das größte Minderungspotenzial. Diese theoretischen Potenziale werden durch die gegenwärtig technisch und nicht-technisch möglichen Maßnahmen aber nur zum Teil ausgeschöpft.

Die durch die beiden hypothetischen Szenarien erreichbare Minderung der PM10-Konzentrationen ist deutlich höher als diejenige des wirksamsten Maßnahmenbündels. Insbesondere die Ersetzung der Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen (Szenario M59) hat ein sehr hohes PM10-Minderungspotenzial, das in Deutschland (gesamt) bei 81%, in ländlichen Regionen bei 62% und in Ballungsgebieten bei 86% des Potenzials des umfassenden MFR-Maßnahmenbündels M20 liegt und knapp 3 mal so hoch ist wie das Potenzial des Maßnahmenbündels M45 (Novellierung der 1. BImSchV). Auch das hypothetische Szenario „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“ (Maßnahmenbündel M15) trägt deutlich zur Senkung der PM10-Konzentrationen bei. Das PM10-Minderungspotenzial dieses Szenarios beträgt in Deutschland (gesamt) 39%, in ländlichen Regionen 42% und in Ballungsräumen 36% des Potenzials des MFR-Maßnahmenbündels M20 und ist damit in ländlichen Regionen circa doppelt so hoch wie das Potenzial des Maßnahmenbündels M45. In Deutschland (gesamt) ist das Potenzial von M15 etwa 30 % höher als das Potenzial von M45, in den Ballungsräumen sind die Potenziale der Maßnahmenbündel M15 und M45 vergleichbar. Das PM2.5-Minderungspotenzial des hypothetischen Szenarios M59 ist noch höher als das PM10-Minderungspotenzial: In Deutschland (gesamt) beträgt es 88%, in ländlichen Regionen beträgt es 65%, in Ballungsräumen sogar 95% des Potenzials des MFR-Maßnahmenbündels M20. Das PM2.5-Minderungspotenzial des Szenarios „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“ ist dagegen geringer als das entsprechende PM10-Minderungspotenzial.

Die auf Basis des Klimaschutzszenarios MMS (M76) für 2020 berechneten PM10-Konzentrationen liegen in ländlichen Regionen etwas niedriger, in Deutschland (gesamt) und den Ballungsgebieten etwas höher als diejenigen der Referenz 2020. Das Klimaschutzszenario MWMS (M77) hat dagegen in ländlichen Regionen eine circa 14% höhere Minderungskapazität, in Ballungsräumen eine circa 19% höhere Minderungskapazität und in Deutschland (gesamt) eine circa 17% höhere Minderungskapazität als die Referenz 2020, d.h. für das verstärkte Klimaschutzszenario MWMS werden für 2020 niedrigere PM10-Jahresmittelwerte berechnet als für die Referenz 2020. Die Ausgangssituation für weiterführende Maßnahmen zur Senkung der PM10-Belastung wäre also auf Basis des MWMS-Klimaschutzszenarios deutlich günstiger als auf Basis der CLE-Referenz 2020. Mit dem MFR-Szenario aufsetzend auf dem Klimaschutzszenario MWMS (M83) kann die durch die Referenz 2020 erreichbare

PM10-Minderung in Deutschland (gesamt) noch um ungefähr 38%, in ländlichen Gebieten noch um knapp 32% und in Ballungsräumen noch um über 40% erhöht werden. Im Vergleich dazu werden mit dem MFR-Szenario (M20) basierend auf der Referenz 2020 in Deutschland (gesamt) nur eine weitere PM10-Minderung von circa 26%, in ländlichen Gebieten von circa 22% und in Ballungsräumen von 28% erreicht.

Bei PM2.5 betragen die noch erreichbaren PM2.5-Minderungen für Deutschland (gesamt) 23% für das MFR-Szenario M20 und 28% für das Szenario MFR, Klimaschutz (M83). In ländlichen Gebieten sind es 20% für das MFR-Szenario M20 und 26% für das MFR-Szenario, Klimaschutz, in den Ballungsräumen 26% für das MFR-Szenario M20 und 30% für das Szenario MFR, Klimaschutz, alles bezogen auf die mit den gegenwärtig schon eingeleiteten Maßnahmen von 2005 bis 2020 (Referenz 2020) erreichbare Minderung

Abbildung 8-2 zeigt die von 2005 bis 2020 erreichbaren PM10-Minderungen für die Referenz 2020 und das Klimaschutzenszenario MWMS und zusätzlich die Auswirkungen der Kombination von MWMS mit dem MFR-Maßnahmenbündel sowie den beiden wirksamsten sektorspezifischen MFR-Maßnahmenbündeln, MFR-Landwirtschaft (am wirksamsten in den ländlichen Regionen) und MFR-Kleinf Feuerungsanlagen (am wirksamsten in Ballungsräumen). Für die Referenz 2020 werden mittlere Abnahmen der PM10-Jahresmittelwerte von $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (ländliche Regionen) bis $3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Ballungsräume) berechnet, für Deutschland (gesamt) (in der Abbildung nicht dargestellt) $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Auf Basis des Klimaszenarios MWMS ergeben sich Abnahmen von 3.4 bis $4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mit der Kombination des MWMS mit den PAREST MFR-Maßnahmenbündeln kann man von 2005 bis 2020 folgende mittlere Abnahmen der PM10-Jahresmittelwerte erzielen: 3.5 bis $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit dem Klimaszenario MWMS+MFR Landwirtschaft, 3.5 bis $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit dem Klimaszenario MWMS+MFR Kleinverbraucher bzw. 3.9 bis $5.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mit dem Klimaszenario MWMS+MFR-Maßnahmenbündel (M20).

Die Abbildung 8-3 zeigt für die Kombination der jeweiligen MFR-Maßnahmenbündel mit dem MWMS-Szenario noch einmal die Abnahmen der PM10-Jahresmittelwerte ausgehend von den Immissionen der PAREST-Referenz für 2020. Mit der Kombination des MFR-Maßnahmenbündels (M20) mit dem Klimaszenario MWMS erzielt man danach in Ballungsräumen eine weitere Abnahme der PM10-Immissionen von $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($+0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gegenüber dem MFR-Szenario (M20) ohne MWMS), in ländlichen Gebieten eine weitere Abnahme von $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($+0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gegenüber dem MFR-Szenario (M20) ohne MWMS). Mit der Kombination des MFR-Maßnahmenbündels Kleinf Feuerungen (M25) mit dem Klimaszenario MWMS wird eine Abnahme der Konzentration in Ballungsräumen von $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($+0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gegenüber dem MFR Kleinf Feuerung (M25) ohne MWMS) erzielt, in ländlichen Räumen von $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($+0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gegenüber dem MFR Kleinf Feuerung ohne MWMS).

Zusammenfassend ergeben die Berechnungen:

- Das Klimaschutzenszenario MWMS hat in ländlichen Regionen eine circa 14% höhere PM10-Minderungswirkung, in Ballungsräumen eine circa 19% höhere Minderungswirkung als die PAREST-Emissionsreferenz 2020, die auf den bereits heute eingeleiteten gesetzlichen Maßnahmen basiert.
- Die Untersuchung der Kombination der MFR-Maßnahmenbündel mit dem MWMS zeigte, dass die Kombination des MWMS mit dem MFR-Maßnahmenbündel „Kleinf Feuerungsanlagen“ in den Ballungsräumen, die Kombination mit dem MFR-Maßnahmenbündel „Landwirtschaft“ in den ländlichen Regionen die wirksamste Maßnahme zur weiteren Senkung der PM10-Immissionen ist.

- Unter den Maßnahmenbündeln zeigte die Novellierung der 1. BImSchV (Kleinfeuerungsanlagen) (M45) das höchste Potenzial zur weiteren Senkung der PM10-Immissionen sowohl in ländlichen Regionen als auch in den Ballungsräumen und damit auch in Deutschland (gesamt).

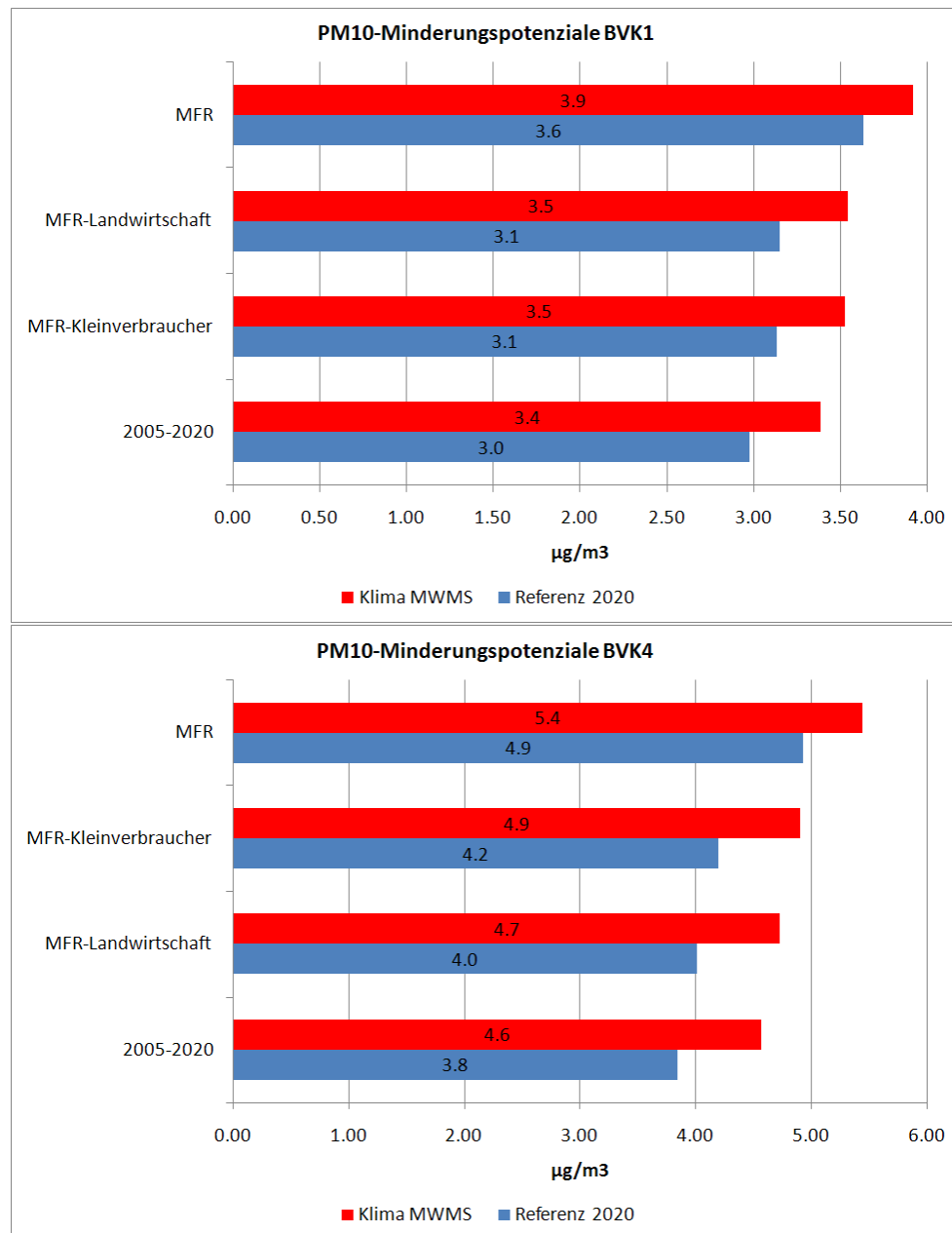


Abbildung 8-2: Absolute Minderungen der PM10-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (Referenz 2020 und Klimaschutzszenario MWMS) und durch die Kombination des MWMS- Szenarions mit dem MFR-Maßnahmenbündel (M20) (M83), mit dem MFR-Maßnahmenbündel Landwirtschaft (M23) (M84) und dem MFR-Maßnahmenbündel Kleinfeuerungsanlagen (M25) (M94) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die Bewertungsklassen BVK1 (Ländliche Regionen) und BVK4 (Ballungsräume).

