

TEXTE

45/2013

Unsicherheiten der PAREST-Referenz- Emissionsdatenbasis

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 206 43 200/01
UBA-FB 001524/ANH,14

Unsicherheiten der PAREST-Referenz- Emissionsdatenbasis

**Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur
Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“**

von

**Wolfram Jörß
Volker Handke**

Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4520.html> verfügbar.

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

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) Schopenhauerstr. 26 14129 Berlin
Abschlussdatum:	Mai 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, Juni 2013

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis	7
Tabellenverzeichnis	9
Abbildungsverzeichnis.....	11
Gleichungsverzeichnis	11
1 Einleitung.....	13
2 Methodik der Unsicherheitenanalyse in PAREST.....	15
2.1 Grundlagen: Emissionsinventare und Unsicherheiten	15
2.2 Das Emissionsinventar als Modell.....	16
2.3 Unsicherheiten als Konfidenzintervall der Wahrscheinlichkeitsdichte	17
2.4 Methoden der Aggregation von Unsicherheiten	19
2.5 Verteilungstypen der Wahrscheinlichkeitsdichte	21
2.6 Umgang mit Korrelationen	25
3 Unsicherheitschätzung der Inputdaten 2005	27
3.1 Aktivitätsraten stationäre Feuerung / Energiebilanz.....	28
3.2 Emissionsfaktoren stationäre Feuerung	32
3.3 Oberflächengebundener Verkehr	35
3.3.1 Aktivitätsraten.....	35
3.3.2 Emissionsfaktoren - Auspuff	38
3.3.3 Abrieb und Wiederaufwirbelung	39
3.4 Lösemittel	39
3.5 Landwirtschaft	39
3.5.1 Aktivitätsraten der Landwirtschaft.....	39
3.5.2 Emissionsfaktoren der Landwirtschaft.....	40
3.6 Schüttgutumschlag.....	43
3.7 Sonstige Quellgruppen.....	44
3.7.1 Übernahme von Unsicherheitsdaten aus dem ZSE	44
3.7.2 Aktivitätsraten sonstiger Quellgruppen	44
3.7.3 Emissionsfaktoren für sonstige Quellgruppen	46
3.8 Splitfaktoren zur Berechnung von PM _{2,5} aus PM ₁₀	48
4 Ergebnisse der Unsicherheitsrechnungen	49
4.1 Unsicherheit der PM ₁₀ -Emissionen 2005.....	50
4.2 Unsicherheit der PM _{2,5} -Emissionen 2005	51
4.3 Unsicherheit der SO ₂ -Emissionen 2005.....	52
4.4 Unsicherheit der NO _x -Emissionen 2005	53
4.5 Unsicherheit der NH ₃ -Emissionen 2005	54

4.6	Unsicherheit der NMVOC-Emissionen 2005	55
5	Generierung von Sensitivitätsszenarien für die Immissionsmodellierung in PAREST	56
5.1	Datensätze für die Immissionsmodellierung.....	56
5.2	Unsicherheiten der Prognosejahre 2010 - 2020	57
5.3	Emissionsszenarien „obere Schranke“ und „untere Schranke“	57
6	Fazit	68
7	Literatur	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionsrelevante Zeilen für stationäre Feuerung der deutschen Energiebilanzen seit 1995	28
Tabelle 2: Unsicherheiten der Energiebilanz 2004	30
Tabelle 3: Unsicherheitsparameter für Splitfaktoren in BEU	31
Tabelle 4: Sonstige Unsicherheitsparameter für BEU	31
Tabelle 5: Differenzierungen von Aktivitätsraten im Straßenverkehr	35
Tabelle 6: Unsicherheiten von Aktivitätsraten (Antrieb) im Straßenverkehr	37
Tabelle 7: Erweiterte Nutzung von Unsicherheiten für Aktivitätsraten anderer Tierarten	40
Tabelle 8: Erweiterte Nutzung von Unsicherheiten für NH ₃ -EF anderer Tierarten	41
Tabelle 9: Erweiterte Nutzung von Unsicherheiten für NO _x -EF anderer Tierarten	42
Tabelle 10: Unsicherheiten der NMVOC EF für ausgewählte Tierarten	42
Tabelle 11: Erweiterte Nutzung von Unsicherheiten für PM-EF anderer Tierarten	43
Tabelle 12: Default-Unsicherheiten für Aktivitätsraten nach Datenherkunft, Brennstoff und Aktivität	45
Tabelle 13: Default Unsicherheiten für SO ₂ Emissionsfaktoren	46
Tabelle 14: Default Unsicherheiten für NO _x -Emissionsfaktoren	46
Tabelle 15: Default Unsicherheiten für NMVOC-Emissionsfaktoren	47
Tabelle 16: Default Unsicherheiten für NH ₃ -Emissionsfaktoren	47
Tabelle 17: Default Unsicherheiten für PM ₁₀ -Emissionsfaktoren	47
Tabelle 18: Unsicherheiten der PM ₁₀ -Emissionen 2005	50
Tabelle 19: Unsicherheiten der PM _{2,5} -Emissionen 2005	51
Tabelle 20: Unsicherheiten der SO ₂ -Emissionen 2005	52
Tabelle 21: Unsicherheiten der NO _x -Emissionen 2005	53
Tabelle 22: Unsicherheiten der NH ₃ -Emissionen 2005	54
Tabelle 23: Unsicherheiten der NMVOC-Emissionen 2005	55
Tabelle 24: Abweichung der PM ₁₀ -Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz	58
Tabelle 25: PM ₁₀ -Emissionen im Szenario „obere Schranke“	59
Tabelle 26: PM ₁₀ -Emissionen im Szenario „untere Schranke“	59

Tabelle 27: Abweichung der PM _{2,5} -Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz.....	60
Tabelle 28: PM _{2,5} -Emissionen im Szenario „obere Schranke“	60
Tabelle 29: PM _{2,5} -Emissionen im Szenario „untere Schranke“	61
Tabelle 30: Abweichung der SO ₂ -Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz.....	61
Tabelle 31: SO ₂ -Emissionen im Szenario „obere Schranke“	62
Tabelle 32: SO ₂ -Emissionen im Szenario „untere Schranke“	62
Tabelle 33: Abweichung der NO _x -Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz.....	63
Tabelle 34: NO _x -Emissionen im Szenario „obere Schranke“	63
Tabelle 35: NO _x Emissionen im Szenario „untere Schranke“	64
Tabelle 36: Abweichung der NH ₃ -Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz.....	64
Tabelle 37: NH ₃ -Emissionen im Szenario „obere Schranke“	65
Tabelle 38: NH ₃ -Emissionen im Szenario „untere Schranke“	65
Tabelle 39: Abweichung der NMVOC-Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz.....	66
Tabelle 40: NMVOC-Emissionen im Szenario „obere Schranke“	66
Tabelle 41: NMVOC-Emissionen im Szenario „untere Schranke“	67
Tabelle 42: Übersicht Unsicherheiten im PAREST Referenzszenario.....	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Normalverteilung mit Konfidenzintervall.....	17
Abbildung 2:	Beispiel Normalverteilung	21
Abbildung 3:	Beispiel Dreiecksverteilung	22
Abbildung 4:	Beispiel Gleichverteilung.....	22
Abbildung 5:	Beispiel Lognormalverteilung	23
Abbildung 6:	Beispiel inverse Lognormalverteilung	25

Gleichungsverzeichnis

Gleichung 1:	Berechnung einer Emission aus Aktivitätsrate und Emissionsfaktor	16
Gleichung 2:	Addition von Emissionen verschiedener Quellgruppen	16
Gleichung 3:	Anwendung eines Splitfaktors	16
Gleichung 4:	Fehlerfortpflanzung bei Addition	19
Gleichung 5:	Fehlerfortpflanzung bei Multiplikation.....	19
Gleichung 6:	Erwartungswert einer logarithmischen Normalverteilung.....	23
Gleichung 7:	p-Quantil einer logarithmischen Normalverteilung.....	23

1 Einleitung

Im Forschungsvorhaben PAREST¹ wurden Emissionsszenarien bis 2020 für Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2,5}) und die Aerosol-Vorläufersubstanzen SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC für Deutschland und Europa erstellt, Minderungsmaßnahmen evaluiert und daraus die PM-Immissionsbelastung für Deutschland modelliert.

In diesem Teilbericht zu PAREST wird die Analyse der Unsicherheiten der Referenz-Emissionsdatenbasis für Deutschland vorgestellt. Das PAREST -Referenz-Emissionsszenario selbst wird in einem getrennten Teilbericht ausführlich vorgestellt [Jörß et al. 2010]. Weitere emissionsseitige Teilberichte im Rahmen von PAREST behandeln z.B.

- Maßnahmen- und Sensitivitätsszenarien für Deutschland [Theloke et al. 2010], [Kugler et al. 2010], [Jörß und Degel 2010], [Jörß 2010] sowie
- die räumliche Verteilung der Emissionen über Deutschland [Thiruchittampalam et al. 2010]
- die europäischen Hintergrundemissionen [Denier van der Gon et al. 2009] und [Denier van der Gon et al. 2010].

Zusätzlich wurden diverse PAREST-Berichte zur Immissionsmodellierung (z.B. [Stern 2010 a], [Stern 2010 b], [Stern 2010 c], [Kerschbaumer 2010 a], [Kerschbaumer 2010 b]) sowie ein zentraler Schlussbericht [Bultjes et al. 2010] erstellt.

Generell kann die Analyse von Unsicherheiten von Schadstoffinventaren mehrere Ziele verfolgen (vgl. [Olivier 2002]): Zum einen ermöglicht sie eine Einschätzung der Verlässlichkeit der Inventare in Hinblick auf deren Nutzung für die Entwicklung und Kontrolle nationaler oder internationaler Politik, sofern diese auf Emissionsinventaren basieren (z.B. internationale Klimaschutzvereinbarungen oder grenzüberschreitende Luftreinhaltepolitiken im Rahmen der EU oder der UN/ECE). Zum zweiten kann bei einer Kopplung von Emissionsinventaren mit Immissionsmodellen wie in PAREST eine Quantifizierung von Unsicherheiten für Sensitivitätsrechnungen der Immissionsrechnungen benutzt werden. Und schließlich ist eine Unsicherheitenanalyse von Emissionsinventaren ein probates Mittel zur Identifizierung von Prioritäten für die Verbesserung der Emissionsinventare selbst.

Dieser Bericht beschränkt sich neben der Dokumentation von methodischem Rahmen (Kapitel 2) und Annahmen und Datenquellen (Kapitel 3) im Wesentlichen auf Ergebnisse, die für die erste und dritte Zielkategorie nutzbar sind, d.h. eine Quantifizierung von Gesamtunsicherheiten der

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) und
- Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI)

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

einzelnen, national aggregierten² Schadstoffinventare für 2005 und eine Identifizierung von Quellgruppen und Inputfaktoren, die in besonders hohem Maße zu den Gesamtunsicherheiten beitragen (Kapitel 4 bis 0).

Innerhalb des Projektes PAREST wurde aber die Unsicherheitsanalyse gemäß der zweiten Zielkategorie über diese emissionsseitigen Fragen hinaus weiter zu Generierung von Sensitivitätsszenarien der Immissionsmodellierung benutzt. Die Ergebnisse zum Einfluss der hier beschriebenen Unsicherheiten auf die Immissionsmodellierung werden in einem getrennten Teilbericht zu PAREST präsentiert [Stern 2010 c].