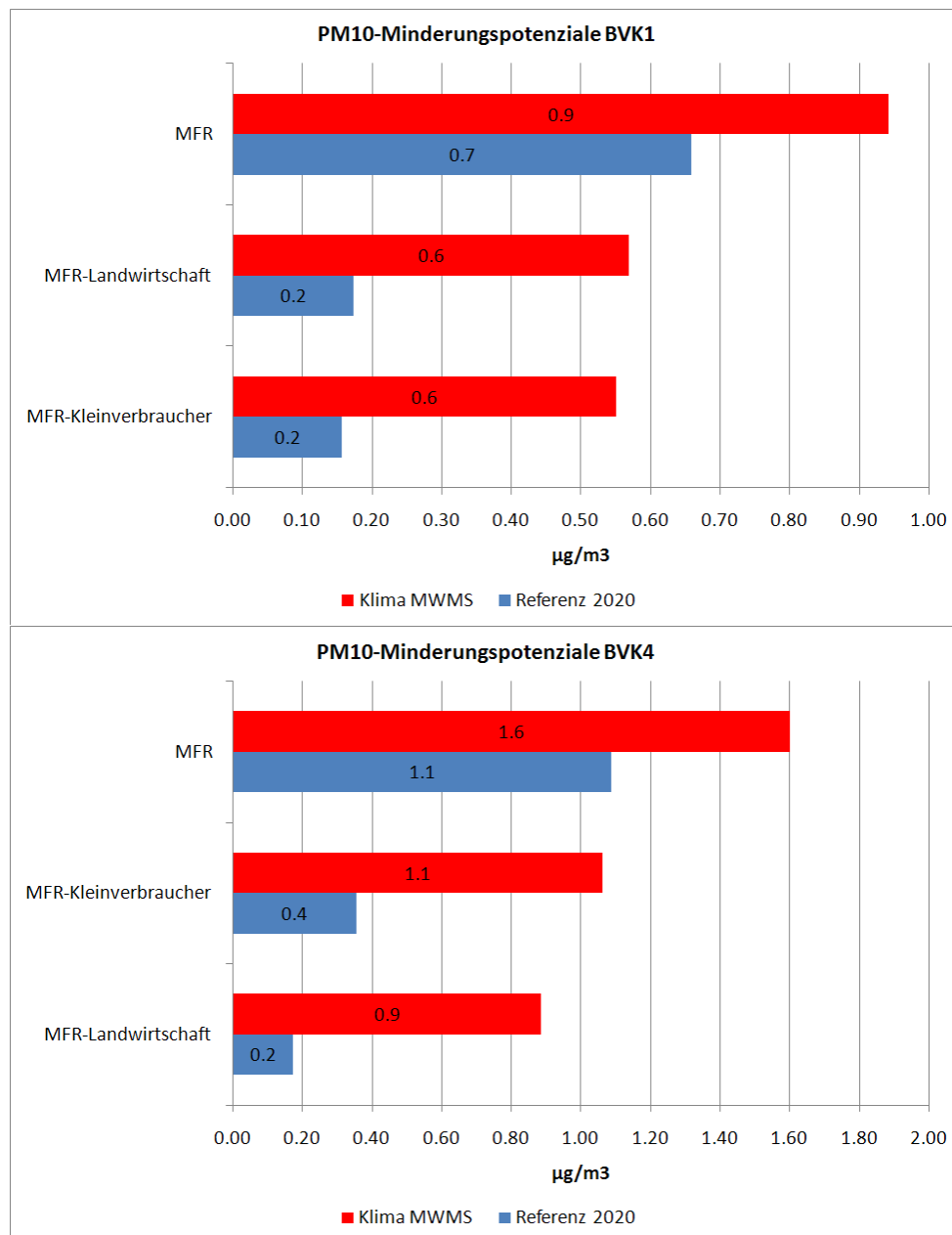


Abbildung 8-3: Absolute Minderungen der PM10-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, die ausgehend von den Konzentrationen der Referenz 2020 durch die zusätzlichen Maßnahmen des MFR-Szenarios (M20 in Kombination mit dem MWMS (M83)), des MFR-Szenarios Landwirtschaft (M23 in Kombination mit dem MWMS (M84)) und des MFR-Szenarios Kleinf Feuerungsanlagen (M25 in Kombination mit dem MWMS (M94)) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die Bewertungsklassen BVK1 (Ländliche Regionen) und BVK4 (Ballungsräume).

Tabelle 8-1: PM10- und PM2.5-Immissionsminderungspotenziale für das MFR-Maßnahmenbündel gesamt (MFR), das MFR-Maßnahmenbündel „technische Maßnahmen“ (MFR-T) und das MFR-Maßnahmenbündel „nicht-technische Maßnahmen“ (MFR-NT). Die Potenziale sind für die Bevölkerungsklassen BVK1, BVK4 und Deutschland (gesamt) als prozentuale Anteile der durch die Referenz 2020 von 2005 bis 2020 mit den bereits eingeleiteten Maßnahmen erreichbaren Minderungen ausgedrückt.

PM10-Potenzial	BVK1 Ländlicher Hintergrund	BVK4 Städtischer Hintergrund	Deutschland (gesamt)
Minderung 2005 bis 2020	100%	100%	100%
MFR-NT	5%	7%	5%
MFR-T	17%	22%	21%
MFR	22%	28%	26%

PM2.5-Potenzial	BVK1 Ländlicher Hintergrund	BVK4 Städtischer Hintergrund	Deutschland (gesamt)
Minderung 2005 bis 2020	100%	100%	100%
MFR-NT	4%	5%	4%
MFR-T	16%	21%	19%
MFR	20%	26%	23%

8.2 NO₂ und Ozon

Die Auswertung der Maßnahmenberechnungen (Stern, 2010c) erfolgte auf der Basis der RCG-Ergebnisse für die Jahresmittelwerte von NO₂. Für Ozon wurden neben dem Jahresmittelwert zusätzlich weitere Kenngrößen betrachtet: der AOT40-Wert und die Anzahl der Tage mit einem maximalen gleitenden 8-Stundenmittelwert >120 µg/m³. Ausgangspunkt waren wie bei PM₁₀ die für die Emissionsreferenz 2020 berechneten Immissionsverteilungen in Deutschland. Die hier diskutierten Maßnahmenbündel setzen auf diese Emissionsreferenz auf und umfassen weitere Minderungspotenziale, die über diejenigen der Referenz 2020 hinausgehen. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt wieder im relativen Vergleich der Auswirkungen der zusätzlichen Maßnahmenbündel auf die Immissionsverteilung der Referenz 2020.

Es wurden folgende Szenarien betrachtet, deren Umsetzung durch technische oder nicht-technische Maßnahmen möglich ist und die eine Auswirkung auf die NO₂-Immission haben:

- MFR, gesamt, MFR nicht-technisch, MFR technisch: M20, M21, M22
- MFR, pro Verursachergruppe: M22 bis M29
- MFR, Verkehr, technisch, nicht-technisch: M32, M33
- MFR, Sonstiger Verkehr, technisch, nicht-technisch: M34, M35
- Kleinfeuerungsanlagen, Ökodesign: M44
- Kleinfeuerungsanlagen, 1. BImSchV: M45
- Großfeuerungsanlagen, IED-Richtlinie: M46
- Großfeuerungsanlagen, IED-Richtlinie, UBA-Entwurf: M47
- MFR, Industrie, NO_x: M48
- Verkehr, Tempolimit: M50
- Großfeuerungsanlagen, Maßnahme G010: M52
- Verkehr, Maßnahme V012: M53
- Sonstiger Verkehr, Maßnahme M009: M54

Darüber hinaus wurden folgende hypothetische Szenarien mit einbezogen:

- Kleinfeuerungsanlagen: Ersatz von Holzfeuerungen durch Ölfeuerungen: M59

Ebenso in die Auswertung einbezogen wurden einige Szenarien, die eine andere Emissionsreferenz 2020 beschreiben, bzw. auf einer anderen Referenz 2020 aufsetzen:

- Klimaschutzszenario 2020 MMS: M76
- Klimaschutzszenario 2020 MWMS: M77
- Klimaschutzszenario 2020 MWMS + Maßnahmenbündel M20 (MFR): M83
- Klimaschutzszenario 2020 MWMS + Maßnahmenbündel M25 (MFR-Kleinfeuerungen): M94

Details zu diesen Emissionsszenarien können in Theloke et al. (2010b) und Jörß und Degel (2010) gefunden werden.

Ausgangspunkt der Betrachtung sind wie bei PM₁₀ die bevölkerungsgewichteten NO₂-Konzentrationen der Referenz 2020 für die 4 Bevölkerungsklassen, das Deutschlandmittel und das Mittel an den AEI-Stationen. Die zusätzlichen Maßnahmen setzen dann auf den Emissionszustand der Referenz 2020 auf.

Bei Ozon wurden ausschließlich die horizontalen Verteilungen der Konzentrationen diskutiert, da der hier benutzte Mittelungsansatz nur für Schadstoffe geeignet ist, deren Verteilung im Wesentlichen von der Quellverteilung vorgegeben wird. Ozon ist aber in weitaus größerem Ausmaße als NO₂ oder PM₁₀ von den meteorologischen Bedingungen abhängig. So sind im süddeutschen Raum die Ozonkonzentrationen generell höher als im norddeutschen Raum, da der Süden Deutschlands im Mittel wärmer und sonniger ist als der Norden. Die daraus resultierenden Immissionsunterschiede werden in einem rein bevölkerungsabhängigen Mittelungsverfahren verwischt.

Im Vorlauf zu den eigentlichen Maßnahmenberechnungen wurde zuerst für jede Verursacherguppe das maximal mögliche NO₂-Minderungspotenzial für Deutschland berechnet, das nach Umsetzung der CLE-Emissionsreferenz 2020 noch zur Verfügung steht. Dieses hypothetische Minderungspotenzial ergibt sich aus der 100%-igen Reduktion der im Jahre 2020 noch vorhandenen Emissionen einer Verursacherguppe. Das so berechnete maximal mögliche NO₂-Minderungspotenzial liegt im Mittel bei circa 5 µg/m³ für die ländlichen Regionen und circa 14 µg/m³ für die Ballungsräume. Die verbleibende mittlere NO₂-Immission in der Größenordnung von circa 2 µg/m³ setzt sich dann zusammen aus den Beitrag des Ferntransports über die Grenzen von Deutschland und dem Beitrag der natürlichen Quellen. Der Beitrag der verursacherspezifischen Emissionen zu diesem maximalen NO₂-Minderungspotenzial wurde durch sukzessives Nullsetzen der Emissionen jeder Verursacherguppe abgeschätzt. Für inerte Schadstoffe führt die Addition der Einzelbeiträge exakt zu diesem maximalen Minderungspotenzial. Für chemisch reagierende Stoffe ist dies nur näherungsweise der Fall, was eine Folge der nichtlinearen Beziehungen zwischen den Vorläuferemissionen und den über eine komplexe Kette chemischer Reaktionen entstehenden Folgeprodukten wie NO₂ und den sekundären Aerosolen ist. Eine Änderung der Zusammensetzung der Emissionen führt auch zu einer Änderung der chemischen Abläufe und damit zu einer Änderung der Konzentrationsbeiträge. Aus diesen Gründen können die berechneten Beiträge der einzelnen Verursacherguppen zum Gesamtminderungspotenzial auch nur als Näherung betrachtet werden.

Es ergibt sich folgende Rangfolge für die bevölkerungsgewichteten Beiträge:

Für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1):

1. Straßenverkehr (23% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
2. Landwirtschaft (22% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
3. Sonstiger Verkehr (21% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
4. Energietransformation (16% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
5. Kleinf Feuerungsanlagen (15% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
6. Industrielle Verbrennung (4% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
7. Industrielle Prozesse (4% des maximal möglichen Minderungspotenzials)

Für Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4):

1. Straßenverkehr (27% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
2. Sonstiger Verkehr (27% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
3. Kleinf Feuerungsanlagen (16% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
4. Energietransformation (14% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
5. Landwirtschaft (5% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
6. Industrielle Verbrennung (2% des maximal möglichen Minderungspotenzials)
7. Industrielle Prozesse (2% des maximal möglichen Minderungspotenzials)

In den ländlichen Regionen stellt der Straßenverkehr mit 23% den höchsten Anteil am maximal möglichen Potenzial. Dicht dahinter folgen die Landwirtschaft und der Sonstige Verkehr.

Auch in den Ballungsräumen liegt der Straßenverkehr an erster Stelle, gleichauf mit dem Sonstigen Verkehr.

Das in PAREST benutzte Verkehrsmodell zur Berechnung der verkehrsbedingten Emissionen (TREMOT 4.17, modifiziert nach Jörß et al., 2010, hier genannt TREMOD 4.17M) liefert für die Emissionsreferenz 2020 relativ niedrige NO_x-Emissionen. Berechnet man die Verkehrsemissionen mit dem europäischen Verkehrsmodell TREMOVE 2.7, ergibt sich für die entsprechende Emissionsreferenz 2020 ein höheres maximales NO₂-Minderungspotenzial (circa 18 µg/m³) als für die in PAREST standardmäßig verwendete CLE-Emissionsreferenz 2020 auf der Basis von TREMOD 4.17M (circa 14 µg/m³), da die mit TREMOVE 2.7 für 2020 berechneten NO_x-Emissionen höher sind als die mit TREMOD 4.17M berechneten Emissionen (Stern, 2010c). Dies hat auch Auswirkungen auf die hier berechneten Anteile der einzelnen Verursachergruppen am theoretisch möglichen Minderungspotenzial der deutschen Emissionen. Auf der Basis von TREMOVE 2.7 ist der Anteil des Straßenverkehrs in Ballungsräumen mit 42% am maximal möglichen Minderungspotenzial deutlich höher als auf der Basis von TREMOD 4.17M (27%). Umgekehrt ist der Anteil des Sonstigen Verkehrs auf der Basis von TREMOVE 2.7 niedriger. Die Rolle des Straßenverkehrs als möglichen Kandidaten für weitere Minderungsmaßnahmen zur Senkung der NO₂-Konzentrationen über die Emissionsreferenz 2020 hinaus wird also auf Basis des Verkehrsmodells TREMOVE 2.7 sehr viel höher bewertet als auf Basis des Verkehrsmodells TREMOD 4.17M.

Die Maßnahmenbündel beschreiben die gegenwärtig mit technischen und nicht-technischen Maßnahmen noch erreichbaren Emissionsminderungen. Das umfassendste Maßnahmenbündel ist das MFR-Szenario M20, das alle technischen und nicht-technischen Einzelmaßnahmen bündelt. Dieses Szenario beschreibt die maximalen Emissionsminderungen, die mit heute umsetzbaren Maßnahmen erreicht werden können. Bei den Stickoxiden führt das MFR-Szenario noch zu einer weiteren Senkung der Emissionen um circa 14% bezogen auf die Emissionen der Referenz 2020. Die entsprechenden Senkungen sind für NMVOC: -7%, für SO₂: -24%, für NH₃: -17% sowie für PM₁₀ und PM_{2.5} jeweils -11%. Die theoretisch maximal möglichen Emissionsminderungspotenziale von 100% werden also zu weniger als einem Viertel ausgeschöpft.

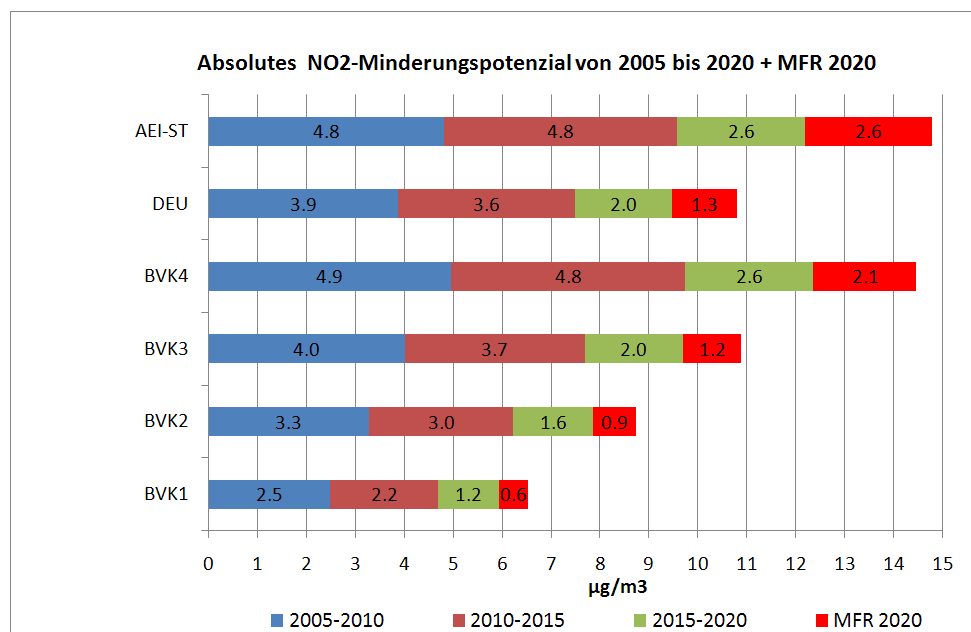


Abbildung 8-4: Absolute NO₂-Immissionsminderungen in µg/m³, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015, 2015 bis 2020 (Referenzszenarien) und durch die zusätzlichen Maßnahmen des MFR-Szenarios M20 erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die 6 Bewertungsklassen (siehe Kapitel 6.1).

In Abbildung 8-4 sind die für das MFR-Szenario noch erreichbaren mittleren NO₂-Minderungspotenziale in Relation zu den durch die Referenzen 2010, 2015 und 2020 ausgehend vom Immissionszustand 2005 erreichbaren Immissionsminderungen dargestellt. Im deutschlandweiten Mittel sinken die NO₂-Jahresmittelwerte danach durch die bis 2010 umgesetzten Maßnahmen um knapp 4 µg/m³, durch die bis 2015 umgesetzten Maßnahmen um 7.5 µg/m³ und durch die bis 2020 umgesetzten Maßnahmen um 9.5 µg/m³. Für die ländlichen Gebiete (Bevölkerungsklasse 1, BVK1) berechnet sich für den Zeitraum 2005 bis 2020 eine mittlere Minderung von knapp 6 µg/m³, für die Ballungsräume (BVK4) von mehr als 12 µg/m³. Durch das zusätzliche MFR-Szenario könnten die NO₂-Immissionen in Ballungsräumen im Mittel um weitere 2 µg/m³ gesenkt werden in ländlichen Gebieten um 0.6 µg/m³ und im deutschlandweiten Mittel um 1.3 µg/m³. Tabelle 8-2 zeigt die durch das MFR-Szenario zusätzlich erreichbaren Minderungspotenziale relativ zu der Minderung, die durch die der Referenz 2020 zugrundeliegenden Maßnahmen bis 2020 erreicht werden. Das MFR-Szenario verstärkt demnach die mit der Emissionsreferenz 2020 erreichbare Abnahme der NO₂-Jahresmittelwerte in Ballungsräumen um circa 17%, in ländlichen Regionen um circa 10%. In den ländlichen Regionen haben die technischen Maßnahmen den größeren Anteil an dieser zusätzlichen Minderung des MFR-Szenarios. In den Ballungsräumen halten sich die Wirkungen von technischen und nicht-technischen Maßnahmen in etwa die Waage.

Neben den verursachergruppenübergreifenden MFR-Szenarien wurden auch die MFR-Szenarien pro Verursachergruppe auf ihre Wirksamkeit zur weiteren Senkung der NO₂-Immissionen untersucht. Bezogen auf das mit dem MFR-Szenario erreichbare zusätzliche Minderungspotenzial ergibt sich für NO₂ folgende Rangfolge der Wirksamkeit:

Für ländliche Regionen (Bevölkerungsklasse 1):

1. M28, MFR-Straßenverkehr (26% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M29, MFR-Sonstiger Verkehr (25% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M26, MFR-Großfeuerungsanlagen (20% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M25, MFR-Kleinfeuerungsanlagen (16% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M27, MFR-Industrielle Prozesse (15% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)

Für Ballungsgebiete (Bevölkerungsklasse 4):

1. M29, MFR-Sonstiger Verkehr (40% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
2. M28, MFR-Straßenverkehr (25% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
3. M25, MFR-Kleinfeuerungsanlagen (14% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
4. M26, MFR-Großfeuerungsanlagen (11% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)
5. M27, MFR-Industrielle Prozesse (8% des Potenzials des MFR-Szenarios M20)

Aus der Gruppe der verursacherspezifischen MFR-Szenarien haben der Straßenverkehr und der Sonstige Verkehr in den ländlichen Gebieten, und vor allem der Sonstige Verkehr in den Ballungsräumen das höchste zusätzliche NO₂-Minderungspotenzial.

Bei den Kleinfeuerungsanlagen stellt die Maßnahme M44 („Ökodesign“) in Ballungsgebieten und in ländlichen Gebieten den überwiegenden Teil des gesamten NO₂-Minderungspotenzials des MFR-Szenarios Kleinfeuerungen (M25). Der Beitrag der Maßnahme M45 (Novellierung der 1. BImSchV) zur Senkung der NO₂-Belastung ist dagegen deutlich geringer.

Das durch die Novellierung der IED-Richtlinie (UBA-Vorschlag, M 47) erreichbare NO₂-Minderungspotenzial bei den Großfeuerungsanlagen stellt in ländlichen Gebieten circa 16% des Potenzials für das MFR-Szenario M20, in Ballungsräumen circa 9%.

Die Einzelmaßnahme M48 bei der Verursacherguppe „Industrielle Prozesse“ beinhaltet eine starke Minderung der NO_x-Emissionen, die in ländlichen Gebieten zu einem NO₂-Minderungspotenzial von 15%, in den Ballungsräumen von 8% des Potenzials des MFR-Szenarios M20 führt. Diese Minderungen entsprechen nahezu dem gesamten Minderungspotenzial des MFR-Szenarios Produktionsprozesse (M27).

Das MFR-Szenario Straßenverkehr trägt in ländlichen Regionen mit 26% der Minderung des MFR-Szenarios M20, in Ballungsräumen mit 25% zur weiteren Senkung der NO₂-Belastung bei. Der überwiegende Anteil des Potenzials wird dabei von den nicht-technischen Maßnahmen gestellt. Ein umfassendes Tempolimit (Maßnahmenbündel M50) bewirkt eine stärkere Reduzierung der NO₂-Belastung (in Ballungsräumen 8% des Potenzials von M20) als das Bündel der weiteren technischen Maßnahmen, Maßnahmenbündel M32 MFR-T (in Ballungsräumen 5% des Potenzials von M20). Die Nachrüstung von schweren Nutzfahrzeugen mit SCR (Maßnahme M53) hat in etwa dieselbe Auswirkung auf die NO₂-Belastung wie das Gesamtbündel der technischen Maßnahmen (M32).

Im Mittel führt das MFR-Szenario Sonstiger Verkehr (M29) zu einer Minderung der NO₂-Belastung, die in ländlichen Gebieten circa 25% des Potenzials des MFR-Szenarios M20 oder 2.7% der durch die Referenz 2020 erreichbaren Minderung beträgt, in den Ballungsräumen sind es sogar 40% des Potenzials des MFR-Szenarios M20 und knapp 7% des Potenzials der Referenz 2020. Der Großteil des Potenzials wird dabei von den hier untersuchten nicht-technischen Maßnahmen gestellt. Der Beitrag der nicht-technischen Maßnahmen im Flugverkehr wird hier zu hoch bewertet sein, da der Emissionsdatensatz zum Einen keine Differenzierung der Flugzeugemissionen mit der Höhe erlaubt und zum Anderen diese lokal sehr eng be-

grenzten Emissionen in der hier verwendeten Skala auch horizontal zu sehr verteilt werden. Dies erklärt insbesondere den hohen Anteil der nicht-technischen Maßnahmen in Ballungsräumen.

In ländlichen Regionen hat das Klimaschutzszenario MMS eine um knapp 4% höhere Minderungskapazität, das Klimaschutzszenario MWMS eine um mehr als 13% höhere Minderungskapazität zur Senkung der NO₂-Belastung als die Referenz 2020. Die entsprechenden zusätzlichen Minderungskapazitäten für die Ballungsräume betragen 3.3% und 20.6%. In den ländlichen Regionen und in den Ballungsgebieten werden also für die Klimaschutzszenarien niedrigere NO₂-Konzentrationen berechnet als für die PAREST-Referenz 2020. Die Ausgangssituation für weiterführende Maßnahmen zur Senkung der NO₂-Belastung wäre also auf Basis der Klimaszenarien, insbesondere auf Basis des Szenarios MWMS deutlich günstiger als auf Basis der Referenz 2020. Mit dem MFR-Szenario kann auf Basis des Klimaschutzszenarios MWMS die durch die CLE-Emissionsreferenz 2020 erreichbare NO₂-Minderung in ländlichen Gebieten noch um 20%, in Ballungsräumen noch um knapp 30% erhöht werden. Im Vergleich dazu werden mit dem MFR-Szenario basierend auf der Referenz 2020 in ländlichen Gebieten nur eine weitere Minderung von circa 10%, in Ballungsräumen von 17% erreicht.

Bei den Ozon-Jahresmittelwerten führen die meisten MFR-Szenarien zu Zunahmen der Konzentrationen in den emissionsbelasteten Gebieten und zu sehr geringen Abnahmen in den mehr ländlichen Regionen Deutschlands. Die Zunahmen reichen für das umfassende MFR-Szenario M20 bis zu 5 µg/m³. Dies entspricht relativen Zunahmen bezüglich der Referenz 2020 bis zu maximal 19%. Die nicht-technischen Maßnahmen bewirken Zunahmen der Ozon-Jahresmittelwerte, die nur geringfügig unter denen für das MFR-Szenario M20 liegen. Aufgrund der technischen MFR-Maßnahmen ergeben sich maximale Ozonzunahmen von circa 2.3 µg/m³ oder circa 7%. Diese Zunahmen treten am stärksten im Ruhrgebiet auf.

Auch bei den AOT40-Werten und der Anzahl der Tage mit einem maximalen O₃-8-h-Mittelwert > 120 µg/m³ kommt es bezogen auf die Referenz 2020 durch die MFR-Maßnahmen zu Zu- und Abnahmen. Die Zunahmen treten wie bei den Jahresmittelwerten im Umfeld von Orten auf, an denen stärkere NO_x-Emissionsminderungen stattfinden, die Abnahmen werden in den eher ländlichen, emissionsarmen Gebieten berechnet. Die Abnahmen der AOT40-Werte in ländlichen Regionen erreichen für das MFR-Szenario M20 maximal circa 15%. Im direkten NO_x-Emissionsminderungsbereich kann es dagegen zu einer Verdoppelung der AOT-40-Werte kommen. Die Auswirkungen aller anderen Einzelmaßnahmen auf die Ozonkonzentrationen liegen innerhalb der durch die MFR-Szenarien aufgespannten Bandbreite.

Zusammenfassend ergeben die Berechnungen:

- Das Klimaschutzszenario MWMS hat in ländlichen Regionen eine circa 13% höhere NO₂-Minderungskapazität, in Ballungsräumen eine circa 21% höhere Minderungskapazität als die Referenz 2020, die auf den bereits heute eingeleiteten Maßnahmen beruht.
- Bei den MFR-Szenarien ist das MFR-Szenario „Sonstiger Verkehr“ in den Ballungsräumen, das MFR-Szenario „Straßenverkehr“ in den ländlichen Regionen die wirksamste Maßnahme zur weiteren Senkung der NO₂-Immissionen. Allerdings ist zu beachten, dass die im PAREST-Projekt zur Berechnung der Verkehrsemissionen benutzte Methodik (TREMOT 4.17 mit Modifikationen) eine deutlich niedrigere Abschätzung der Verkehrsemissionen für die Referenz 2020 liefert als z.B. das europäische Verkehrsmodell TREMOVE 2.7 oder die neue Modellversion TREMOD 5.04.

Damit wird die Rolle des Straßenverkehrs im PAREST-Projekt unterschätzt. Auf der anderen Seite wird das Minderungspotenzial der Sonstigen Quellen insbesondere bei den nicht-technischen Maßnahmen im Flugverkehr wegen der Emissionshöhenproblematik überschätzt. Bei Berücksichtigung dieser beiden Punkte kann man davon ausgehen, dass die weitere Minderung der NO_x-Emissionen des Straßenverkehrs auch in Ballungsräumen zu den wirksamsten Maßnahmen zur weiteren Senkung der NO₂-Belastung zählt.