² Es werden also keine Aussagen über die Unsicherheiten der räumlichen Verteilung der Emissionen gemacht, vgl. dazu [Thiruchittampalam et al. 2010 a].

2 Methodik der Unsicherheitenanalyse in PAREST

2.1 Grundlagen: Emissionsinventare und Unsicherheiten

Für den Aufbau von Emissionsinventaren wird die Gesamtheit der Emissionsursachen in Quellgruppen unterteilt, für die jeweils angepasste Ansätze einer Emissionsmodellierung gefunden werden müssen. Üblicherweise sind Emissionsinventare so strukturiert, dass die Emissionen (EM) durch Verknüpfung von Aktivitätsraten (AR) mit Emissionsfaktoren (EF) berechnet werden. Als Aktivitätsrate 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 Produktionsmenge 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.

Bei der Analyse der Unsicherheiten in PAREST geht es im Wesentlichen um die Schätzung der Unsicherheiten der deutschen Emissionsinventare der Schadstoffe Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2,5}) und SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC (Aerosol-Vorläufersubstanzen) für das Berichtsjahr 2005, wie es den Immissionsmodellierungen in PAREST zu Grunde liegt. D.h. es geht zunächst um die Unsicherheiten der retrospektiven Schätzung und Berichterstattung von Emissionen, aber nicht um die Unsicherheit der Prognosen von Emissionen. Extrapolationen der Unsicherheiten auf die Jahre 2010 – 2020 haben nur untergeordneten Charakter (vgl. Kapitel 5.2). Die Analyse der Unsicherheiten bezieht sich also auf die für PAREST entwickelte Referenzdatenbasis, die sehr stark auf dem Emissionsinventar ZSE (Zentrales System Emissionen) des Umweltbundesamtes [ZSE 2007] beruht und in [Jörß et al. 2010] ausführlich beschrieben ist.

In der Operationalisierung von Unsicherheiten beschränken wir uns in erster Linie auf den Aspekt der Genauigkeit der Inventare im Gegensatz zur Verlässlichkeit (zur tieferen Diskussion dieser Aspekte vgl. [Aardenne 2002]). Bei der Beschreibung der Unsicherheit als Ungenauigkeit unterscheiden wir weiter zwischen einerseits der Unvollständigkeit des Inventars (nicht betrachtete vernachlässigte oder unbekannte Quellgruppen) und andererseits der Unsicherheit aufgrund des Modellierungsansatzes zur Beschreibung der betrachteten Quellgruppen und der (ggf. damit zusammenhängenden) Ungenauigkeit von Inputdaten in diese Quellgruppenmodellierungen.

Eine Analyse der Vollständigkeit von Emissionsinventaren ist sehr aufwändig und im Wesentlichen nur unter Zuhilfenahme von ausgefeilten Modellen für atmosphärische chemisch-physikalische Quell-Rezeptor-Beziehungen möglich und wurde deshalb für PAREST nicht in Betracht gezogen. Die hier vorgestellte Unsicherheitenanalyse beschränkt sich also auf eine Bewertung der Unsicherheiten der im PAREST-Referenzszenario gemäß Inlandsprinzip³ betrachte-

³ Zur Diskussion des Inlandsprinzips gegenüber dem Energiebilanzprinzip im PAREST-Referenzszenario vgl. ebenfalls [Jörß et al 2010].

ten Quellgruppen. Zusätzlich dazu wurde in PAREST eine Abschätzung der Relevanz einiger nicht im Referenzszenario enthaltener Quellgruppen vorgenommen [Jörß 2010].

2.2 Das Emissionsinventar als Modell

Wir verstehen die Emissionsdatenbasis bzw. das zu Grunde liegende Emissionsinventar als Modell zur Berechnung von Emissionen, das entlang der betrachteten Quellgruppen modular aufgebaut ist. Dieses Modell speist sich aus einer Vielzahl von Inputdaten, die über mathematische Verknüpfungen verbunden sind und im Ergebnis in Emissionsschätzungen münden. Stark vereinfacht kann man die zu Grunde liegenden mathematischen Verknüpfungen auf wenige, einfache Gleichungen reduzieren:

Gleichung 1: Berechnung einer Emission aus Aktivitätsrate und Emissionsfaktor

$$\mathbf{AR}_i * \mathbf{EF}_{i,x} = \mathbf{EM}_{i,x}$$

mit:

$$\begin{aligned} \mathbf{AR}_i &= \text{Aktivitätsrate für Quellgruppe } i \\ \mathbf{EF}_{i,x} &= \text{Emissionsfaktor für Schadstoff } x \text{ in Quellgruppe } i \\ \mathbf{EM}_{i,x} &= \text{Emission von Schadstoff } x \text{ aus Quellgruppe } i \end{aligned}$$

Gleichung 2: Addition von Emissionen verschiedener Quellgruppen

$$\mathbf{EM}_{i,x} + \mathbf{EM}_{j,x} = \mathbf{EM}_x$$

mit:

$$\begin{aligned} \mathbf{EM}_{i,x} &= \text{Emission von Schadstoff } x \text{ aus Quellgruppe } i \\ \mathbf{EM}_{j,x} &= \text{Emission von Schadstoff } x \text{ aus Quellgruppe } j \\ \mathbf{EM}_x &= \text{Gesamtemission von Schadstoff } x \text{ aus Quellgruppen } i \text{ und } j \end{aligned}$$

Gleichung 3: Anwendung eines Splitfaktors

$$\mathbf{AR}_m = \mathbf{AR}_p * \mathbf{f}$$

in Verbindung mit

$$\mathbf{AR}_n = \mathbf{AR}_p * (\mathbf{1-f})$$

mit:

$$\begin{aligned} \mathbf{AR}_p &= \text{Primär-Aktivitätsrate} \\ \mathbf{AR}_m &= \text{Aktivitätsrate für Quellgruppe } m \\ \mathbf{AR}_n &= \text{Aktivitätsrate für Quellgruppe } n \\ \mathbf{f} &= \text{Splitfaktor} \end{aligned}$$

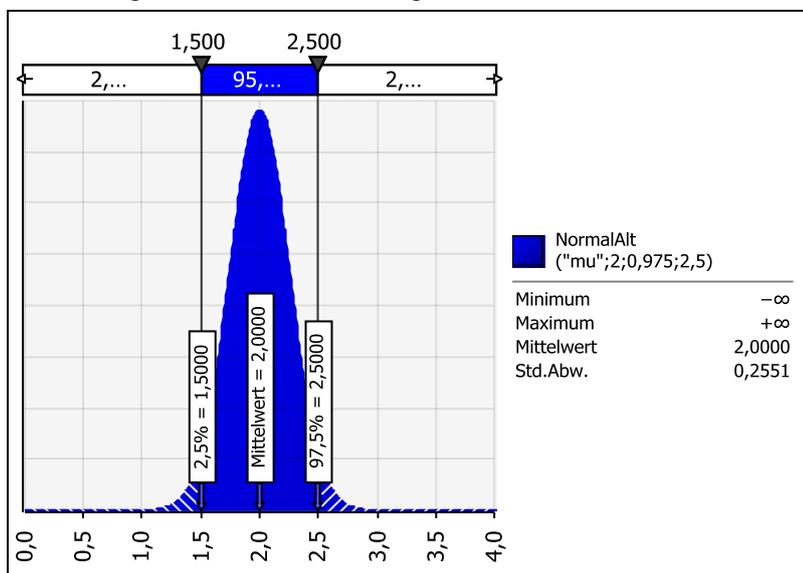
Ein Splitfaktor kann z.B. benutzt werden um Produktionsprozesse nach Technik i und Technik j (mit jeweils verschiedenen Emissionsfaktoren) zu unterteilen oder um den Anteil von PM_{2,5} an den PM₁₀-Emissionen (bzw. Emissionsfaktoren) zu modellieren.

2.3 Unsicherheiten als Konfidenzintervall der Wahrscheinlichkeitsdichte

In der Unsicherheitenanalyse eines solchen in Kapitel 2.2 skizzierten Emissionsmodells geht es nun darum, sämtlichen Inputvariablen eine Unsicherheit zuzuordnen (also im obigen Beispiel aus Gleichung 1 bis Gleichung 3 den Inputvariablen AR_i , AR_j , $EF_{i,x}$, $EF_{j,x}$, AR_P und f (auch der Faktor f sei unsicherheitsbehaftet!)) und daraus Unsicherheiten für die Modellergebnisse zu berechnen (im obigen Beispiel also für EM_x , AR_m und AR_n , aber auch für $EM_{i,x}$ und $EM_{j,x}$).

Unsicherheit bedeutet in diesem Zusammenhang zunächst eine relative Unsicherheit (ausgedrückt in Prozent des „berichteten Werts“ (d.h. des im deterministischen Referenzszenario benutzten Wertes), einerseits der Inputvariablen und andererseits der Modellergebnisse.⁴ Mathematisch / stochastisch interpretieren kann man eine solche relative Unsicherheit über das Konfidenzintervall der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung. Dazu stellt man sich einen im deterministischen Rechenmodell als konstante Größe angenommenen Faktor als Zufallsgröße vor, die einer Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung unterliegt, im bekanntesten Falle z.B. einer Gaußschen Normalverteilung mit der dazugehörigen Glockenkurve (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1: Normalverteilung mit Konfidenzintervall



Für solch eine Verteilung der Wahrscheinlichkeitsdichte wird ein Konfidenzintervall definiert, für PAREST wird hier in Anlehnung an [IPCC 2006] ein 95%-Konfidenzintervall benutzt. Dessen obere und untere Grenzen sind das 2,5 %-Perzentil und das 97,5 %-Perzentil der Verteilung. Der Abstand der Grenzen zum Mittelwert⁵, geteilt durch den Mittelwert ergibt den Wert der relativen Unsicherheit. Im Beispiel von Abbildung 1 haben wir es also mit einem Mittelwert von 2 zu tun, die obere und untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls liegt bei 2,5 bzw. 1,5. Der Ab-

⁴ In der Interpretation der Ergebnisse (vgl. Kapitel 4) werden die relativen Unsicherheiten der Modellergebnisse dann aber durch Multiplikation mit dem berichteten Emissionswert in absolute Unsicherheiten umgerechnet und als „unsichere Emissionen“ interpretiert.

⁵ „Mittelwert“ und „Erwartungswert“ sind zwei gleichbedeutende Begriffe für diesen wichtigsten Lageparameter einer Verteilung [Hartung et al. 1989]. In der Nomenklatur eines Emissionsinventars spricht man von „berichteten Wert“, in der Systematik von Szenarien vom „Referenzwert“ [Handke et al. 2004]. Alle diese Begriffe sind hier inhaltlich gegeneinander austauschbar.

stand der Grenzen zum Mittelwert ist +0,5 bzw. -0,5. Die relative Unsicherheit liegt bei 0,5 geteilt durch 2, also bei +/- 25%. Der Mittelwert ist auch der Erwartungswert der Verteilung.

In der Anwendung auf Emissionsinventare lässt sich dann ein solches Inputdatum mit der Charakterisierung „2 +/-25%“ in etwa wie folgt interpretieren: „Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% liegt der „wahre Wert“ des Inputdatums zwischen 2 minus 25% (also 1,5) und 2 plus 25% (also 2,5). Die beste verfügbare Schätzung ist der Erwartungswert⁶ von 2.“ In dieser Interpretation der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung wechselt man von einem statistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff zu einem subjektiven Wahrscheinlichkeitsbegriff nach Bayes, der Wahrscheinlichkeit als den subjektiven Grad des Vertrauens definiert (vgl. [Morgan und Henrion 1990]).

⁶ In diesem Beispiel einer symmetrischen Verteilung der Wahrscheinlichkeitsdichte fällt der Erwartungswert (gleich Mittelwert, vgl. Fußnote 5) auch mit dem Maximum der Dichteverteilung zusammen, also dem wahrscheinlichsten Wert. Dies ist bei asymmetrischen Verteilungen, z.B. der Lognormalverteilung nicht mehr der Fall.

2.4 Methoden der Aggregation von Unsicherheiten

Wenn man für ein Modell relative Unsicherheiten der Eingangsdaten bestimmt bzw. geschätzt hat, stehen nach [IPCC 2006] zwei grundlegende Methoden der Aggregation von Unsicherheiten, d.h. der Berechnung der Unsicherheit der Emissionen, zur Verfügung:

- Berechnung nach den Gesetzen der Fehlerfortpflanzung und
- Monte-Carlo-Simulation

Die Rechnung gemäß **Fehlerfortpflanzung** ist mathematisch sehr einfach und beruht auf zwei grundlegenden Gleichungen⁷ zur additiven (Gleichung 4) bzw. multiplikativen (Gleichung 5) Verknüpfung unsicherheitsbehafteter Größen und ist somit prinzipiell geeignet für ein Emissionsmodell wie oben in Gleichung 1 und Gleichung 2 (Seite 16) beschrieben:

Gleichung 4: Fehlerfortpflanzung bei Addition

$$U_{gesamt} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (U_i * x_i)^2}}{\sum_{i=1}^n x_i}$$

mit:

U_{gesamt} = kombinierte Unsicherheit (halbes 95%-Konfidenzintervall) in [%]

U_i = Unsicherheit (halbes 95%-Konfidenzintervall): der i-ten zu verknüpfenden Größe in [%]

x_i = Wert der i-ten zu verknüpfenden Größe

n = Anzahl der additiv zu verknüpfenden Größen

Gleichung 5: Fehlerfortpflanzung bei Multiplikation

$$U_{gesamt} = \sqrt{\sum_{i=1}^N U_i^2}$$

mit:

U_{gesamt} = kombinierte Unsicherheit (halbes 95%-Konfidenzintervall) in [%]

U_i = Unsicherheit (halbes 95%-Konfidenzintervall): der i-ten zu verknüpfenden Größe in [%]

N = Anzahl der multiplikativ zu verknüpfenden Größen

Als Rechengrößen werden lediglich der berichtete Wert sowie die dazugehörige relative Unsicherheit (als halbes Konfidenzintervall) benötigt. Nachteil des Ansatzes der Fehlerfortpflanzung ist, dass er nur für symmetrische Unsicherheiten (d.h. symmetrische Verteilungen der Wahrscheinlichkeitsdichte) und für kleine relative Unsicherheiten mit zufriedenstellender Genauigkeit gilt: [IPCC 2006] nennt als Bedingung, dass der Variationskoeffizient⁸ kleiner als 0,3 sein muss, dies entspricht bei einer Normalverteilung einer Unsicherheit von weniger als +/-58%.

⁷ Vgl. [IPCC 2006]: Kapitel 3.2.3.1, Seite 3.28, Gleichungen 3.1 und 3.2

⁸ Der Variationskoeffizient einer Verteilung ist der Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert [Müller 1991]. Die Standardabweichung ist die positive Quadratwurzel der Varianz (einer Verteilung oder Stichprobe) und ein Maß für die Streuung.

Des Weiteren müssen für die Fehlerfortpflanzung die Korrelationen zwischen verschiedenen Inputdaten vernachlässigbar sein. Eine Korrelation ist beispielweise in Gleichung 3 (Seite 16) zwischen AR_m und AR_n gegeben: AR_m plus AR_n ist gleich AR_p . Wendet man in einem ersten Schritt die multiplikative Fehlerfortpflanzung (Gleichung 5) zunächst auf Gleichung 3 an (und benutzt dabei Unsicherheiten von AR_p und f als Inputdaten, so erhält man (korrelierte!) Unsicherheiten für AR_m und AR_n . Addiert man nun AR_m und AR_n zu AR_p im Sinne von Gleichung 2 und wendet unter Vernachlässigung der Korrelation hierauf die additive Fehlerfortpflanzung (Gleichung 4) an, so erhält man eine Unsicherheit für AR_p , die nicht mit dem Eingangswert im ersten Schritt übereinstimmt.

Da diese Gültigkeitsbedingungen im vorliegenden Anwendungsfall der deutschen Schadstoffinventare für Feinstaub und Aerosolvorläufer nicht immer gegeben sind – wir haben es oft mit größeren relativen Unsicherheiten, asymmetrischen Verteilungen und/oder korrelierten Variablen zu tun - wurde in PAREST der zweite, aufwändigere Ansatz nach [IPCC 2006] verfolgt, die Monte-Carlo-Simulation:

Die **Monte-Carlo-Simulation** stellt die Durchführung einer großen Zahl von Zufallsexperimenten dar. Die Inputvariablen der deterministischen Emissionsmodellierung werden zu diesem Zweck nicht nur – wie bei der Fehlerfortpflanzung – durch eine relative Unsicherheit qualifiziert, sondern komplett durch eine Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung ersetzt. D.h. für jede Inputvariable⁹ muss zusätzlich zum 2,5 %-Perzentil und 97,5 %-Perzentil der Verteilung eine Form der Wahrscheinlichkeitsdichte angenommen werden (z.B. normal, lognormal etc., vgl. Kapitel 2.5).

Im Ablauf der Monte-Carlo-Simulation wird für jede Inputvariable des Emissionsmodells ein Zufallswert gezogen und daraus ein Ergebnis für die Emission berechnet. Dies wird sehr oft wiederholt, so dass für die im Modell berechnete Emission schließlich als Ergebnis wiederum eine Verteilung der Wahrscheinlichkeitsdichte entsteht, deren Form und „Unsicherheit“, also die 2,5 %- und 97,5 %-Perzentile, ablesbar sind. Für jede einzelne Inputvariable wird dabei im Verlauf der Simulation sichergestellt, dass mit der Gesamtheit der Iterationen die als Input gesetzte Form der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der betreffenden Inputvariablen reproduziert wird. Die Monte-Carlo-Simulation wird softwaregestützt durchgeführt und kann mit hohen relativen Unsicherheiten, frei wählbaren Typen von Verteilungen, Korrelationen zwischen Inputvariablen und auch komplexeren Modellbeziehungen als Gleichung 1 und Gleichung 2 (Seite 16) umgehen.

In PAREST wurde das Software-Tool @RISK 5.5¹⁰ benutzt, ein Add-In für Microsoft Excel. Für die Simulationen wurde mit 10.000 Iterationen gearbeitet. In Tests hatte sich erwiesen, dass mit dieser Iterationszahl gleichartige Simulationen des Emissionsmodells zu konvergenten Ergebnissen führen und dass eine Steigerung der Iterationsanzahl auf z.B. 100.000 keine nennenswerte Erhöhung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse mit sich brachte.

⁹ Für PAREST wurden tatsächlich so gut wie alle Inputvariablen durch Verteilungen ersetzt. Die einzige Ausnahme bildeten Splitfaktoren, die den deterministischen Wert 0% oder 100% tragen. Diese wurden in der Monte-Carlo-Simulation nicht als wahrscheinlichkeitsbehaftete Variablen behandelt sondern wie Naturkonstanten (z.B. zur Umrechnung von S in SO₂) als konstante Faktoren.

¹⁰ Copyright 2009, Palisade Corporation

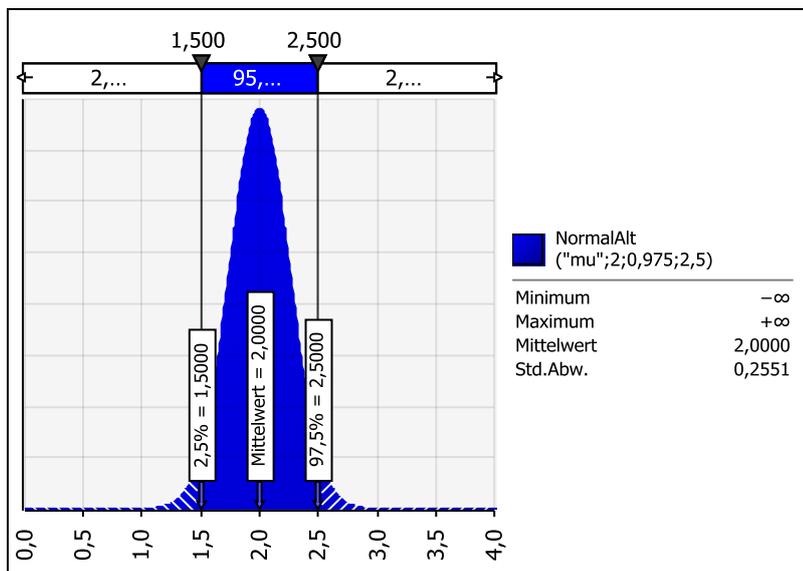
2.5 Verteilungstypen der Wahrscheinlichkeitsdichte

Für die Monte-Carlo-Simulation müssen also alle Inputvariablen des Modells durch Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen ersetzt werden. Theoretisch kann dazu eine beliebige Menge von Verteilungen benutzt werden, sei es im Programmpaket vordefiniert oder selbst entwickelt. Da die Wahl der Verteilung i.d.R. ohnehin nicht durch statistische Analyse eines großen Datenpools zustande kommt, sondern durch Expertenschätzung, ist es praktikabel, die Auswahl einzuschränken. In der Praxis haben wir uns daher auf eine überschaubare Menge von Verteilungen beschränkt, die im Folgenden kurz charakterisiert werden:

- Normalverteilung
- Dreiecksverteilung
- Gleichverteilung
- Lognormalverteilung und
- inverse Lognormalverteilung

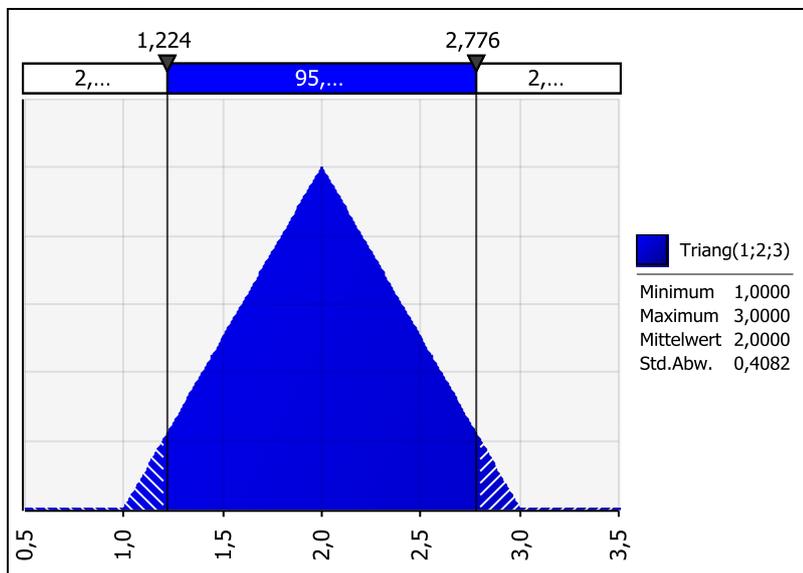
Die **Normalverteilung** (Abbildung 2) ist üblicherweise die Default-Annahme für Verteilungen wenn vergleichsweise viele Einzelinformationen vorliegen und die Streuung nicht zu groß ist. Der wahrscheinlichste Wert wird als Mittelwert angegeben. Der Fehlerbereich kann prozentual ausgedrückt werden (z.B. $\pm 25\%$) und ist symmetrisch.