- Bei den hier betrachteten Einzelmaßnahmen stellt die Maßnahme M44 „Ökodesign“ (Kleinf Feuerungsanlagen) das höchste Potenzial zur weiteren Senkung der NO₂-Immissionen sowohl in ländlichen Regionen als auch in den Ballungsräumen. An zweiter Stelle folgt die Maßnahme M47, Novellierung der IED-Richtlinie für Großfeuerungsanlagen, UBA-Entwurf.

Tabelle 8-2: NO₂-Minderungspotenziale für das MFR-Szenario gesamt (MFR), das MFR-Szenario „technische Maßnahmen“ (MFR-T) und das MFR-Szenario „nicht-technische Maßnahmen“ (MFR-NT). Die Potenziale sind für die Bevölkerungsklassen BVK1 und BVK4 als prozentuale Anteile der durch die Referenz 2020 von 2005 bis 2020 erreichbaren Minderungen ausgedrückt.

NO ₂ -Potenzial	BVK1 Ländlicher Hintergrund	BVK4 Städtischer Hintergrund
Minderung bis 2020	100%	100%
MFR-NT	3.7%	8.6%
MFR-T	6.6%	8.3%
MFR	10.3%	17%

9 Bewertung der Minderungspotenziale unter Einbeziehung der Kosteneffektivität

In einem letzten Schritt wurde eine Rangfolge ermittelt, die nicht wie in Kapitel 8 auf der immissionsseitigen Minderung der einzelnen untersuchten Maßnahmenbündel beruht, sondern auch auf den Kosten, die bei der Umsetzung der betrachteten Maßnahmenbündel in Deutschland entstehen würden. Zunächst wurde eine Reihenfolge ermittelt, die lediglich die Kosten der Maßnahmenbündel berücksichtigt (vgl. auch Tabelle 7-18), ohne Berücksichtigung von Nutzenverlusten. Diese Reihenfolge ist in Tabelle 9-1 dargestellt. Diese Kosteneffektivitäten unterscheiden sich etwas, je nachdem welche Bevölkerungsklasse betrachtet wird. In Tabelle 9-1 ist die Reihenfolge aufgrund der spezifischen Kosteneffektivitäten für die mittlere PM10-Minderung der Konzentrationen über ganz Deutschland dargestellt (Theloke et al., 2010c). Darüber hinaus wird in Tabelle 9-1 für jedes Maßnahmenbündel auch die in Stern (2010b) berechnete Minderung der Konzentrationen von PM2.5 und PM10 [in ng/m³] gezeigt.

Tabelle 9-1: Rangfolge der Maßnahmenbündel aufgrund der spezifischen Kosteneffektivitäten ohne Berücksichtigung von Nutzenverlusten (Theloke et al., 2010c; Stern, 2010b).

Rangfolge	Nr.	Beschreibung des Maßnahmenbündels	Kosteneffektivität 10 ⁶ €/(ng/m ³) für PM10	Minderungseffekt (Deutschland) [ng/m ³]	
				PM10	PM2.5
1	M50	Szenario Tempolimit	-43.9	20	10
2	M33	MFR Szenario_V_NT	-15.0	80	40
3	M28	MFR Szenario_V	-11.2	90	50
4	M21	MFR Szenario_NT	-5.6	180	140
5	M15	Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß	0	340	220
6	M35	MFR Szenario_MM_NT	0	30	30
7	M54	Szenario_MM009	0	20	20
8	M74	Szenario_A009	0	20	20
9	M51	Szenario_A012	0.1	60	60
10	M52	Szenario_G010	0.2	40	40
11	M31	MFR Szenario_A_T	0.5	90	60
12	M73	Szenario_A007	0.5	60	30
13	M46	Szenario_GFA_IED	0.8	150	150
14	M23	MFR Szenario_A	1.3	180	130
15	M47	Szenario_GFA_UBA_IED	1.5	160	160
16	M26	MFR Szenario_G	1.6	210	200
17	M20	MFR Szenario	2.1	880	760
18	M43	MFR Szenario_Tierhaltung	2.2	110	70
19	M59	Szenario Ölfeuerung	2.4	720	670
20	M30	MFR Szenario_A_NT	2.4	80	70
21	M29	MFR Szenario_MM	2.5	50	50
22	M49	MFR Szenario_IND_Staub	3.1	40	20
23	M45	Szenario_KFA_1_BImSchV	3.2	260	250
24	M27	MFR Szenario_P	4.0	100	80
25	M22	MFR Szenario_T	4.1	690	620
26	M25	MFR Szenario_K	5.0	270	250
27	M34	MFR Szenario_MM_T	6.4	20	20
28	M48	MFR Szenario_IND_NOx	10.2	20	20
29	M53	Szenario_V012	18.5	5	10
30	M32	MFR Szenario_V_T	19.5	10	10
31	M24	MFR Szenario_L	62	6	6
32	M44	Szenario_KFA_Ökodesign	76.6	10	1

Aus Tabelle 9-1 ergibt sich für die ersten 4 Maßnahmenbündel zur weiteren Senkung der PM10-Immissionen eine Kostenersparnis. Diese Maßnahmenbündel sind Kombinationen hauptsächlich nichttechnischer Maßnahmen in den Sektoren

- Landwirtschaft,
- Straßenverkehr und
- Sonstige Mobile Quellen

Zur Kostenersparnis tragen dabei ausschließlich Maßnahmen aus dem Sektor Straßenverkehr bei. Die Kostenersparnis basiert hier auf Kraftstoffeinsparungen aufgrund von:

- Festlegung eines Tempolimits auf Autobahnen und Außerortsstraßen (V003 und V004)
- Angleichung der Mineralölsteuer für Dieselmotoren (V005)⁴⁴
- Verlagerung von Innerortsfahrten auf das Fahrrad (V008) und
- Förderprogrammen zum kraftstoffsparenden Fahren (V009)

Darüber hinaus sind in Tabelle 9-1 vier Maßnahmenbündel zu identifizieren, die hinsichtlich ihrer Kosteneffektivität kostenneutral sind. Dabei handelt es sich um folgende Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel, die im Folgenden in Einzelmaßnahmen aufgelöst werden:

- die hypothetische Maßnahme M15 „Angepasster Konsum von tierischen Eiweiß“.
- Nutzungsbeschränkungen für hochemittierende Baumaschinen in innerstädtischen Gebieten (MM005)
- Differenzierung der Trassenpreise im Schienenverkehr (MM007)
- Kosteninternalisierung im Flugverkehr (Kerosinsteuer und Einbeziehung in den Emissionshandel) (MM009)
- Emissionsabhängige Landeentgelte im Flugverkehr (MM010)
- Veränderung der Ausbringtechnik und Verringerung der Zeit bis zur Einarbeitung von Düngern (A009)

Insgesamt können mit diesen Maßnahmen (ohne die hypothetische Maßnahme M15) mindestens 9% der PM10-Emissionsminderung bzw. 4% der PM2.5-Emissionsminderung des MFR-Szenarios (M20) erreicht werden.

Die hypothetische Maßnahme „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“ führt in der Verursachergruppe Landwirtschaft zu einer starken Minderung der Ammoniak- und PM10-Emissionen. Das NH₃-Emissionsminderungspotenzial dieses Szenarios ist mit 25% sogar höher als das gesamte NH₃-Emissionsminderungspotenzial des MFR-Maßnahmenbündels M20, das zu einer NH₃-Minderung von 17% gegenüber dem PAREST-Referenzszenario im Jahr 2020 führt.

⁴⁴ Der Anstieg der Preise für Dieselmotoren würde zusätzlich zu einer Abnahme der Fahrleistungen von Dieselmotoren im Privatverkehr führen. Es wurde angenommen, dass die stufenweise Erhöhung der Dieselpreise um insgesamt ca. 20% zu einer Reduktion der Fahrleistungen mit Dieselmotoren im Privatverkehr um 6% führt. (Das entspricht einer Preiselastizität in privaten Haushalten von -0.3% (Hautzinger et al., 2004)). Für den Pkw-Wirtschaftsverkehr werden dagegen keine Fahrleistungsreduktionen aufgrund der Angleichung der Mineralölsteuer angenommen.

Die ersten 8 Maßnahmenbündel, ohne Berücksichtigung der hypothetischen Maßnahme „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“, würden insgesamt, auf Grundlage der in PAREST durchgeführten Kostenabschätzungen zu Kosteneinsparungen von ungefähr 1 Mrd. € pro Jahr führen. Dies ist insbesondere auf Kraftstoffeinsparungen zurückzuführen. Weitere in diesen Maßnahmenbündeln enthaltene Maßnahmen, die „positive“ oder keine Maßnahmenkosten aufweisen sind:

- Verringerter Aufenthalt im Stall-Verlängerung des Weidegangs bei Milchkühen (A005)
- Umstellung auf Festmistverfahren (A006)
- Kombination von Anpassung der Düngermengen an den Düngerbedarf und verringertem Einsatz von Harnstoffdüngern (A012)
- Förderung der Nachrüstung von Pkw mit Dieselpartikelfiltern (V002)
- Tempolimit innerorts (V007)
- Förderung der Nutzung von Leichtlaufreifen (V011)
- Förderung der Nutzung von Leichtlaufölen (V010)

Allerdings sind die Kostenbewertungen mit großen Unsicherheiten behaftet. Die Größenordnung der spezifischen Maßnahmenkosten wird jedoch als plausibel betrachtet.

Wenn auf Grundlage von Kuhn et al. (2010) zusätzlich die durch Nutzenverluste (hauptsächlich Zeit- und Komfortverluste) entstehenden Kosten für einzelne Maßnahmen berücksichtigt werden (vgl. auch Tabelle 7-18), ergibt sich die in Tabelle 9-2 dargestellte Reihenfolge der betrachteten Maßnahmenbündel.

Tabelle 9-2: Rangfolge der Maßnahmenbündel aufgrund der spezifischen Kosteneffektivitäten unter Berücksichtigung der Nutzenverluste für einzelne Maßnahmen (Theloke et al., 2010c; Stern, 2010b).

Rangfolge	Nr.	Beschreibung des Maßnahmenbündels	Kosteneffektivität $10^6 \text{ € / (ng/m}^3\text{)}$ für PM10 (inkl. Nutzenverluste)	Minderungseffekt (Deutschland) [ng/m ³]	
				PM10	PM2.5
1	M74	Szenario A009	0	20	20
2	M51	Szenario A012	0.1	60	60
3	M52	Szenario G009	0.2	40	40
4	M31	MFR Szenario A T	0.5	90	60
5	M73	Szenario A007	0.5	60	30
6	M46	Szenario GFA IED	0.8	150	150
7	M35	MFR Szenario MM NT	0.9	30	30
8	M23	MFR Szenario A	1.3	180	130
9	M54	Szenario MM009	1.4	20	20
10	M47	Szenario GFA UBA IED	1.5	160	160
11	M26	MFR Szenario G	1.6	210	200
12	M43	MFR Szenario Tierhaltung	2.2	110	70
13	M59	Szenario Ölfeuerung	2.4	720	670
14	M30	MFR Szenario A NT	2.4	80	70
15	M49	MFR Szenario IND Staub	3.1	40	20
16	M29	MFR Szenario MM	3.1	50	50
17	M45	Szenario KFA 1 BImSchV	3.2	260	250
18	M27	MFR Szenario P	4.0	100	80
19	M22	MFR Szenario T	4.1	690	620
20	M25	MFR Szenario K	5.0	270	250
21	M34	MFR Szenario MM T	6.4	20	20
22	M15	Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß	7.9	340	220
23	M48	MFR Szenario IND NOx	10.2	20	20
24	M53	Szenario V012	18.5	5	10
25	M32	MFR Szenario V T	19.5	10	10
26	M20	MFR Szenario	42.6	880	760
27	M24	MFR Szenario L	62.0	6	6
28	M44	Szenario KFA Ökodesign	76.6	10	1
29	M21	MFR Szenario NT	192.5	180	140
30	M28	MFR Szenario V	384.7	90	50
31	M33	MFR Szenario V NT	430.4	80	40
32	M50	Szenario Tempolimit	1735.1	20	10

Aus Tabelle 9-2 folgt, dass die fünf kosteneffektivsten Maßnahmenbündel bzw. Einzelmaßnahmen unter Einbeziehung der Nutzenverluste

- Die Veränderung der Ausbringtechnik und Verringerung der Zeit zur Einarbeitung (A009; M74),
- die Kombination von Anpassung der Düngermengen an den Düngerbedarf und verringertem Einsatz von Harnstoffdüngern (A012; M51)
- die Festlegung eines Staubgrenzwertes von 10 mg/Nm^3 im Tagesmittel sowohl für bestehende als auch für neue kohlegefeuerte Großfeuerungsanlagen $> 50 \text{ MW}$ (G009; M52)
- die Abdeckung der Wirtschaftsdüngerlager (A008)
- die Implementierung von Abluftreinigungsanlagen in der Schweinehaltung (A007; M73)

sind. Insgesamt erreichen diese 5 Maßnahmenbündel etwa 27% der PM10-Emissionsminderung bzw. 22% der PM2.5-Emissionsminderung des MFR-Szenarios (M20).

Diese Maßnahmen würden insgesamt, auf Grundlage der in PAREST durchgeführten Kostenabschätzungen, etwa 56 Mio. € kosten.