Abbildung 2: Beispiel Normalverteilung



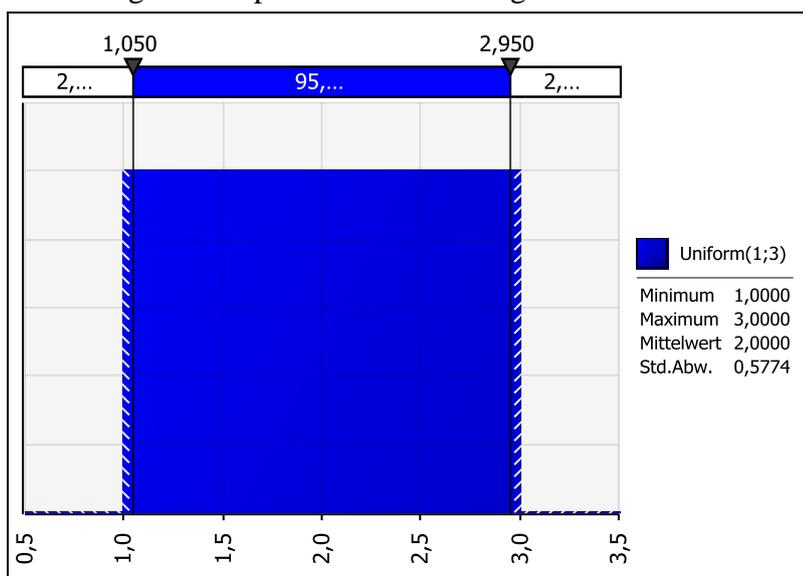
Die **Dreiecksverteilung** (Abbildung 3) bietet sich an, wenn nur sehr wenige, vereinzelte Werte vorliegen, aber ein wahrscheinlichster Wert identifiziert ist. Dieser bildet die Spitze der symmetrischen Dreiecksverteilung. Minimale und maximale Werte bilden die oberen und die unteren Grenzen.

Abbildung 3: Beispiel Dreiecksverteilung



Die **Gleichverteilung** (Abbildung 4) bietet sich an, wenn sich aus den verfügbaren Informationen kein wahrscheinlichster Wert identifizieren lässt. Daher wird allein ein möglicher Bereich geschätzt. Die Grenzen des Bereichs definieren den oberen und unteren Wert einer Gleichverteilung. Der Mittelwert der Gleichverteilung wird zum berichteten Wert im deterministischen Referenzszenario.

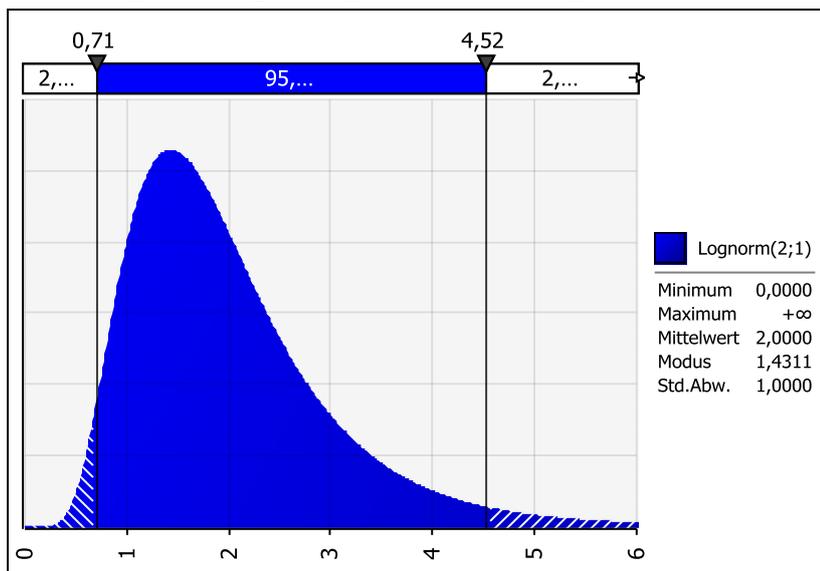
Abbildung 4: Beispiel Gleichverteilung



Die **Lognormalverteilung** (Abbildung 5) wird benutzt, wenn die Werte über einen weiten Bereich streuen. Es treten Extremwerte auf, die aber eher untypisch sind. Die Lognormalverteilung ist asymmetrisch und kann deshalb in der Anwendung auf Emissionsinventare besonders dann

eingesetzt werden, wenn die Schätzung für die obere Grenze des Konfidenzintervalls oberhalb von +100% des Referenzwertes liegt. Symmetrische Verteilungen führen in diesem Fall nicht zu physikalisch sinnvoll interpretierbaren Ergebnissen, weil die betrachteten Größen (Emissionsfaktoren, Aktivitätsraten, Emissionen) naturgemäß nicht negativ sein können. Der wahrscheinlichste Wert der Lognormalverteilung (auch Modus genannt) ist allerdings nicht identisch mit dem Mittelwert (auch Erwartungswert genannt), der als berichteter Wert im deterministischen Referenzszenario auftaucht!

Abbildung 5: Beispiel Lognormalverteilung



Eine logarithmische Normalverteilung wird mathematisch durch die Lageparameter μ („mü“) und σ („sigma“) definiert und ist durch den Erwartungswert (das ist in unserem Falle der Summenemissionsfaktor) und ein Quantil bereits durch Gleichung 6 und Gleichung 7 wohlbestimmt (vgl. z.B. [Müller 1991]):

Gleichung 6: Erwartungswert einer logarithmischen Normalverteilung

$$E(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^{+\infty} x \frac{e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{x} dx = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$$

mit:

$E(X)$ = Erwartungswert der logarithmischen Normalverteilung
 μ, σ = Lageparameter der logarithmischen Normalverteilung

Gleichung 7: p-Quantil einer logarithmischen Normalverteilung

$$x_{(p)} = e^{\mu + u_{(p)} \cdot \sigma}$$

mit:

$x_{(p)}$ = p-Quantil der logarithmischen Normalverteilung
 $u_{(p)}$ = p-Quantil der Standardnormalverteilung
 (für $p = 2,5\%$ ist $u_{(p)} = -1,96$; für $p = 97,5\%$ ist $u_{(p)} = 1,96$)
 μ, σ = Lageparameter der logarithmischen Normalverteilung

Mit bekanntem Erwartungswert (also dem Wert des deterministischen Referenzszenarios) und einer Schätzung für die obere Abweichung, also das 97,5%-Quantil, lassen sich Gleichung 6 und Gleichung 7 nach den Lageparametern μ und σ auflösen. Das 2,5%-Quantil, also die untere Grenze des 95%-Konfidenzintervalls, lässt sich dann nach Gleichung 7 mit $u_{(2,5\%)} = -1,96$ berechnen. Des Weiteren ist aus der mathematischen Definition der Lognormalverteilung ableitbar, dass die relativen Abweichungen der 97,5%- und 2,5%-Quantile vom Erwartungswert nicht beliebig groß werden können: Das 97,5%-Quantil einer Lognormalverteilung kann maximal ca. 582,59% über dem Erwartungswert liegen, das 2,5%-Quantil minimal bei ca. 99,69% unter dem Erwartungswert¹¹.

Für die Praxis bedeutet dies, dass vorliegende Expertenschätzungen und Literaturabgaben zur Unsicherheiten von einzelnen Inputvariablen (z.B. „Wert X, +200 % / -70%, lognormal“) in der Regel streng genommen nicht ohne weiteres für die Monte-Carlo-Simulation benutzt werden können, weil eine Lognormalverteilung mit Angabe von Erwartungswert und zwei Quantilen überbestimmt ist. Außerdem kann eine Schätzung wie „Faktor 10“ (also +900% für die obere Abweichung) nicht direkt als 97,5%-Quantil einer Lognormalverteilung benutzt werden.

Für die pragmatische Nutzung solcher Datenquellen wurde deshalb in PAREST folgender Algorithmus zur Generierung einer mathematisch eindeutig bestimmten Lognormalverteilung benutzt:

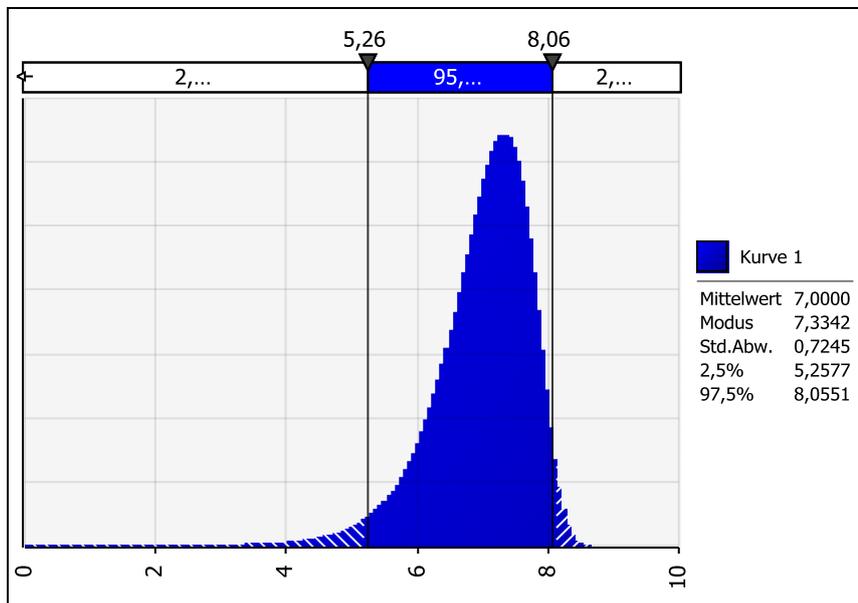
1. Der Verteilungstyp „lognormal“ und der Referenzwert (Erwartungswert, Mittelwert) werden unverändert gelassen.
2. Die Expertenschätzung der unteren Abweichung wird als 2,5%-Quantil interpretiert. Dazu wird über Gleichung 6 und Gleichung 7 eine mathematisch stimmige obere Abweichung (97,5%-Quantil) berechnet.
3. Aus dem so berechneten oberen Wert und der ursprünglichen Expertenschätzung des oberen Wertes wird das arithmetische Mittel gebildet. Dieser Mittelwert, maximal aber die erwähnte mathematische Grenze von knapp +583%, wird für die Definition des 97,5%-Quantils der in der Monte-Carlo-Simulation benutzten Verteilung benutzt.
4. Das 2,5%-Quantil der für die Simulation benutzten Verteilung lässt sich wiederum über Gleichung 6 und Gleichung 7 berechnen.