Nicht berücksichtigt wurden bei den Kostenabschätzungen externe Effekte, z. B. die Auswirkung verkehrlicher Maßnahmen auf die Lärmbelastung der Bevölkerung oder auf das Unfallrisiko. Aus Sensitivitätsrechnungen kann aber abgeleitet werden, dass die durch die untersuchten Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel verursachten Zeitverluste alle anderen Effekte um Größenordnungen übersteigen. Insgesamt ist die Bewertung von Nutzenverlusten mit sehr großen Unsicherheiten behaftet und stark abhängig von der Definition der Systemgrenzen.

Der Vergleich der in Tabelle 9-1 und Tabelle 9-2 dargestellten Ergebnisse macht deutlich, dass sich die Rangfolge der Maßnahmen in erheblichem Maße ändert, abhängig davon, ob bei der Bewertung von Kosten, insbesondere für nicht-technische verkehrliche Maßnahmen, Nutzenverluste, hier Zeitverluste, mit einbezogen werden oder nicht. Dies zeigt sich sehr deutlich am Maßnahmenbündel M50 (Tempolimit auf Autobahnen, Bundesstraßen und innerorts). Ohne Berücksichtigung von Zeitverlusten ist dieses Szenario das weitaus kosteneffektivste Maßnahmenbündel, um PM10- und PM2.5-Konzentrationen zu mindern. Wenn allerdings Zeitverluste bei der Bewertung der Kosten mitberücksichtigt werden, ist dieses Maßnahmenbündel das am wenigsten effektivste. An diesem Ergebnis ändert sich auch nichts, wenn das abnehmende Unfallrisiko im innerörtlichen Bereich mit berücksichtigt wird.

Ohne Berücksichtigung der Nutzenverluste sind vor allem den Straßenverkehr betreffende Maßnahmen sehr kostengünstig und führen teilweise zu Kosteneinsparungen. Allein die Umsetzung aller nicht-technischen Verkehrsmaßnahmen würde circa 9% des maximalen PM10-Immissionsminderungspotenzials ausschöpfen. Ein Tempolimit auf Außerortsstraßen und Autobahnen kombiniert mit einem innerörtlichen Tempolimit würde dazu etwa 2 bis 3 Prozentpunkte beitragen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein innerörtliches Tempolimit im Unterschied zu einem Tempolimit auf Autobahnen und Außerortsstraßen auch ohne Berücksichtigung von Nutzenverlusten jährliche Kosten in Höhe von etwa 34,3 Mio. Euro verursacht. Bei Nicht-Berücksichtigung von Nutzenverlusten könnten in der Summe betrachtet insgesamt mehr als 15% des gesamten PM10-Immissionsminderungspotenzials (d.h. des Potenzials der MFR-Maßnahme M20) ohne zusätzliche Kosten umgesetzt werden.

Im Vergleich dazu kann, wenn zusätzlich Nutzenverluste berücksichtigt werden, das maximal mögliche Immissionsminderungspotenzial mit den fünf kostengünstigsten Maßnahmen (56 Millionen € unter Einbeziehung der Nutzenverluste) zu circa 19% ausgeschöpft werden.

Die kostengünstigsten Maßnahmen sind aber nicht notwendigerweise die Maßnahmen, die die größten Effekte im Sinne einer weiteren Minderung der PM10-Immissionen aufweisen (siehe Tabelle 9-1 und Tabelle 9-2). Aus den Ergebnissen der Ausbreitungsrechnung kann zur weiteren Senkung der PM10-Immissionen die in Tabelle 9-3 aufgeführte Rangfolge der 6 wichtigsten Maßnahmen abgeleitet werden (siehe auch Kapitel 8). Dieser auf das berechnete PM10-Immissionsminderungspotenzial bezogenen Rangfolge ist in Tabelle 9-3 auch die jeweils kostenbezogene Rangfolge gegenübergestellt. Außerdem gibt Tabelle 9-3 an, wie viele % des PM10-Immissionsminderungspotenzials des MFR-Szenarios M20 durch das jeweilige Maßnahmenbündel ausgeschöpft werden. Die angegebenen prozentualen Kosten beziehen sich auf die Gesamtkosten des MFR-Szenarios M20. Bei den Kosten mit Nutzenverlusten wurde mit und ohne das Maßnahmenbündel Tempolimit (M50) gerechnet, da dieses Maßnahmenbündel allein knapp 93% der durch Nutzenverluste entstehenden Kosten auf sich zieht.

Von den 6 effektivsten Maßnahmen im Sinne einer Immissionsminderung ist keine auf den 6 vorderen Plätzen einer kostenbezogenen Rangfolge ohne Nutzenverluste zu finden. Bezieht man die Nutzenverluste in die Kosten ein, dann rücken lediglich die Maßnahmenbündel M51 (Kombination von Anpassung der Düngermengen an den Düngerbedarf und verringertem Einsatz von Harnstoffdüngern) und M52 (Festlegung eines Staubgrenzwertes von $10\text{mg}/\text{Nm}^3$ im Tagesmittel sowohl für bestehende als auch für neue kohlegefeuerte Großfeuerungsanlagen $> 50\text{ MW}$) (Platz 5 und 6 der immissionsbezogenen Rangfolge in Ballungsräumen) auf Platz 4 und 5 auf. Diese Maßnahmen repräsentieren aber im Mittel jedoch nur je 6% des PM10-Minderungspotenzials des MFR-Maßnahmenbündels (M20).

Die mit Abstand effektivste Einzelmaßnahme zur weiteren Senkung der PM10-Immissionen aus dem MFR-Paket M20 ist das Maßnahmenbündel M45 (Kleinf Feuerungsanlagen, 1. BImSchV) (30%, 23%, 33% des Minderungspotenzials des MFR-Maßnahmenbündels M20 für Deutschland gesamt, ländliche Räume bzw. Ballungsgebiete). Dieses Maßnahmenbündel liegt bei einer kosteneffektivitätsbezogenen Rangfolge nur auf Platz 22 (ohne Nutzenverluste) bzw. Platz 17 (mit Nutzenverlusten). Dieses Maßnahmenbündel (M45) ist auch bezogen auf die Gesamtkosten des MFR-Maßnahmenbündels (M20) das teuerste der 6 hinsichtlich der Immissionsminderung effektivsten Maßnahmenbündel (46% ohne Nutzenverluste, 30% mit Nutzenverlusten ohne Berücksichtigung der Nutzenverluste durch ein Tempolimit).

Die in Tabelle 9-3 angeführten effektivsten Maßnahmen repräsentieren ohne Doppelzählung (M46 und M47 zielen auf dieselbe Emittentengruppe ab) circa 80% des MFR-Minderungspotenzials in ländlichen Regionen und circa 70% des MFR-Minderungspotenzials in Ballungsräumen. Die Kosten für diese Maßnahmen, bei denen keine Nutzenverluste auftreten, liegen bei circa 1.2 Milliarden € oder circa 70% der Gesamtkosten des MFR-Szenarios (circa 1.8 Milliarden €). Rechnet man die Nutzenverluste (ohne Nutzenverluste durch das Maßnahmenbündel Tempolimit (M50)) ein, dann sinken die relativen Kosten auf circa 45% der Gesamtkosten (circa 2.8 Milliarden € ohne Maßnahmenbündel Tempolimit, M50).

Tabelle 9-3: Rangfolge der 6 effektivsten Maßnahmen zur Senkung der PM10-Immissionsbelastung und Rangfolge derselben Szenarien in Abhängigkeit von den Kosten. **% von MFR:** PM10-Immissionsminderungspotenzial der Maßnahme in % vom Minderungspotenzial des MFR-Maßnahmenbündels M20. **Rang Kosten ohne NV:** Rangfolge der Maßnahme bezogen auf die Kosten ohne Nutzenverluste. **Rang Kosten mit NV:** Rangfolge der Maßnahme bezogen auf die Kosten mit Nutzenverlusten. **% der Kosten von MFR:** Kosten der Maßnahme in % der Kosten für das MFR-Maßnahmenbündel M20. **Ohne Tempolimit:** Kosten des MFR-Maßnahmenbündels ohne das Maßnahmenbündel Tempolimit (M50), das circa 93% der Kosten unter Berücksichtigung von Nutzenverlusten stellt.

	Rang	% von MFR	Rang Kosten ohne NV	% der Kosten von MFR	Rang Kosten mit NV	% der Kosten von MFR	% der Kosten von MFR (ohne Tempolimit)
Deutschland (gesamt)							
M45: Kleinf Feuerungsanlagen, Novellierung der 1. BImSchV	1	30	27	46	23	2	30
M47: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, UBA-Entwurf	2	18	22	13	18	<1	9
M46: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie	3	17	14	7	10	<1	5
M43: Landwirtschaft, MFR-Tierhaltung	4	13	20	13	16	<1	9
M73: Landwirtschaft, Maßnahme A007	5	7	10	2	6	<1	1
M51: Landwirtschaft, Maßnahme A012	6	7	8	<1	2	<1	<1

	Rang	% von MFR	Rang Kosten ohne NV	% der Kosten von MFR	Rang Kosten mit NV	% der Kosten von MFR	% der Kosten von MFR (ohne Tempolimit)
Ländliche Regionen							
M45: Kleinf Feuerungsanlagen, Novellierung der 1. BImSchV	1	23	27	46	23	2	30
M47: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, UBA-Entwurf	2	22	22	13	18	<1	9
M46: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie	3	20	14	7	10	<1	5
M43: Landwirtschaft, MFR-Tierhaltung	4	17	20	13	16	<1	9
M73: Landwirtschaft, Maßnahme A007	5	10	10	2	6	<1	1
M51: Landwirtschaft, Maßnahme A012	6	9	8	<1	2	<1	<1

	Rang	% von MFR	Rang Kosten ohne NV	% der Kosten von MFR	Rang Kosten mit NV	% der Kosten von MFR	% der Kosten von MFR (ohne Tempolimit)
Ballungsgebiete							
M45: Kleinf Feuerungsanlagen, Novellierung der 1. BImSchV	1	33	27	46	23	2	30
M47: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie, UBA-Entwurf	2	16	22	13	18	<1	9
M46: Großfeuerungsanlagen, Novellierung der IED-Richtlinie	3	15	14	7	10	<1	5
M43: Landwirtschaft, MFR-Tierhaltung	4	9	20	13	16	<1	9
M52: Großfeuerungsanlagen, Absenkung des Staubemissionsgrenzwertes	5	6	9	<1	3	<1	<1
M51: Landwirtschaft, Maßnahme A012	6	6	8	<1	2	<1	<1

Insgesamt lässt sich festhalten, dass es keine Maßnahme gibt, die auf der einen Seite geringe Kosten verursacht und auf der anderen Seite ein großes PM10-Minderungspotenzial besitzt. Dies gilt unabhängig davon, ob Nutzenverluste berücksichtigt werden oder nicht.

Bei einer kombinierten kosten-immissionsbezogenen Bewertung der Maßnahmen ist es insbesondere für eine Reihe der nicht-technischen Maßnahmen von grundsätzlicher Bedeutung, ob Nutzenverluste, die hier weitgehend Komfort- und Zeitverluste sind, in die Betrachtung mit einbezogen werden oder nicht.

Ein Großteil der hier diskutierten nicht-technischen Maßnahmen ist im Sinne der hier vorgestellten Kostenabschätzung kostenneutral oder führt sogar zu Kosteneinsparungen wenn Komfort- und Zeitverluste nicht berücksichtigt werden. Z.B. ist die Maßnahme „Angepasster Konsum von tierischem Eiweiß“ (Maßnahmenbündel M15) kostenneutral. Durch diese Maßnahme könnte allein ein zusätzliches, im MFR-Szenario nicht enthaltenes PM10-Immissionsminderungspotenzial erschlossen werden, das im Mittel über Deutschland knapp 40% des Minderungspotenzials des MFR-Maßnahmenbündels M20 beträgt. Werden aber Nutzenverluste berücksichtigt, werden dieser Maßnahme Gesamtkosten von insgesamt 2.7 Mrd. Euro zugeordnet (vgl. Kuhn et al., 2010).

Beim Maßnahmenbündel Tempolimit (M50) muss hinsichtlich der immissionsseitigen Wirkungen und der Bewertung der Kosteneffektivität mit und ohne Nutzenverlusten noch weiter differenziert werden in Tempolimit innerorts und Tempolimit auf Außerortsstraßen auf der einen Seite und Tempolimit auf Autobahnen auf der anderen Seite. Ein flächendeckendes Tempolimit auf Autobahnen von 120 km/h würde im Gegensatz zu den beiden anderen Tempolimit-Maßnahmen selbst unter Berücksichtigung von Nutzenverlusten zu einer geringfügigen jährlichen Kostenersparnis von 10 Mio. Euro führen, d.h. in etwa kostenneutral sein. Diese Maßnahme „Tempolimit 120 km/h auf Autobahnen“ würde emissionsseitig etwa 4.3 kt NO_x (20% des MFR Straßenverkehr), 0.3 kt NMVOC (4% des MFR Straßenverkehr), 0.01 kt SO₂ (20% des MFR Straßenverkehr), 0.02 kt PM10 (0.7% des MFR Straßenverkehr) und 0.02 kt PM2.5 (3 % des MFR Straßenverkehr) mindern.

Die Umsetzung von nicht-technischen Maßnahmen wie ein Tempolimit oder die Veränderung der Essgewohnheiten erfordert aber ein gesellschaftliches Umdenken, da damit einer möglichen Verbesserung der Luftqualität ein höheres Gewicht eingeräumt werden muss als eventuellen Komfort- und Zeitverlusten. Allein auf der Basis von technischen Maßnahmen wird es aber kaum möglich sein, die PM10-Immissionen noch so weit abzusenken, dass eine Einhaltung der europäischen Luftqualitätsgrenzwerte gewährleistet werden kann.

10 Referenzen

Adolf, T., Schneider, R., Eberhardt, W., Hartmann, S., Herwig, A., Heseker, H., Hünchen, K., Kübler, W., Matiaske, B., Moch, K.J., Rosenbauer, J., (1995). Ergebnisse der Nationalen Verzehrsstudie (1985-1988) über die Lebensmittel- und Nährstoffaufnahme in der Bundesrepublik Deutschland. In: Kübler, W., Anders, H.J., Heeschen, W. (Hrsg.): Band XI der VERA-Schriftenreihe. Wissenschaftlicher Fachverlag Dr. Fleck, Niederkleen (1995), 241 S.

Amann, M., I. Bertok, J. Cofala, C. Heyes, Z. Klimont, P. Rafaj, W. Schöpp, F. Wagner (2008). NEC Scenario Analysis Report Nr. 6, National Emission Ceilings for 2020 based on the 2008 Climate & Energy Package International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Final version July 2008.

Cofala, J. and Syri, S. (1998). Nitrogen oxides emissions, abatement technologies and related costs for Europe in the RAINS model database. IR-98-88, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria.

CORINAIR (2007). EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2007, EEA Technical report No 16/2007, Copenhagen, 2007; <http://www.eea.europa.eu/publications/EMEP/CORINAIR5>

Dämmgen, U., Haenel, H.-D., Rösemann, C., Eurich-Menden, B., Grimm, E., Döhler, H., Hahne, J. (2008). Landwirtschaftliche Emissionen. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“

De Ceuster, G., van Herbruggen, B., Ivanova, O., Carlier, K., Martino, A. und D. Fiorello (2007). TREMOVE. Service contract for the further development and application of the transport and environmental TREMOVE model. Lot 1 (Improvement of the data set and model structure), Service Contract 070501/2005/420798/MAR/C1. Final Report, European Commission, Directorate General Environment, Brüssel

Denier van der Gon, H., Visschedijk, A., van der Brugh, H. (2009). Gridded European emission data for the projection years 2010, 2015 and 2020 based on the IIASA GAINS NEC scenarios. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. TNO-report TNO-034-UT-2009-02306_RPT-ML. TNO, Niederlande.

Denier van der Gon, H.A.C., A.J.H. Visschedijk, H. van der Brugh, R. Droge (2010). A high resolution European emission data base for the year 2005. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, TNO-Report. TNO, Niederlande.

DGE – Deutsche Gesellschaft für Ernährung (Hrsg.) (2004). Ernährungsbericht 2004. Deutsche Gesellschaft für Ernährung, Bonn, 483 S.

Diekmann, J., R. Hopf, H.-J. Ziesing, M. Kleemann, V. Krey, P. Markewitz, D. Martinsen, S. Vögele, W. Eichhammer, E. Jochem, W. Mannsbart, B. Schlomann, M. Schön, M. Wietschel, A. Brakhage, F. Matthes, M. Cames, R. Harthan (2004). Endbericht zum Forschungsvorhaben „Politik-szenarien für den Klimaschutz – Langfristszenarien und Handlungsempfehlungen ab 2012 (Politik-szenarien III)“, Berlin, Jülich, Karlsruhe, im Juli 2004; Umweltforschungsplan 2001 - Forschungskennzahl 201 41 142

Dünnebeil, F. und Lambrecht, U. (2007). Zukünftige Entwicklung der NO₂-Emissionen des Verkehrs und deren Auswirkung auf die NO₂-Luftbelastung in Städten in Baden-Württemberg. . IFEU – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH. www.ifeu.de

EC (2001). Richtlinie 2001/81/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2001 über nationale Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe (NEC-Richtlinie)

EEA (2008). Aggregated and gap filled air emission data, source: The European Topic Centre on Air and Climate Change (date of delivery: 06 Sep 2007), <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/eea-aggregated-and-gap-filled-air-emission-data-1>

Fath, J., Kerschbaumer, A., Stern, R. (2010). Archivierung der im Rahmen des Parest-Projekts erzeugten Immissionsfelder. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Hautzinger, H., Mayer, K., Helms, M., Kern, C., Wiesenhütter, M., Haag, G., Binder, J. (2004). Analyse von Änderungen des Mobilitätsverhaltens – insbesondere der Pkw-Fahrleistung – als Reaktion auf geänderte Kraftstoffpreise. Institut für angewandte Verkehrs- und Tourismusforschung e.V. (IVT) Heilbronn/Mannheim, Heilbronn 2004.

IVU (2009). Benutzeranleitung FLADIS-view. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, IVU Umwelt GmbH, Freiburg.

IPCC (2006). Eggleston, H. S.; Buendia, L.; Miwa, K., et al. (Hg.). “IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan

IPPC (1996). Council Directive 96/61/EC of 24. September 1996, concerning integrated pollution prevention and control, Office Journal of the European Communities, No. L257/26, 1996

Jörß, W. (2007). Anpassung von Energie- und Emissionsprognosewerten an das Energiemodell BEU. Forschungsbericht an das Umweltbundesamt, FKZ 360 16 007, März 2007, Berlin: IZT

Jörß, W. (2010). Emissionen aus Offener Verbrennung in Deutschland. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT

Jörß, W., Handke, V., Lambrecht, U. und F. Dünnebeil (2007). Emissionen und Maßnahmenanalyse Feinstaub 2000-2020. Forschungsbericht an das Umweltbundesamt, FKZ 204 42 202/2, UBA-TEXTE Nr. 38/2007. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Jörß, W., U. Kugler, J. Theloke (2010). Emissionen im PAREST-Referenzszenario 2005 – 2020. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT

Jörß, W. und M. Degel (2010). Energieszenarien für PAREST. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT

Jörß, W. und V. Handke (2007). Maßnahmen zur Einhaltung der Emissionshöchstmengen der NEC-Richtlinie - Teil 2: Referenzszenario 2000 – 2020 für Emissionen unter der NEC-Richtlinie (SO₂, NO_x, NMVOC und NH₃). Forschungsbericht an das Umweltbundesamt, FKZ 205 42 221, UBA-TEXTE Nr. 36/2007. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Jörß, W. und V. Handke (2010). Unsicherheiten der PAREST-Referenz-Emissionsdatenbasis. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT

Kerschbaumer, A. (2010a). Abhängigkeit der RCG-Simulationen von unterschiedlichen meteorologischen Treibern. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Kerschbaumer, A. (2010b). Ein Meteorologievergleich zum besseren Verständnis der unterschiedlichen Schadstoffkonzentrationssimulationen mit verschiedenen Chemie-Transport-Modellen. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Kerschbaumer, A. (2010c). Einfluss der biogenen und natürlichen Emissionen, abgeleitet aus verschiedenen Datensätzen und Berechnungsmethoden, auf modellierte Schadstoffkonzentrationen. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Kerschbaumer, A., Hannig, K. (2010). Einfluss der Randbedingungen aus dem globalen Chemie-Transport-Modell TM5 auf das regionale Aerosol-Chemie-Transport-Modell REM-CALGRID. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin

Klimont, Z., Amann, M. and Cofala, J. (2000). Estimating Costs for Controlling Emissions of Volatile Organic Compounds from Stationary Sources in Europe. IR-00-51, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.

Knörr, W., Dünnebeil, F., Helms, H., Höpfner, U., Lambrecht, U., Patyk, A. und Reuter, C. (2005). Fortschreibung „Daten- und Rechenmodell“: Energieverbrauch und Schadstoffemissionen des motorisierten Verkehrs in Deutschland 1960-2030. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, UFOPLAN Nr. 204 45 139, Heidelberg

KOM 844 (2009). Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung), Neufassung“, 21.12.2008, Brüssel

Krol, M., Houweling, S., Bregman, B., van den Broek, M., Segers, A., van Velthoven, P., Peters, W., Dentener, F., and Bergamaschi, P. (2005). The two-way nested global chemistry-transport zoom model TM5: algorithm and applications. *Atmos. Chem. Phys.*, 5(2):417-432.

Kugler, U., W. Jörß, J. Theloke (2010). Verkehrsemissionsmodellierung für PAREST – Modellvergleich und Alternative Szenarien. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“

Kuhn, A., Theloke, J., Kugler, U., Friedrich, R (2010). Estimation of costs of (behavioural) emission mitigation measures and instruments including estimation of utility costs. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“

Lambrecht, U., Helms, H., Kullmer, K., Knörr, W.(2004). Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen. Endbericht im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ 299 45 113, Heidelberg, 2004

Matthes, F., Gores, S., Graichen, V., Harthan, R., Markewitz, P., Hansen, P., Kleemann, M., Krey, V., Martinsen, D., Diekmann, J., Horn, M., Ziesing, H.-J., Eichhammer, W., Doll, C., Helfrich, N., Müller, L., Schade, W., Schlomann, B., (2008). Politiksznarien für den Klimaschutz IV – Szenarien bis 2030. Forschungsbericht für das Umweltbundesamt FKZ 205 46 434, UBA Climate Change 1/2008, Umweltbundesamt, Dessau- Roßlau, 2008
<http://opus.kobv.de/zb/volltexte/2008/6164/pdf/cc1.2008.pdf>

Mönch, L (2009). Persönliche Mitteilung, Umweltbundesamt, 2009

Motz, G., Hartmann, A., Plinke, E., Stern, R., Scherer, B., Fath, J., Reimer, E., Memmesheimer, M., Tippke, J., Ebel, A. (1997). Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon: Ermittlung und Bewertung der Effekte von lokalen, regionalen und überregionalen Emissionsminderungs-Strategien auf bodennahe Ozonkonzentrationen in hochsommerlichen Episoden mit Hilfe modellgestützter emissions- und immissionsseitiger Wirkungsanalysen. Kurzfassung. Im Auftrag des Umweltbundesamts. **Gesamtbericht** zur Untersuchung der Prognos AG im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes (Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon (Sommersmog) - UFO-Plan Nr. 104 02 812/1), siehe auch www.umweltbundesamt.de/ozon.

NATAIR (2007). Improving and Applying Methods for the Calculation of Natural and Biogenic Emissions and Assessment of Impacts to the Air Quality. SIXTH FRAMEWORK PROGRAMME FP6-2003-SSP-3 – Policy Oriented Research SPECIFIC TARGETED RESEARCH OR INNOVATION PROJECT. <http://natair.ier.uni-stuttgart.de>.

NEC (2001). Directive 2001/81/EC of the European Parliament and the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants, Office Journal of the European Communities, L309/22, 27.11.2001

Ökodesign (2007). Eco Boiler Projekt. Executive Summary, 30.09.2007”, www.ebpg.bam.de

Ökodesign (2008). Working document on possible Ecodesign Energy labelling and Installation requirements for Dedicated Water Heaters. 8.07.2008, www.ebpg.bam.de

Pregger, T. and R. Friedrich (2009). Effective pollutant emission heights for atmospheric transport modelling based on real-world information. Environmental Pollution 157 (2009) 552–560

Schaap, M., A.M.M. Manders, E.C.J. Hendriks, J.M. Cnossen, A.J.S. Segers, H.A.C. Denier van der Gon, M. Jozwicka, F. Sauter, G. Velders, J. Mathijssen, P.J.H. Bultjes (2009). Regional Modelling of Particulate Matter for the Netherlands. Technical Report BOP, research carried out for Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment (VROM), Bilthoven, Niederlande.

Schade, W. (2008). Kurzübersicht des ASTRA Modells
http://www.kliminvest.de/download/ASTRA_KlimInvest_Deutsch_080606.pdf

Schwarz, U (2002). Methoden und Modelle zur multiskalig hoch aufgelösten Bestimmung von luftverunreinigenden Emissionen in Europa. Dissertation. IER, Universität Stuttgart, Stuttgart.

Stern, R. (1994). Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen photochemischen Ausbreitungsmodells mit verschiedenen chemischen Mechanismen, Meteorologische Abhandlungen Serie A Band 8, Heft 1 (1994). Verlag von Dietrich Reimer, Berlin.

Stern, R. (2003). Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM/CALGRID. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 298 41 252 des Umweltbundesamts „Modellierung und Prüfung von Strategien zur Verminderung der Belastung durch Ozon“.

Stern, R. (2004). Weitere Entwicklung und Anwendung des chemischen Transportmodells REM-CALGRID für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität und ihrer Tochterrichtlinien. Abschlussbericht im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhaben 201 43 250 auf dem Gebiet des Umweltschutzes „Anwendung modellgestützter Beurteilungssysteme für die bundeseinheitliche Umsetzung der EU-Rahmenrichtlinie Luftqualität und ihrer Tochterrichtlinien“

Stern, R., Builtjes, P., Schaap, M., Timmermans, R., Vautard, R., Hodzic, A., Memmesheimer, M., Feldmann, H., Renner, E., Wolke, R., Kerschbaumer, A., (2008). A model inter-comparison study focussing on episodes with elevated PM10 concentrations. Atmospheric Environment 42 4567-4588. 2008.