Hintergrund der Wahl dieses Algorithmus' war die Prämisse, dass im Rahmen der Unsicherheitenanalyse der Referenzwert NICHT verändert (und ggf. verbessert) werden sollte, um die Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse mit dem deterministischen Referenzszenario nicht in Frage zu stellen. Wäre diese Analyse mit dem Zweck der Überprüfung und ggf. Verbesserung der genutzten deterministischen Referenzdaten durchgeführt worden, so wäre wahrscheinlich hier ein anderes Vorgehen gewählt worden.

¹¹ Höhere prozentuale Abweichungen sind z.B. möglich für ein 99%-Quantil anstelle des 97,5%-Quantils.

Die **inverse Lognormalverteilung** (Abbildung 6) ist ein gespiegelter Spezialfall der Lognormalverteilung und kann benutzt werden, wenn die relative Abweichung vom Referenzwert nach unten größer eingeschätzt wird als die nach oben.

Abbildung 6: Beispiel inverse Lognormalverteilung



2.6 Umgang mit Korrelationen

Wie bereits in Kapitel 2.4 Methoden der Aggregation von Unsicherheiten (Seite 19ff) erwähnt, ist es bei der Aggregation von Unsicherheiten wichtig, Korrelationen der Inputvariablen bzw. der diese in der Monte-Carlo-Simulation ersetzenden Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen angemessen zu berücksichtigen. Eine Nicht-Berücksichtigung von Korrelationen führt bei additiver Verknüpfung (vgl. Gleichung 2, Seite 16) auch in der Monte-Carlo-Simulation zu einer Überschätzung der Unsicherheit, bei multiplikativer Verknüpfung (vgl. Gleichung 1, Seite 16) zu einer Unterschätzung der Unsicherheit.

Deshalb wurden bei der Implementierung der Inputdaten zu Unsicherheiten an vielen Stellen Korrelationen sowohl innerhalb der einzelnen Schadstoffinventare als auch über Schadstoffgrenzen hinweg berücksichtigt:

Die Annahmen zu Korrelationen **innerhalb der einzelnen Schadstoffinventare** werden quellgruppenspezifisch in Kapitel 3) vorgestellt. Von Relevanz sind dabei vor allem Korrelationen innerhalb der Datensätze zu den jeweiligen Aktivitätsraten. Grundprinzip der Implementierung der Monte-Carlo-Simulation in die Schadstoffinventare (= in die Schadstoffmodellierung) war es deshalb, dass Inputvariablen, die an mehreren Stellen im Inventar benutzt werden, nur exakt einmal für die Simulation durch eine Verteilungsfunktion ersetzt wird, so dass innerhalb einer Iteration immer derselbe „gezogene“ Wert dieser Verteilung für alle Rechenoperationen benutzt wird, die auf die betreffende Inputvariable zurück greifen. So wird z.B. für die Berechnung der NO_x -Emissionen aus stationärer Verbrennung der Energiebilanzeintrag für den Einsatz von leichtem

Heizöl zur Stromerzeugung an mehreren Stellen im Rechenalgorithmus des Modells BEU¹² benutzt (vgl. auch Kapitel 3.1). Um hierbei robuste Ergebnisse zu erhalten, wurde in PAREST sicher gestellt, dass die „Ziehung“ des Zufallswertes exakt einmal im Modell stattfindet und dass von dort aus der gezogene Wert zu den verschiedenen Rechenoperationen weiter verlinkt ist.

Es wurden aber auch **Korrelationen über die Schadstoffgrenzen hinweg** berücksichtigt:

- An vielen Stellen, insbesondere bei Verbrennungsprozessen, werden Aktivitätsraten nicht nur für die Berechnung der Emission eines Schadstoffes sondern für die Berechnung mehrerer (bzw. sogar aller in PAREST betrachteten) Schadstoffe benutzt. In Analogie zu dem oben beschriebenen Prinzip der exakt einmaligen Ziehung des Zufallswertes innerhalb eines Schadstoffinventars wurden generell alle Aktivitätsraten exakt einmal durch Verteilungsfunktionen ersetzt, so dass innerhalb einer Iteration ein und derselbe gezogene Wert für z.B. den Energiebilanzeintrag für leichtes Heizöl zur Stromerzeugung für alle betrachteten Schadstoffe benutzt wird.
- Für Feinstaub werden in PAREST die Fraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$ betrachtet. $PM_{2,5}$ ist naturgesetzlich immer eine Teilmenge von PM_{10} . D.h. auch in der Monte-Carlo-Simulation ist sicherzustellen, dass innerhalb einer Iteration ein Emissionsfaktor (EF) für $PM_{2,5}$ nicht höher ist als der entsprechende EF für PM_{10} . Zu diesem Zweck wurden die im deterministischen Emissionsinventar auf die Aktivitätsraten bezogenen Emissionsfaktoren für $PM_{2,5}$ für die Monte-Carlo-Simulation durch Splitfaktoren ersetzt: Als Splitfaktor dient dabei für jeweils das Verhältnis des EF $PM_{2,5}$ zum EF PM_{10} des deterministischen Referenzinventars. Der so erhaltene Splitfaktor schwankt zwischen Null und Eins und wird für die Monte-Carlo-Simulation als Inputvariable interpretiert und seinerseits quellgruppenspezifisch mit Unsicherheiten belegt, also durch Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen ersetzt¹³.

¹² Im UBA-Modell „Bilanz der Emissionsursachen“ (BEU) werden die Rahmendaten der Energiebilanz für stationäre Verbrennung disaggregiert nach Anlagengröße, Verbrennungstechnik, Branche und/oder Brennstoff. Das Modell dient der Generierung von disaggregierten Brennstoffverbrauchs-Aktivitätsraten, die im ZSE (vgl. [ZSE 2007], [Jörß und Handke 2007], [Jörß et al. 2007]) mit entsprechenden technologie-, sektor- und brennstoffspezifischen Emissionsfaktoren kombiniert werden. Ein Überblick über BEU ist enthalten in [Jörß und Kamburow 2006], [Hartman et al. 2007] und [Jörß 2007].

¹³ Ausnahme: Die extremen Ausprägungen „0“ und „1“ bleiben als konstante Faktoren erhalten (vgl. Fußnote 9, Seite 13).

3 Unsicherheitsschätzung der Inputdaten 2005

In diesem Kapitel wird beschrieben, wie für die einzelnen Quellgruppen des Inventars die Unsicherheiten des Basisjahres geschätzt wurde, d.h. auf Basis welcher Datenquellen und Annahmen die Parameter der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen bestimmt wurden, die anstelle deterministischer Werte in der Monte-Carlo-Simulation verwendet wurden.

Für die Interpretation der im Folgenden genannten Zahlenwerte für relative Unsicherheiten ist zu beachten, dass diese generell als 2,5%- bzw. 97,5%-Quantile der Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen (vgl. Kapitel 2.3) zu verstehen sind. Sofern nicht anders angegeben, werden für symmetrische Unsicherheiten nach oben und unten eine Normalverteilung und für asymmetrische Unsicherheiten eine (ggf. inverse) Lognormalverteilung angenommen (vgl. Kapitel 2.5). Bei Lognormalverteilungen wurde zur mathematischen Validierung der Parameter stets der in Kapitel 2.5 erläuterte Algorithmus verwendet. Falls Quellen symmetrische Unsicherheiten $\geq 100\%$ angeben, wurde dies analog dazu auch durch eine Lognormalverteilung angenähert.

Das methodische Vorgehen bei der Bestimmung der Unsicherheiten unterschied sich für verschiedene Quellgruppen der Inventare, entlang dieser verschiedenen Herangehensweisen ist auch dieses Kapitel strukturiert. Das über alle Quellgruppen gleiche Vorgehen für die Splitfaktoren zur Berechnung der $PM_{2,5}$ -Emissionen aus den PM_{10} -Emissionen wird zum Abschluss in Kapitel 3.8 beschrieben.

Die Abgrenzung der einzelnen Quellgruppen orientiert sich an der Struktur der Emissionsdatenbank ZSE¹⁴ des Umweltbundesamtes. Grundlage der Arbeiten in PAREST war der Stand des ZSE vom Sommer 2007 [ZSE 2007]. Detaillierte Dokumentationen zur Struktur von [ZSE 2007] finden sich für Feinstaub in [Jörß et al. 2007] und für die Aerosol-Vorläufer SO_2 , NO_x , NMVOC und NH_3 in [Jörß und Handke 2007]. Die Modifikationen an [ZSE 2007] zu Generierung des PAREST-Referenz-Emissionsdatensatzes für 2005 im Inlandsprinzip, also den Gegenstand dieser Unsicherheitsbetrachtung, sind in [Jörß et al. 2010] beschrieben.

Im Überblick wurden als Datenquellen für die Bestimmung der gesuchten Unsicherheitsparameter benutzt:

- Berichte zu Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes bzw. des Johann Heinrich von Thünen-Institutes (für die Landwirtschaft), auf denen die ZSE-Daten beruhen, für
 - Aktivitätsraten der Energiebilanz,
 - Emissionsfaktoren stationäre Feuerung,
 - Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten Straßenverkehr,
 - Emissionsfaktoren und Aktivitätsraten Landwirtschaft und
 - Emissionen aus der Lösemittelmittelverwendung,
- Expertenschätzungen von Mitarbeitern des Umweltbundesamtes,
- Einträge zu Unsicherheiten in [ZSE 2007],
- Angaben zu Unsicherheitsspannen in den aktuellen internationalen Handbüchern für Emissionsinventare [IPCC 2006] und [EEA 2009] sowie
- eigene Schätzungen.

Generell wurden die Unsicherheiten exakt auf dem recht disaggregierten Niveau des ZSE bestimmt, d.h. bis zu 680 Emissionsdatensätze pro Schadstoff und Jahr. In zwei emissionsmäßig sehr bedeutsamen Quellgruppen, stationäre Verbrennung (vgl. Kapitel 3.1) und Straßenverkehr (vgl. Kapitel 3.3), wurde sogar noch darüber hinausgegangen und die im deterministischen Emissionsinventar dem ZSE vorgelagerte Modellierung von Aktivitätsraten in die Monte-Carlo-Simulation mit einbezogen, um die hier sehr wichtigen Korrelationen der disaggregierten Brennstoff- bzw. Treibstoffverbräuche untereinander angemessen abbilden zu können.

3.1 Aktivitätsraten stationäre Feuerung / Energiebilanz

Die Energiebilanz

Die Aktivitätsraten für stationäre Feuerung werden im ZSE und somit auch in PAREST durch Brennstoffverbräuche, gemessen in Energieeinheiten, üblicherweise Terajoule (TJ) dargestellt. Den Rahmen dieser Energiedaten bildet die Energiebilanz des jeweiligen Berichtsjahres. Die deutschen Energiebilanzen enthalten emissionsrelevante Brennstoffverbräuche in stationären Anlagen in einer Reihe von Energiebilanzzeilen (EBZ, vgl. Tabelle 1), die in bis zu 29 Energieträgerspalten differenziert sind:

Tabelle 1: Emissionsrelevante Zeilen für stationäre Feuerung der deutschen Energiebilanzen seit 1995

Nummer EBZ	Name der Energiebilanzzeile
EBZ 11	Öffentliche Wärmekraftwerke (ohne HKW)
EBZ 12	Industriewärmekraftwerke
EBZ 15	Öffentliche Heizkraftwerke
EBZ 16	Fernheizwerke
EBZ 40	Energieverbrauch im Umwandlungsbereich insgesamt
EBZ 60	Bergbau, Gewinnung von Steinen und Erden, Verarbeitendes Gewerbe insgesamt
EBZ 66	Haushalte
EBZ 67	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher

Die EBZ 40 ist dabei eine Summenzeile von sieben weiter differenzierten Einzelzeilen von Subsektoren des Umwandlungsbereichs wie z.B. Kokereien, Brikettfabriken oder Raffinerien. EBZ 60 ist eine Summenzeile von 14 Einzelzeilen verschiedener Industriebranchen wie z.B. Gewinnung von Steinen und Erden, Grundstoffchemie oder Metallgewinnung.

Die Bilanz der Emissionsursachen (BEU)

Für die Zwecke der Emissionsbilanzierung im ZSE werden die Rahmendaten der Energiebilanz im Umweltbundesamt mit Hilfe des Modells BEU weiter disaggregiert nach Kategorien wie Anlagengröße, Verbrennungstechnik, Branche und/oder Brennstoff. BEU steht für „Bilanz der Emissionsursachen“, ein Überblick über die Funktionsweise der BEU ist enthalten in [Jörß und Kamburow 2006], [Harthan et al. 2007] und [Jörß 2007].

¹⁴ ZSE: Zentrales System Emissionen

Zur adäquaten Erfassung der Korrelationen zwischen den einzelnen disaggregierten Aktivitätsraten der ZSE-Struktur wurde für PAREST das dem ZSE vorgelagerte BEU-Modell in die Monte-Carlo-Simulation mit einbezogen. Zu diesem Zweck wurde die deterministische BEU-Version vom Juni 2006 [BEU 2006], die auch [ZSE 2007] mit zu Grunde liegt, in ein stochastisches Modell umgearbeitet, so dass jede Inputvariable des Modells durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung ersetzt wurde (vgl. Kapitel 2). Dabei wurden zusätzlich noch einige kleinere logische und EDV-technische Fehler in [BEU 2006] im Bereich der EBZ 60 (Industrie) identifiziert und beseitigt¹⁵. Die EBZ 66 und 67 sind in [BEU 2006] nicht enthalten sondern wurden am Umweltbundesamt für [ZSE 2007] in einem getrennten Modell verarbeitet. Für die Monte-Carlo-Simulation in PAREST wurden die Rechenalgorithmen für EBZ 66 und 67 allerdings in den EDV-Rahmen der BEU integriert.

Die aktuellsten in [BEU 2006] enthaltenen Energiestatistiken betreffen das Jahr 2004. Die Daten für 2005 werden auf Basis vorläufiger Auswertetabellen zur Energiebilanz hochgerechnet. Die Operationalisierung der Unsicherheitenrechnung in BEU wurde deshalb für das Berichtsjahr 2004 durchgeführt. Im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation wurden jedoch die ermittelten Abweichungen der BEU-Ergebnisdaten vom jeweiligen Erwartungswert auf die Erwartungswerte für 2005 übertragen und somit die Anschlussfähigkeit an die Analyse des Gesamtinventars für 2005 sichergestellt. Methodisch wird in der Unsicherheitenanalyse der Emissionsinventare somit „nur“ die Verarbeitung einer bereits vorliegenden Energiebilanz abgebildet. Der Aspekt der Vorläufigkeit der Energiebilanz im speziellen Fall des Jahres 2005 wird vernachlässigt.

Unsicherheitsparameter für BEU

BEU verarbeitet eine Reihe verschiedener Typen von Inputvariablen, denen jeweils Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet werden mussten:

- Daten der Energiebilanz: Zeilen 10, 11, 12, 15, 16, 33-39 (summiert zu 40) sowie 46-59 (summiert zu 60), zusätzlich EBZ 66 und 67
- Diverse sektor- oder technikbezogene Energiestatistiken des Statistischen Bundesamtes sowie energiewirtschaftlicher Verbände sowie Sonderauswertungen des Umweltbundesamtes
- Splitfaktoren zur prozentualen Aufteilung von Brennstoffverbräuchen auf Subsektoren
- Ausnutzungsdauern [h/a] von Feuerungsanlagen
- Wirkungsgrade von Feuerungsanlagen
- Heizwerte von Brennstoffen

Unsicherheitsschätzungen für Daten der Energiebilanz konnten aus [Harthan et al. 2007] abgeleitet werden. Eine Übersicht zeigt Tabelle 2, es wird eine Normalverteilung angenommen:

¹⁵ Die Überarbeitung von EBZ 60 war nicht Gegenstand des [BEU 2006] zu Grunde liegenden Forschungsvorhabens des IZT für das Umweltbundesamt gewesen, vgl. [Jörß und Kamburow 2006].

Tabelle 2: Unsicherheiten der Energiebilanz 2004

Brennstoff	Energiebilanzzeilen (EBZ)								
	10	11	12	15	16	40	60	66	67
	Stein- und Braunkohlenbrikettfabriken	Öffentliche Wärme- kraftwerke (ohne HKW)	Industriewärme- kraftwerke	Öffentliche Heiz- kraftwerke	Fernheizwerke	Energie-Verbrauch im Umwandlungs- Bereich insgesamt	Bergbau, Gew. Stei- ne u. Erden, Verar- beit. Gewerbe insg.	Haushalte	Gewerbe, Handel, Dienstleistungen u. übrige Verbraucher
Steinkohle	11%	11%	11%	11%	14%	11%	12%	11%	11%
Steinkohlenbriketts								6%	6%
Steinkohlenkoks							10%	6%	7%
Rohbraunkohle	13%	13%	13%	13%	20%	13%	15%	13%	13%
Braunkohlebriketts		6%	6%	6%	18%	6%	10%	6%	6%
Anderer Braunkoh- lenprodukte		6%	6%	6%	18%	6%	10%	7%	7%
Ottokraftstoffe								12%	6%
Flugturbinenkraftst.									6%
Dieselmotorkraftstoff		6%	6%	6%	6%	6%	6%		6%
Heizöl leicht		6%	6%	6%	6%	6%	6%	12%	12%
Heizöl schwer		6%	6%	6%	6%	6%	6%		6%
Petrolkoks		7%	7%	7%	7%	7%	7%		
Flüssiggas		6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%	6%
Raffineriegas		6%	6%	6%	6%	6%	6%		
Anderer Mineralöl- produkte		7%	7%	7%	7%	7%	7%	8%	6%
Kokerei- und Stadt- gas		8%	8%	8%	9%	11%	11%		
Gichtgas u. Konver- tergas		10%	10%	10%	10%	9%	9%		
Erdgas Erdöl- gas		8%	9%	8%	17%	9%	11%	12%	12%
Grubengas			9%		10%	9%			
Müll und sonstige Biomasse		30%	21%	30%	30%	30%	30%	30%	30%

Quelle: nach [Harthan et al. 2007]

Für Splitfaktoren, die ja immer einen Wert zwischen Null und Eins einnehmen, wurde folgender Algorithmus entwickelt:

1. Splitfaktoren mit den deterministischen Werten genau Null oder Eins bleiben auch in der Monte-Carlo-Simulation konstant.
2. Es wird ein Intervall des deterministischen Wertes des Splitfaktors definiert, innerhalb dessen eine Normalverteilung angenommen wird.
Einheit: % (Einheit des Splitfaktors)
Außerhalb dieses Intervalls wird eine Lognormalverteilung angenommen, am oberen Ende (Erwartungswert nahe 1) als inverse Lognormalverteilung.
3. Für den Fall der Normalverteilung wird ein halbes Konfidenzintervall festgelegt, Einheit: %-Punkte des Splitfaktors (nicht % des Erwartungswertes!)
4. Für den Fall der Lognormalverteilung wird ein Anteil am Intervall zwischen dem Erwartungswert und Null, das die Lage des 2,5%-Quantils der Verteilung festlegt, für die inverse Lognormalverteilung gilt derselbe Anteil gespiegelt. Einheit: % des Intervalls (nicht % des Erwartungswertes!)

Auch Auslastungsdauern von Feuerungsanlagen wurden in diesem Sinne als Splitfaktoren behandelt, bezogen auf die theoretisch maximale Auslastungsdauer von 8760 h/a. Die in PAREST gewählten Parameter für die Umwandlung von Splitfaktoren in Wahrscheinlichkeitsverteilungen zeigt Tabelle 3. Parameter zur Umwandlung der sonstigen Inputvariablen in BEU zu Wahrscheinlichkeitsverteilungen zeigt Tabelle 4.

Tabelle 3: Unsicherheitsparameter für Splitfaktoren in BEU

Parameter	Einheit	Splitfaktoren allgemein	Splitfaktoren für Auslastungsdauern
Intervall für Normalverteilung	% (= Splitfaktor)	35% - 65%	35% - 65%
Lage der unteren Schranke bei Lognormalverteilung	% des Intervalls zwischen Erwartungswert und Null	25%	50%
halbes Konfidenzintervall Normalverteilung	%-Punkte des Splitfaktors	15%-Punkte	25%-Punkte

Quelle: Schätzung IZT

Tabelle 4: Sonstige Unsicherheitsparameter für BEU

Inputvariable	Unsicherheit [+/- %] normalverteilt	Quelle der Schätzung
aktuelle Energiestatistiken, destatis & Energiewirtschaft	15%	Schätzung IZT
alte Statistikdaten, konstant fortgeschrieben aus früheren Jahren	30%	Schätzung IZT
Statistikdaten, Sonderauswertung UBA	30%	Schätzung IZT
Wirkungsgrade	10%	Schätzung IZT
Umrechnungsfaktoren für Heizwerte in Kokereien	10%	Schätzung IZT
Unsicherheit Heizwerte (Energiebilanz):		
<i>Heizöl, leicht</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Heizöl schwer</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Petrolkoks</i>	4%	[Harthan et al. 2007]
<i>Andere Mineralölprodukte</i>	4%	[Harthan et al. 2007]
<i>Flüssiggas</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Raffineriegas</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>feste Brennstoffe</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Steinkohle, Steinkohlenbriketts</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Ballaststeinkohle</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Steinkohlenkoks</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Rohbraunkohle inkl. Hartbraunkohle</i>	4%	[Harthan et al. 2007]
<i>Braunkohlenbriketts, -koks</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Gichtgas</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Erdgas, Erdölgas</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Ortsgas, Kokereigas</i>	3%	[Harthan et al. 2007]
<i>Hochofengas</i>	3%	in Anlehnung an [Harthan et al. 2007]
<i>Müll</i>	15%	in Anlehnung an [Harthan et al. 2007]

Behandlung von EBZ 66 und 67 (Haushalte & GHD)

Die Brennstoffeinsätze in den Energiebilanzzeilen 66 (Haushalte) und 67 (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und übrige Verbraucher) waren nicht in [BEU 2006] enthalten, sondern wurden am Umweltbundesamt über ein einfacheres und älteres Modell in die ZSE-Struktur übertragen: Viele Energiebilanzeinträge werden (vor allem bei EBZ 66) unverändert zu Aktivitätsraten der ZSE-Struktur. In einigen Fällen werden auch Energiebilanzeinträge, vor allem bei EBZ 67, über Splitfaktoren und konstante Fortschreibungen auf verschiedene Subsektoren, z.B. Landwirtschaft, Militär und übrige Kleinverbraucher in Gewerbe, Handel, Dienstleistungen, verschiedene Anlagentypen (Anlagenbetrieb nach 1. BImSchV¹⁶ oder TA Luft¹⁷) oder verschiedene Brennstoffe aufgeteilt.