Stern, R. (2009). Auswirkungen der verschiedenen NEC-Abschätzungen auf die Immissionen in Deutschland Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010a). PM10-Ursachenanalyse auf der Basis hypothetischer Emissionsszenarien Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010b). Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: PM10- und PM2.5-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der Immissionen in Deutschland. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010c). Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: NO2- und O3-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der Immissionen in Deutschland. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010d). Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: Verkehrsmodell TREMOD und Verkehrsmodell TREMOVE. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010e). Anwendung von chemischen Transportmodellen im Rahmen des PAREST-Projekts: Ergebnisvergleich REM-CALGRID, LOTOS-EUROS und MUSCAT-COSMO. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010f). Prognose der Luftqualität und Abschätzung von Grenzwertüberschreitungen in Deutschland für die Referenzjahre 2010, 2015 und 2010. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010g). Analyse der Unsicherheiten/Bandbreiten in der im PAREST-Projekt verwendeten Kausalkette Emission-Transmission-Immission. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010h). Anwendung des RCG-Modells auf die Ballungsräume Berlin, München, Ruhrgebiet. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010i). Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: PM10 und NO2-Immissionsbeiträge in Deutschland; Holzverbrennung in Kleinfeue-rungsanlagen und Anlagen der 13. und 17. BImSchV. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Theloke, J., Calaminus, B., Dünnebeil, F., Friedrich, R., Helms, H., Kuhn, A., Lambrecht, U., Nicklaß, D., Pregger, T., Reis, S., Wenzel, S. (2007). Maßnahmen zur Einhaltung der Emissionshöchstmengen der NEC- Richtlinie – Teil 1: Maßnahmen zur weiteren Verminderung der Emissionen an NOx und SO2 und NMVOC in Deutschland, Forschungsbericht an das Umweltbundesamt, FKZ 205 42 221, UBA-TEXTE Nr. 36/2007. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Theloke, J. U. Kugler, T. Kampffmeyer, M. Uzbasich, U. Dämmgen (2010a). Beschreibung der Minderungsmaßnahmen in PAREST – Maßnahmenblätter. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Theloke, J., U. Kugler, W. Jörß, B. Thiruchittampalam, T. Kampffmeyer, M. Uzbasich, U. Dämmgen, P. Builtjes, R. Stern (2010b). Beschreibung der maßnahmenbasierten und hypothetischen Maßnahmenbündel in PAREST. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Theloke, J., R. Stern, W. Jörß, P. Builtjes, A. Kuhn, U. Kugler, R. Friedrich (2010c). Berechnung von Kosteneffektivitäten in PAREST. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Thiruchittampalam, B., Köble, R., Theloke, J., Kugler, U., Uzbasich, M., Kampffmeyer, T. (2010a). Berechnung von räumlich hochaufgelösten Emissionen für Deutschland. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Thiruchittampalam, B., W. Jörß, J. Theloke (2010b). Dokumentation der Emissionsmodellierung für LTO-Emissionen und internationale Binnenschifffahrt. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Umweltbundesamt (2002). Luftreinhaltung 2010 - Nationales Programm zur Einhaltung von Emissionshöchstmengen für bestimmte Luftschadstoffe nach der Richtlinie 2001/81/EG (NEC-RL), UBA-Texte 37/02, Berlin, 2002.

Umweltbundesamt (2005). Energiereferenzszenario 2000-2020 für Emissionsberechnungen des Umweltbundesamtes, UBA-TEXTE Nr. 30/2005, Dessau: Umweltbundesamt.

Umweltbundesamt (2007). Luftreinhaltung 2010 – Nationales Programm zur Verminderung der Ozonkonzentration und zur Einhaltung der Emissionshöchstmengen – Programm gemäß § 8 der 33. BImSchV und der Richtlinie 2001/81/EG (NEC RL). UBA-TEXTE Nr. 37/2007. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Umweltbundesamt (2009). Entwicklung der Luftqualität in Deutschland. www.umweltbundesamt.de

Umweltbundesamt (2010). Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen 2010 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2008 - EU-Submission; Umweltbundesamt, Dessau 15.01.2010;
http://cdr.eionet.europa.eu/de/eu/ghgmm/envs0819q/DE_NIR_2010_EU_Submission_de.pdf

Uzbasich, M., R. Köble, U. Kugler, B. Thiruchittampalam (2010). Vergleich der Emissionsdatenbasis für die Ballungsräume Ruhrgebiet, Großraum München und Großraum Berlin mit der PAREST-Emissionsdatenbasis. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Wickert, B. (2001). Berechnung anthropogener Emissionen in Deutschland für Ozonsimulationen: Modellentwicklung und Sensitivitätsstudien. Dissertation. IER, Universität Stuttgart, Stuttgart.

Wiegand, G., Diegmann, V. (2009). PM10 – Anzahl Überschreitungen Tagesmittelwert-Grenzwert versus Jahresmittelwert. Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, IVU Umwelt GmbH, Freiburg.

Wolke, R. und E. Renner (2010). Anwendung des Modellsystems COSMO-MUSCAT zur Absicherung der RCG-Ergebnisse für zwei ausgewählte Minderungsszenarien und für Ballungsraum-Simulationen mit unterschiedlichen Gitterauflösungen. Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V., Leipzig.

Yamartino, R.J., J. Scire, G.R. Carmichael, and Y.S. Chang (1992). The CALGRID mesoscale photo-chemical grid model-I. Model formulation, Atmos. Environ., 26A (1992), 1493-1512.

ZSE (2007). Zentrales System Emissionen (ZSE), Emissionsdatenbank des Umweltbundesamtes mit dem Stand vom 08.06.2007

11 Zusammenstellung der PAREST-Berichte

AP I: Emissionen

Dämmgen, U., Haenel, H.-D., Rösemann, C., Eurich-Menden, B., Grimm, E., Döhler, H., Hahne, J. (2008)

Landwirtschaftliche Emissionen

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig.

Denier van der Gon, H., Visschedijk, A., van der Brugh, H. (2009)

Gridded European emission data for the projection years 2010, 2015 and 2020 based on the IIASA GAINS NEC scenarios

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. TNO-report TNO-034-UT-2009-02306_RPT-ML. TNO, Niederlande.

Denier van der Gon, H.A.C., A.J.H. Visschedijk, H. van der Brugh, R. Droge (2010)

A high resolution European emission data base for the year 2005

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, TNO-Report. TNO, Niederlande.

Jörß, W. (2010)

Emissionen aus offener Verbrennung

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT

Jörß, W., Kugler, U., Theloke, J. (2010)

Emissionen im PAREST-Referenzszenario 2005 – 2020

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT und IER.

Jörß, W. und M. Degel (2010)

Energieszenarien für PAREST

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT

Jörß, W. und V. Handke (2010)

Unsicherheiten der PAREST-Referenz-Emissionsdatenbasis

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: IZT.

Kugler, U., Jörß, W., Theloke, J. (2010)

Verkehrsemissionsmodellierung für PAREST – Modellvergleich und alternative Szenarien

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, IER-Universität Stuttgart.

Kuhn, A, Theloke, J, Kugler, U, Friedrich, R. (2010)

Estimation of costs of (behavioural) emission mitigation measures and instruments including estimation of utility loss

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, IER-Universität Stuttgart.

Theloke, J., U. Kugler, T. Kampffmeyer, M. Uzbasich, U. Dämmgen (2010a)

Beschreibung der Minderungsmaßnahmen in PAREST – Maßnahmenblätter

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Theloke, J., U. Kugler, W. Jörß, B. Thiruchittampalam, T. Kampffmeyer, M. Uzbasich, U. Dämmgen, P. Bultjes, R. Stern (2010b)

Beschreibung der maßnahmenbasierten und hypothetischen Maßnahmenbündel in PAREST

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Theloke, J., R. Stern, W. Jörß, P. Bultjes, A. Kuhn, U. Kugler, R. Friedrich (2010c)

Berechnung von Kosteneffektivitäten in PAREST

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Thiruchittampalam, B., Köble, R., Theloke, J., Kugler, U., Uzbasich, M., Kampffmeyer, T. (2010)

Berechnung von räumlich hochaufgelösten Emissionen für Deutschland

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Thiruchittampalam, B., W. Jörß, J. Theloke (2010)

Dokumentation der Emissionsmodellierung für LTO-Emissionen und internationale Binnenschifffahrt

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

Uzbasich, M., R. Köble, U. Kugler, B. Thiruchittampalam (2010)

Vergleich der Emissionsdatenbasis für die Ballungsräume Ruhrgebiet, Großraum München und Großraum Berlin mit der PAREST-Emissionsdatenbasis

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. IER-Universität Stuttgart.

AP II: Modellierung

Fath, J., Kerschbaumer, A., Stern, R. (2010)

Archivierung der im Rahmen des Parest-Projekts erzeugten Immissionsfelder

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

IVU (2009)

Benutzeranleitung FLADIS-view

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, IVU Umwelt GmbH, Freiburg.

Kerschbaumer, A. (2010a)

Abhängigkeit der RCG-Simulationen von unterschiedlichen meteorologischen Treibern

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Kerschbaumer, A. (2010b)

Ein Meteorologievergleich zum besseren Verständnis der unterschiedlichen Schadstoffkonzentrationsimulationen mit verschiedenen Chemie-Transport-Modellen Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Kerschbaumer, A. (2010c)

Einfluss der biogenen und natürlichen Emissionen, abgeleitet aus verschiedenen Datensätzen und Berechnungsmethoden, auf modellierte Schadstoffkonzentrationen

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Kerschbaumer, A., Hannig, K. (2010)

Einfluss der Randbedingungen aus dem globalen Chemie-Transport-Modell TM5 auf das regionale Aerosol-Chemie-Transport-Modell REM-CALGRID

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2009)

Auswirkungen der verschiedenen NEC-Abschätzungen auf die Immissionen in Deutschland Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010a)

PM10-Ursachenanalyse auf der Basis hypothetischer Emissionsszenarien

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010b)

Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: PM10- und PM2.5-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der Immissionen in Deutschland

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010c)

Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: NO₂- und O₃-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der Immissionen in Deutschland

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010d)

Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: Verkehrsmodell TREMOD und Verkehrsmodell TREMOVE

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010e)

Anwendung von chemischen Transportmodellen im Rahmen des PAREST-Projekts: Ergebnisvergleich REM-CALGRID, LOTOS-EUROS und MUSCAT-COSMO

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010f)

Prognose der Luftqualität und Abschätzung von Grenzwertüberschreitungen in Deutschland für die Referenzjahre 2010, 2015 und 2010

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010g)

Analyse der Unsicherheiten/Bandbreiten in der im PAREST-Projekt verwendeten Kausalkette Emission-Transmission-Immission

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010h)

Anwendung des RCG-Modells auf die Ballungsräume Berlin, München, Ruhrgebiet

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Stern, R. (2010i)

Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: PM10 und NO₂-Immissionsbeiträge in Deutschland; Holzverbrennung in Kleinfeuerungsanlagen und Anlagen der 13. und 17. BImSchV

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Berlin, Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin.

Wiegand, G., Diegmann, V. (2009)

PM10 – Anzahl Überschreitungen Tagesmittelwert-Grenzwert versus Jahresmittelwert

Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, IVU Umwelt GmbH, Freiburg.

Wolke, R. und E. Renner (2010).

Anwendung des Modellsystems COSMO-MUSCAT zur Absicherung der RCG-Ergebnisse für zwei ausgewählte Minderungsszenarien und für Ballungsraum-Simulationen mit unterschiedlichen Gitterauflösungen.

Forschungs-Teilbericht im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“. Leibniz-Institut für Troposphärenforschung e.V., Leipzig.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Emissionsrelevante Energieverbräuche in PAREST-REF und PSz IV-MMS nach Energieträgern	25
Abbildung 3-2: Emissionsrelevante Energieverbräuche in PAREST-REF und PSz IV-MMS nach Sektoren	25
Abbildung 3-3: PM10-Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)	29
Abbildung 3-4: PM2.5-Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)	29
Abbildung 3-5: SO ₂ -Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)	30
Abbildung 3-6: NO _x -Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)	31
Abbildung 3-7: NH ₃ -Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)	31
Abbildung 3-8: NMVOC-Emissionen 2005 in Deutschland mit Fehlerbalken (siehe Text)	32
Abbildung 3-9 Unsicherheiten im deutschen Emissionsinventar 2005; PAREST-Referenzszenario, Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; angegeben sind die Grenzen des 95%- Konfidenzintervalls (2,5%-Quantil und 97,5%-Quantil)	33
Abbildung 3-10: Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 im PAREST-Referenzszenario	35
Abbildung 4-1: Methode zur räumlichen Auflösung der Emissionen	48
Abbildung 4-2: Beispiele zur geografischen Referenzierung von Emissionsquellen	49
Abbildung 4-3: Größe der Rasterzellen bezogen auf Berlin	50
Abbildung 4-4: In PAREST-Projekt verwendete Punktquellen	51
Abbildung 4-5: Räumliche Verteilung des Wald-Scheitholzverbrauchs in Deutschland (links) und daraus resultierende Verteilung der PM10 Emissionen aus Kleinfeuerungen in Privathaushalten - Brennstoff Holz - (rechts)	53
Abbildung 4-6: Gegenüberstellung der PM10-Emissionen in Deutschland für das Basisjahr 2005 und für das Referenzjahr 2020 (CLE) in 1min x 1min Auflösung	54
Abbildung 4-7: Gegenüberstellung der NO _x -Emissionen in Deutschland für das Basisjahr 2005 und für das Referenzjahr 2020 (CLE) in 1min x 1min Auflösung	54
Abbildung 5-1: PAREST NO _x -Emissionen für Europa in der Auflösung von 0.125° Länge und 0.0625° Breite	58
Abbildung 6-1: Bevölkerungsdichte in Einwohner/km ² in 4 Klassen. Zur Klassendefinition siehe Text. Die Auflösung entspricht der Auflösung des Nestes 2, Deutschland fein: 0.0625° Breite, 0.125° Länge, circa 8 km x 7 km.	63
Abbildung 6-2: Mittlere bevölkerungsgewichtete PM10-Konzentrationen der Referenz 2005 und maximal mögliches PM10-Minderungspotenzial (-100% der anthropogenen Emissionen in Deutschland.	66
Abbildung 6-3: PM10-Minderungspotenzial der NH ₃ -Emissionen normiert auf das Potenzial einer Emissionsminderung um 5%	67
Abbildung 6-4: Absolute PM10-, PM2.5- und NO ₂ -Immissionsminderungen in µg/m ³ , die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015 und 2015 bis 2020 (Referenzszenarien) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die 6 Bewertungsklassen. Zur Definition der Klassen siehe Kapitel 6.1	69
Abbildung 6-5: Berechnete PM10-Jahresmittelwerte für den Ballungsraum Berlin. PAREST-Emissionsreferenz 2005. Meteorologische Referenz 2005. Oben: Gitterauflösung 0.5° Länge x 0.25° Breite (Europagitter). Unten: Gitterauflösung 0.25° Länge x 0.125° Breite (Deutschland grob, Nest1)	79
Abbildung 6-6: Berechnete PM10-Jahresmittelwerte für den Ballungsraum Berlin. PAREST-Emissionsreferenz 2005. Meteorologische Referenz 2005. Oben: Gitterauflösung 0.125° Länge x 0.0625° Breite (Deutschland fein). Unten: Ballungsraumberechnung mit Gitterauflösung 0,015625° Länge x 0.0078125° Breite, Emissionsgitter 0.015625° x 0.015625°	80
Abbildung 8-1: Absolute PM10- und PM2.5-Immissionsminderungen in µg/m ³ , die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015, 2015 bis 2020 (Referenzszenarien) und durch die zusätzlichen Maßnahmen des MFR-Szenarios M20 erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die 6 Bewertungsklassen. Weitere Erläuterungen im Text.	109
Abbildung 8-2: Absolute Minderungen der PM10-Jahresmittelwerte in µg/m ³ , die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 (Referenz 2020 und Klimaschutzszenario MWMS) und durch die Kombination des MWMS- Szenarios mit dem MFR-Maßnahmenbündel (M20) (M83), mit dem MFR-	