Für die Monte-Carlo-Simulation wurden die rechnerischen Verhältnisse zwischen den Energiebilanzdaten und den jeweils zugehörigen Brennstoffmengen der ZSE-Struktur als allgemeine Splitfaktoren gemäß Tabelle 3 (Seite 31) interpretiert und so in Wahrscheinlichkeitsverteilungen umgewandelt.

3.2 Emissionsfaktoren stationäre Feuerung

Kesself Feuerungen und Gasturbinen im Geltungsbereich von TA Luft und 13.BImSchV

Die Unsicherheitsschätzungen für Kesself Feuerungen und Gasturbinen nach 13.BImSchV¹⁸ und TA Luft beruhen im Wesentlichen auf der Studie [Rentz et al. 2002], die eine wesentliche Basis für die am Umweltbundesamt benutzten Emissionsfaktoren für diese Anlagenarten darstellt.

In [Rentz et al. 2002] waren den auf ZSE-Niveau abgeleiteten Emissionsfaktoren basierend auf einer Analyse der jeweils zu Grunde liegenden Datensätze in Qualitätsschlüssel von 0 bis 11 mit Stufen von 10 % zugeordnet worden (0: $\leq 10\%$; 1: 10 bis $\leq 20\%$; 2: 20 bis $\leq 30\%$; etc.).¹⁹ Für die Nutzung in PAREST wurden die diesen Qualitätsschlüsseln unterlegten Intervalle durch definierte relative Abweichungen der oberen Grenzen des 95%-Konfidenzintervalls vom Erwartungswert ersetzt (Klasse 0: 5%; Klasse 1: 15%; Klasse 3: 25% etc.). Dabei wurden Unsicherheiten bis 90% als normalverteilt und symmetrisch interpretiert. Für obere Abweichungen über 90% (d.h. Klassen 9 bis 11) wurde eine Lognormalverteilung angenommen und die untere Grenze gemäß Gleichung 6 und Gleichung 7 (Kapitel 2.5, Seite 23) berechnet.

[Rentz et al. 2002] liefert Unsicherheitsschätzungen u.a. für die betrachteten Schadstoffe SO₂, NO_x, NMVOC und Staub. Die Angaben für Staub wurden in PAREST für PM₁₀ benutzt. Für NH₃ wurden Unsicherheitsschätzungen auf Basis von [EEA 2009] vorgenommen (vgl. die in Kapitel 3.7.3, Seite 46 beschriebene Vorgehensweise).

¹⁶ Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen - 1. BImSchV)

¹⁷ Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft)

¹⁸ Dreizehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Großfeuerungs- und Gasturbinenanlagen – 13. BImSchV)

¹⁹ Vgl. [Rentz et al. 2002], Anhang C „Abschätzung der Unsicherheit von Emissionsfaktoren“ sowie dem Bericht zugehörige Tabellenwerke.

Da sich die ZSE-Struktur seit der Erstellung von [Rentz et al. 2002] leicht weiterentwickelt hatte, mussten an einigen Stellen Übertragungen und Analogieschlüsse vorgenommen werden. Für das ZSE-Strukturelement „Übrige Prozessfeuerungen im Umwandlungssektor^{20c}“ sind aus [Rentz et al. 2002] keine Unsicherheitsdaten ableitbar. Hier wurde für alle Brennstoffe in PAREST pauschal mit +/- 50% (normalverteilt, für alle Schadstoffe) gerechnet.

Genehmigungsbedürftige Motoren

Für genehmigungsbedürftige stationäre Motoren (d.h. nach TA Luft genehmigt) konnten für den Schadstoff NO_x Unsicherheitsschätzungen aus [Degel und Jörß 2009] übernommen werden. Für SO₂ wurden per Analogieschluss (Emissionsfaktor hängt bei Abwesenheit einer Entschwefelungseinrichtung nur vom Schwefelgehalt des Brennstoffs ab) Unsicherheitsschätzungen aus [Rentz et al. 2002] übernommen, für die anderen Schadstoffe wurde [EEA 2009] genutzt (vgl. Kapitel 3.7.3).

Kleinfeuerungsanlagen

Die Unsicherheitsschätzungen für Emissionsfaktoren für Feuerungen in Haushalten und Kleinverbrauch (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) beruhen im Wesentlichen auf der Studie [Struschka et al. 2008]. [Struschka et al. 2008] ist inhaltlich eine Aktualisierung/Neuaufgabe von [Struschka et al. 2003] und [Pfeiffer et al. 2000], die jeweils die Basis für die am Umweltbundesamt für diese Anlagenarten genutzten Emissionsfaktoren darstellen und darstellten.

In [Struschka et al. 2008] werden zur Charakterisierung der Emissionsfaktoren Unsicherheitsklassen von 1 bis 11 benutzt, fast identisch zum methodischen Vorgehen in [Rentz et al. 2002] für Großfeuerungsanlagen (siehe oben). Die Interpretation für PAREST erfolgte deshalb genau so, wie schon oben für die Quelle [Rentz et al. 2002] beschrieben.

[ZSE 2007] und damit die Emissionsfaktoren des PAREST-Referenzszenarios beruhen allerdings noch auf [Struschka et al. 2003], der Vorgängerstudie von [Struschka et al. 2008]. In vielen Bereichen unterscheiden sich die deterministischen Emissionsfaktoren (d.h. die Mittelwerte) beider Studien kaum, d.h. hier konnten die Unsicherheitsparameter aus [Struschka et al. 2008] wie skizziert ohne zusätzliche Bearbeitungsschritte für PAREST übernommen werden. In einigen Fällen aber gab es deutliche Unterschiede zwischen beiden Studien, so dass die prozentualen Unsicherheiten aus [Struschka et al. 2008] nicht zu den Mittelwerten aus [Struschka et al. 2003] bzw. [ZSE 2007] passten. Hier wurde für PAREST folgender Algorithmus gewählt:

1. Die relativen Unsicherheiten aus [Struschka et al. 2008] wurden in absolute obere bzw. untere Grenzen des Konfidenzintervalls des jeweiligen Emissionsfaktors (Einheit kg/TJ) umgerechnet.
2. Das Verhältnis dieser absoluten Grenzen zum Mittelwert der PAREST-Referenz (aus [Struschka et al. 2003] bzw. [ZSE 2007]) wurde zur ersten Schätzung relativen Unsicherheit nach oben bzw. unten in PAREST.
3. Die Verteilung wird als lognormal bzw. invers lognormal interpretiert.

²⁰ Inhaltlich abgebildet sind damit im Wesentlichen Unterfeuerungen in Raffinerien.

4. Gemäß dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Algorithmus werden schließlich die genauen Parameter der Verteilung für die Monte-Carlo-Simulation berechnet.

Für einige Sektoren (Feuerungen in Haushalten und der Landwirtschaft, Übriger Kleinverbrauch) und wenig eingesetzte Brennstoffe (diverse Kohlen, Petroleum, Brenntorf) waren allerdings in [Struschka et al. 2008] keine Angaben zu Unsicherheiten zu finden. In diesen Fällen wurden Übertragungen von ähnlichen Brennstoffen oder Emissionsquellen vorgenommen von denen Angaben zu ihren Unsicherheiten verfügbar waren.

Korrelationen zwischen Emissionsfaktoren in der ZSE-Struktur

An diversen Stellen der ZSE/BEU-Struktur kommt es vor, dass verschiedene Zeitreihen Teilbrennstoffströme ein- und derselben Anlagenkategorie abbilden. So werden z.B. in der Energiebilanz die Brennstoffströme in gleichzeitig Strom und Wärme produzierenden Kraftwerken „künstlich“ auf Brennstoffeinsätze zur Stromproduktion (EBZ 11 und 12) und Brennstoffeinsätze zur Wärmeproduktion (EBZ 15, 40 und 60) aufgeteilt. Die Emissionsfaktoren für solche Anlagen sind jedoch immer auf die komplette Anlage definiert, so dass die deterministischen Emissionsfaktoren auch jeweils identisch sind. Diese Korrelationen wurden auch für die Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt.

Des Weiteren kommt es vor, dass die Rahmendaten der Energiebilanz seitens des UBA „korrigiert“ werden und deshalb über den Rahmen der Energiebilanz hinaus Brennstoffmengen für das Emissionsinventar bilanziert werden. Auch diese im ZSE als „Nicht Energiebilanz“ gekennzeichneten Brennstoffmengen sind in eigenen Zeitreihen abgelegt und werden mit identischen Emissionsfaktoren belegt wie die korrespondierenden „Energiebilanz“-Zeitreihen. Auch hier wurden diese Korrelationen für die Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt.

3.3 Oberflächengebundener Verkehr

Zur Quantifizierung der Unsicherheiten im oberflächengebundenen Verkehr (d.h. Straße, Schiene und Schiff sowie mobile Maschinen) wurde überwiegend auf eine aktuelle Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes zur Bestimmung der Unsicherheiten für TREMOD und TREMOD MM zurückgegriffen [Knörr et al. 2009]. Die in [Knörr et al. 2009] angewandten Methoden zur Bestimmung der Unsicherheiten orientieren sich im Wesentlichen an der Vorgehensweise, wie sie in den einschlägigen Publikationen des IPCC [IPCC 2000, 2006] vorgeschlagen werden. Da die Modelle TREMOD (vgl. [Knörr et al. 2005]) und TREMOD MM (vgl. [Lambrecht et al. 2004]) vom Umweltbundesamt in der nationalen Inventarerstellung zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen aus dem Verkehr benutzt werden²¹, sind in der Studie Unsicherheiten zu den analogen Kategorien von Schadstoff, Treibstoff, Fahrzeugtyp, Betriebsart und Minderungstechnik zu finden, wie sie auch von der Inventarstruktur abgebildet werden. Vor diesem Hintergrund ist [Knörr et al. 2009] als Datenquelle für die Quantifizierung der Unsicherheiten im Bereich Verkehr für PAREST besonders prädestiniert.

3.3.1 Aktivitätsraten

Straßenverkehr

Für die Aktivitätsraten liegen in [Knörr et al. 2009] differenzierte Angaben zu den Unsicherheiten vor. Folgende Differenzierungen werden vorgenommen:

Tabelle 5: Differenzierungen von Aktivitätsraten im Straßenverkehr

Kraftstoffe	Fahrzeugtypen	Straßenkategorien	Minderungstechnik
D (Diesel)	PKW	AB (Autobahn)	MT (Minderungstechnik – ab EURO I/1)
B (Benzin)	BUS	IO (innerorts)	KO (konventionell – ohne EURO-Norm)
	LNF (leichte Nutzfahrzeuge)	AO (außerorts)	
	SNF (schwere Nutzfahrzeuge)		
	KR (Motorräder)		
	KKR (Kleinkrafträder)		

Darüber hinaus liegen differenzierte Angaben hinsichtlich der Unsicherheiten der Aktivitätsraten bei der Verdampfung von Benzin für die Fahrzeugtypen PKW, KR und KKR vor.