Maßnahmenbündel Landwirtschaft (M23) (M84) und dem MFR-Maßnahmenbündel Kleinf Feuerungsanlagen (M25) (M94) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die Bewertungsklassen BVK1 (Ländliche Regionen) und BVK4 (Ballungsräume).....	115
Abbildung 8-3: Absolute Minderungen der PM10-Jahresmittelwerte in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, die ausgehend von den Konzentrationen der Referenz 2020 durch die zusätzlichen Maßnahmen des MFR-Szenarios (M20 in Kombination mit dem MWMS (M83)), des MFR-Szenarios Landwirtschaft (M23 in Kombination mit dem MWMS (M84)) und des MFR-Szenarios Kleinf Feuerungsanlagen (M25 in Kombination mit dem MWMS (M94)) erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die Bewertungsklassen BVK1 (Ländliche Regionen) und BVK4 (Ballungsräume).....	116
Abbildung 8-4: Absolute NO ₂ -Immissionsminderungen in $\mu\text{g}/\text{m}^3$, die aufgrund der Emissionsentwicklung 2005 bis 2010, 2010 bis 2015, 2015 bis 2020 (Referenzszenarien) und durch die zusätzlichen Maßnahmen des MFR-Szenarios M20 erreicht werden können. Mittlere bevölkerungsgewichtete Abnahmen der Jahresmittelwerte für die 6 Bewertungsklassen (siehe Kapitel 6.1).....	121

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Maximal durch die untersuchten Maßnahmen erreichbaren Minderungen gegenüber der Referenz für 2020 in kt/a.....	8
Tabelle 3-1: Vergleich der landwirtschaftlichen Ammoniak-Emissionen PAREST-REF mit ZSE (2007).....	20
Tabelle 3-2: Minderungseffekte zur Erweiterung des Referenzszenarios um Euro 5/6 für Pkw und LNF, Euro VI für SNF und LKW-Maut.....	21
Tabelle 3-3: Emissionsfaktoren für die Wiederaufwirbelung von Straßenstaub.....	22
Tabelle 3-4: Annahmen zum Schwefelgehalt von Schiffsdiesel.....	22
Tabelle 3-5: Emissionen und Treibstoffverbrauch des zivilen Flugverkehrs 2005.....	23
Tabelle 3-6: Differenzen in der Emissionsberechnung des Straßenverkehrs in Deutschland zwischen TREMOD 4.17 / PAREST-REF und TREMOVE 2.7.....	26
Tabelle 3-7: Differenzen in der Emissionsberechnung des Straßenverkehrs in Deutschland zwischen TREMOD 4.17 / PAREST-REF und TREMOD 5.04.....	27
Tabelle 3-8: Fahrleistungen im Straßenverkehr in Deutschland nach TREMOD 4.17 / PAREST-REF und TREMOVE 5.04.....	27
Tabelle 3-9: PAREST-Referenzemissionen 2005.....	33
Tabelle 3-10: Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 im PAREST-Referenzszenario.....	34
Tabelle 3-11: Emissionsentwicklung 2005 bis 2020 in verschiedenen CLE-Szenarien.....	36
Tabelle 3-12: PM10-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip ..	37
Tabelle 3-13: PM2.5-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip ..	38
Tabelle 3-14: SO ₂ -Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip.....	39
Tabelle 3-15: NO _x -Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip.....	40
Tabelle 3-16: NMVOC-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip	41
Tabelle 3-17: NH ₃ -Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Inlandsprinzip	42
Tabelle 3-18: SO ₂ -Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip..	43
Tabelle 3-19: NO _x -Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip ..	44
Tabelle 3-20: NMVOC-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip	44
Tabelle 3-21: NH ₃ -Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip ..	44
Tabelle 3-22: PM2.5-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip	45
Tabelle 3-23: PM10-Emissionen des PAREST-Referenzszenarios, Berechnung nach dem Energiebilanzprinzip.....	45
Tabelle 3-24: Emissionen 2010 (Energiebilanzprinzip / NEC) in verschiedenen CLE-Szenarien.....	46
Tabelle 3-25: Emissionen 2020 (Energiebilanzprinzip / NEC) in verschiedenen CLE-Szenarien.....	46
Tabelle 3-26: Emissionsentwicklung 2000 bis 2020 für PM (Energiebilanzprinzip / NEC) in verschiedenen CLE-Szenarien.....	47
Tabelle 4-1: Auf Grundlage von Pregger und Friedrich (2009) angenommene effektive Emissionshöhen für ausgewählte Punktquellentypen (Neutrale Schichtung, mittlere Windgeschwindigkeit von 4 m/s).....	52
Tabelle 5-1: Europäische Emissionen für das Basisjahr 2005	56
Tabelle 5-2: Europäische Emissionen für das Referenzjahr 2020 (Amann et al., 2008)(NEC6_CP)	59
Tabelle 6-1: Stoffbezogene Beiträge zum maximal möglichen Minderungspotenzial für den hypothetischen Fall einer 100%-igen Reduzierung der deutschen anthropogenen Emissionen. Emissionsreferenz 2005.....	64
Tabelle 6-2: Verursachergruppenbezogene Beiträge zum maximal möglichen Minderungspotenzial für den hypothetischen Fall einer 100%-igen Reduzierung der deutschen anthropogenen Emissionen. Emissionsreferenz 2005.	65
Tabelle 6-3: Stoffbezogene Beiträge zum maximal möglichen Minderungspotenzial für den hypothetischen Fall einer 25%-igen Reduzierung der deutschen anthropogenen Emissionen. Emissionsreferenz 2005.....	65
Tabelle 6-4: Verursachergruppenbezogene Beiträge zum maximal möglichen Minderungspotenzial für den hypothetischen Fall einer 25%-igen Reduzierung der deutschen anthropogenen Emissionen. Emissionsreferenz 2005.	66

Tabelle 6-5: Anzahl der Stationen mit Verletzungen des NO ₂ -Grenzwerts von 40 µg/m ³ in Abhängigkeit verschiedener Emissionsentwicklungen. IFEU-TREMOD beschreibt die Verkehrsentwicklung gemäß der TREMOD-Anwendung von Dünnebeil und Lambrecht (2007).....	73
Tabelle 6-6: Die auf Basis der Modellergebnisse RCG-TRAMPER, RCG-COSMO-EU, LOTOS-EUROS und COSMO-MUSCAT ermittelte Bandbreite der relativen PM10- und NO ₂ -Minderungspotenziale für die Emissionsänderungen 2005 bis 2020.	77
Tabelle 7-1: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Landwirtschaft	83
Tabelle 7-2: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Lösemittelanwendung.....	84
Tabelle 7-3: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Kleinf Feuerungsanlagen.....	84
Tabelle 7-4: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Produktionsprozesse	84
Tabelle 7-5: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Großfeuerungsanlagen	85
Tabelle 7-6: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Straßenverkehr	86
Tabelle 7-7: Identifizierte und bewertete Einzelmaßnahmen für den Sektor Andere mobile Quellen	86
Tabelle 7-8: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Landwirtschaft (Die Potenziale sind zum Teil nicht addierbar).....	88
Tabelle 7-9: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Lösemittelanwendung...	89
Tabelle 7-10: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Kleinf Feuerungsanlagen (Die Potenziale sind zum Teil nicht addierbar).....	89
Tabelle 7-11: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Produktionsprozesse ...	90
Tabelle 7-12: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Großfeuerungsanlagen (Die Potenziale sind zum Teil nicht addierbar).....	91
Tabelle 7-13: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor Straßenverkehr	92
Tabelle 7-14: Minderungspotenziale und Kosten der Einzelmaßnahmen für den Sektor „Andere mobile Quellen“. n.q.= nicht quantifizierbar	93
Tabelle 7-15: Maßnahmenbündelbasierte Minderungsszenarien	95
Tabelle 7-16: Maßnahmenbündelbasierte Minderungsszenarien-Berücksichtigte Einzelmaßnahmen	96
Tabelle 7-17: Minderungspotenziale der auf Maßnahmenbündel basierenden Minderungsszenarien für das Bezugsjahr 2020.....	97
Tabelle 7-18: Kosten der Maßnahmenbündel	98
Tabelle 7-19 Emissionen im PAREST-Referenzszenario für das Jahr 2020 und im Vergleich dazu die sektorweise aufgelösten Emissionen im MWMS-Klimaschutzszenario für 2020.....	101
Tabelle 7-20 Minderungspotenziale des MWMS-Klimaschutzszenarios und dessen Kombination mit den PAREST-Maßnahmenbündeln M20, M23 und M25 gegenüber dem PAREST-Referenzszenario für das Bezugsjahr 2020.....	102
Tabelle 7-21: Herleitung der Differenz der Emissionsfrachten für das hypothetische Szenario, das im Referenzjahr 2020 alle „Kleinf Feuerungsanlagen in Privathaushalten mit einer Feuerungswärmeleistung < 50 MW“ mit dem Energieträger „naturbelassenes Brennholz“ durch Ölfeuerungen ersetzt.....	104
Tabelle 8-1: PM10- und PM2.5-Immissionsminderungspotenziale für das MFR-Maßnahmenbündel gesamt (MFR), das MFR-Maßnahmenbündel „technische Maßnahmen“ (MFR-T) und das MFR-Maßnahmenbündel „nicht-technische Maßnahmen“ (MFR-NT). Die Potenziale sind für die Bevölkerungsklassen BVK1, BVK4 und Deutschland (gesamt) als prozentuale Anteile der durch die Referenz 2020 von 2005 bis 2020 mit den bereits eingeleiteten Maßnahmen erreichbaren Minderungen ausgedrückt.	117
Tabelle 8-2: NO ₂ -Minderungspotenziale für das MFR-Szenario gesamt (MFR), das MFR-Szenario „technische Maßnahmen“ (MFR-T) und das MFR-Szenario „nicht-technische Maßnahmen“ (MFR-NT). Die Potenziale sind für die Bevölkerungsklassen BVK1 und BVK4 als prozentuale Anteile der durch die Referenz 2020 von 2005 bis 2020 erreichbaren Minderungen ausgedrückt.	124
Tabelle 9-1: Rangfolge der Maßnahmenbündel aufgrund der spezifischen Kosteneffektivitäten ohne Berücksichtigung von Nutzenverlusten (Theloke et al., 2010c; Stern, 2010b).	125
Tabelle 9-2: Rangfolge der Maßnahmenbündel aufgrund der spezifischen Kosteneffektivitäten unter Berücksichtigung der Nutzenverluste für einzelne Maßnahmen (Theloke et al., 2010c; Stern, 2010b).	128
Tabelle 9-3: Rangfolge der 6 effektivsten Maßnahmen zur Senkung der PM10-Immissionsbelastung und Rangfolge derselben Szenarien in Abhängigkeit von den Kosten. % von MFR: PM10-Immissionsminderungspotenzial der Maßnahme in % vom Minderungspotenzial des MFR-Maßnahmenbündels	

M20. Rang Kosten ohne NV: Rangfolge der Maßnahme bezogen auf die Kosten ohne Nutzenverluste. Rang Kosten mit NV: Rangfolge der Maßnahme bezogen auf die Kosten mit Nutzenverlusten. % der Kosten von MFR: Kosten der Maßnahme in % der Kosten für das MFR-Maßnahmenbündel M20. Ohne Tempolimit: Kosten des MFR-Maßnahmenbündels ohne das Maßnahmenbündel Tempolimit (M50), das circa 93% der Kosten unter Berücksichtigung von Nutzenverlusten stellt..... 131