Gleichwohl waren nicht für alle aus [ZSE 2007] stammenden Kategorien des Verkehrsbereichs der PAREST-Referenz spezifische Angaben zu den Unsicherheiten der Aktivitätsraten vorhanden. Daher wurden einige Annahmen und Übertragungen vorgenommen, im Einzelnen waren dies:

²¹ 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 TREMOVE [De Ceuster et al. 2007] etabliert. Die aktuelle Version TREMOVE 2.7 errechnet für den Straßenverkehr in Deutschland 2005 zum Teil deutlich von der PAREST-Referenz abweichende Emissionsmengen. Die Unterschiede zwischen TREMOD und TREMOVE sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung, sondern werden in [Kugler et al. 2010] vertieft.

- Für Mopeds wurde vollständig die Straßenkategorie Innerorts benutzt.
- Für die Benutzung von Petroleum in Bussen mit Minderungstechnik wurden die Unsicherheiten für die Benutzung von Diesel in Bussen ohne Minderungstechnik verwandt.
- Für den Einsatz von Flüssiggas in PKW wurde dieselbe Unsicherheit wie für die Nutzung von Benzin in PKW angenommen.

Für die Unsicherheiten der Fahrleistungen wurden differenzierte Angaben hinsichtlich der Fahrzeugtypen PKW und BUS genutzt. Für LNF und SNF wurden pauschale Angaben für die Gesamtfahrleistung beider Fahrzeugarten inklusive Sattelzügen eingesetzt, und für die Fahrleistungen von motorisierten Zweirädern wurden die Unsicherheiten der Gesamtfahrleistungen der Pkw verwandt.

Bei der Implementierung der Unsicherheiten der Aktivitätsraten in die Monte-Carlo-Simulation wurde darauf geachtet, dass immer dann Korrelationen der Unsicherheiten berücksichtigt wurden, wenn mehrere, tiefer disaggregierte Datensätze der ZSE-Struktur aus einem Unsicherheitsdatum aus [Knörr et al. 2009] gespeist wurden.

Übrige Verkehre

Für die Unsicherheiten der Aktivitätsraten von nicht straßengebundenen übrigen Verkehren, lagen differenzierte Angaben für den Dieserverbrauch von Eisenbahn und Binnenschifffahrt vor. Abweichend davon wurden für den Verbrauch von schwerem Heizöl in der Hochseeschifffahrt die Unsicherheiten des Dieserverbrauchs der Binnenschifffahrt sowie für den Verbrauch von Kohlen im Schienenverkehr, die Unsicherheiten des Dieserverbrauchs der Eisenbahnen genutzt. Für die Unsicherheiten des bauwirtschaftlichen Verkehrs lagen differenzierte Angaben zu den Unsicherheiten von Diesel- und Benzinverbrauch dieser Verkehre vor. Diese Angaben wurden treibstoffspezifisch für den militärischen, landwirtschaftlichen und forstwirtschaftlichen Verkehr übernommen.

Größenordnung der Unsicherheiten

Einen Überblick über relative Unsicherheiten von Kraftstoffverbrauch zum Antrieb im Straßenverkehr gibt im Folgenden Tabelle 6, für die Abkürzungen vgl. Tabelle 5:

Tabelle 6: Unsicherheiten von Aktivitätsraten (Antrieb) im Straßenverkehr

Kraftstoff	Fahrzeugtyp	Minderungs- technik	Straßenkate- gorie	Unsicherheit normalverteilt [± %]
B	KKR	KO	AO	35%
B	KKR	KO	IO	63%
B	KR	KO	AB	35%
B	KR	KO	AO	36%
B	KR	KO	IO	62%
B	KR	MT	AB	28%
B	KR	MT	AO	22%
B	KR	MT	IO	40%
B	LNF	KO	AB	36%
B	LNF	KO	AO	36%
B	LNF	KO	IO	63%
B	LNF	MT	AB	28%
B	LNF	MT	AO	22%
B	LNF	MT	IO	39%
B	PKW	KO	AB	36%
B	PKW	KO	AO	36%
B	PKW	KO	IO	63%
B	PKW	MT	AB	28%
B	PKW	MT	AO	22%
B	PKW	MT	IO	39%
D	BUS	KO	AB	50%
D	BUS	KO	AO	51%
D	BUS	KO	IO	59%
D	BUS	MT	AB	31%
D	BUS	MT	AO	27%
D	BUS	MT	IO	42%
D	LNF	KO	AB	50%
D	LNF	KO	AO	51%
D	LNF	KO	IO	59%
D	LNF	MT	AB	31%
D	LNF	MT	AO	27%
D	LNF	MT	IO	41%
D	PKW	KO	AB	51%
D	PKW	KO	AO	51%
D	PKW	KO	IO	60%
D	PKW	MT	AB	32%
D	PKW	MT	AO	28%
D	PKW	MT	IO	42%
D	SNF	KO	AB	18%
D	SNF	KO	AO	20%
D	SNF	KO	IO	36%
D	SNF	MT	AB	17%
D	SNF	MT	AO	19%
D	SNF	MT	IO	36%

Quelle: nach [Knörr et al. 2009]

Beim Straßenverkehr sind mit +/- 63% erhebliche Unsicherheiten bei den innerörtlichen Benzinverbräuchen von Fahrzeugen ohne Minderungstechniken zu finden. Allerdings sind diese Ben-

zinverbräuche absolut eher unbedeutend. In derselben Größenordnung sind Unsicherheiten bei der Verdunstung über alle Fahrzeugtypen ohne Minderungstechniken zu finden.

Die geringsten Unsicherheiten liegen mit +/- 17% beim Dieselverbrauch schweren Nutzfahrzeuge mit Minderungstechnik auf Autobahnen. Mit 18-19% in ähnlicher Größenordnung liegen die Unsicherheiten des Dieselverbrauchs schwerer Nutzfahrzeuge außerorts.

Die größten Unsicherheiten im Bereich des übrigen Verkehrs liegen mit +/- 62% im Dieselverbrauch der Bauwirtschaft gefolgt von der Binnenschifffahrt mit +/- 47%. Die geringsten Unsicherheiten der Aktivitätsraten in diesem Sektor besitzt die Eisenbahn mit +/- 10% gefolgt vom Benzinverbrauch der Bauwirtschaft mit +/- 18%.

3.3.2 Emissionsfaktoren - Auspuff

Straßenverkehr

Für PKW im Straßenverkehr liegen die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für NMVOC und NO_x hinsichtlich Kraftstoffen, Straßenkategorien und Minderungstechnik ähnlich differenziert vor wie bei den Aktivitätsraten. Den Unsicherheiten der leichten Nutzfahrzeugen und der motorisierten Zweiräder wird in [Knörr et al. 2009] eine positive Korrelation zu den Unsicherheiten der PKW unterstellt. Daher werden für beide Schadstoffe, die Unsicherheiten der PKW auch für diese beiden Fahrzeugtypen angenommen.

Für schwere Nutzfahrzeuge und für Busse geben [Knörr et al. 2009] die Unsicherheiten sowohl für die NO_x als auch für die NMVOC-EF höherer aggregiert an. Das bedeutet, dass es keine spezifischen Unsicherheiten für unterschiedliche Straßenkategorien und Minderungstechniken gibt. Neben dieser Pauschalisierung erfolgte auch eine Vereinfachung im Kraftstoffbereich. So wurden die Unsicherheiten für Diesel auch für Petroleum und für Biodiesel genutzt.

Übrige Verkehre

Für den Bereich der übrigen Verkehre haben [Knörr et al. 2009] eine Berechnung der Unsicherheiten für Bahndieselmotoren durchgeführt. Diese Berechnungen umfassten Unsicherheiten für NO_x und PM.

Die relativen Unsicherheiten für den Eisenbahnverkehr wurden in PAREST auch für die Schifffahrt sowie den Offroad-Verkehr von Bau-, Land- und Forstwirtschaft genutzt. Auch hinsichtlich der im Offroad-Verkehr eingesetzten Treibstoffe Benzin, Flüssiggas und Schweröl wurden die Unsicherheiten für Dieselmotoren verwandt.

Größenordnung der Unsicherheiten

Die Unsicherheiten von EF für NMVOC-Emissionen aus der Verdunstung von Fahrzeugen ohne Minderungstechnik werden von IFEU mit +/- 119% angegeben. Da negative Emissionsfaktoren real nicht möglich sind, wurde die untere Unsicherheit für PAREST auf -99% gesetzt.

Für NMVOC EF sind dies die größten Unsicherheiten. Grundsätzlich lassen sich für Benzin mit +/- 62% bis +/- 100% höhere Unsicherheiten der NMVOC EF als für Diesel mit +/- 27% bis +/- 62% feststellen. Diese kraftstoffspezifische Verteilung der Unsicherheiten ist bei den NO_x EF

noch stärker festzustellen. So liegen dort die Unsicherheiten für Diesel zwischen +/- 13% und +/- 36% und für Benzin zwischen +/- 44% und +/- 100%.

3.3.3 Abrieb und Wiederaufwirbelung

Zur Bestimmung der Unsicherheiten der EF für Feinstaub für den **Abrieb** von Reifen, Straßenbelag und Bremsbelag wurde das CORINAIR Guidebook 2009 [EEA 2009] als Datenquelle benutzt. Unterschieden wurde dabei zwischen den Fahrzeugtypen. PKW und Zweiräder sowie schweren und leichten Nutzfahrzeugen. Für die Kategorien Reifen, Straßenbelag sowie Bremsbelag wurden jeweils identische Unsicherheiten angenommen.

Für die Unsicherheit der in PAREST benutzten Emissionsfaktoren für die **Wiederaufwirbelung** von Straßenstaub (aus [Schaap et al. 2009]) liegen keine Literaturquellen vor. Als Ergebnis einer im PAREST-Konsortium abgestimmten Expertenschätzung wurde für die Monte-Carlo-Simulation mit +/- 75% gerechnet.

3.4 Lösemittel

Die Lösemittellemissionen sind im ZSE in Form vier aggregierter Emissionszeitreihen für die Sektoren

- Lackierung,
- Entfettung, Chemische Reinigung,
- Herstellung und Anwendung chemischer Produkte und
- Übrige Lösemittelverwendung

abgebildet. Dahinter steht ein hoch differenziertes Modell zur Berechnung der Lösemittellemissionen (vgl. [Theloke 2005]). Im Rahmen dieser Lösemittelmodellierung wurde auch eine Unsicherheitsanalyse vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Unsicherheitsberechnung sind im ZSE angegeben und wurde nach dem in Kapitel 3.7.1 beschriebenen Algorithmus für PAREST übernommen.

3.5 Landwirtschaft

Zur Quantifizierung der Unsicherheiten in der Landwirtschaft wurde vor allem auf eine aktuelle Studie des Johann Heinrich von Thünen-Instituts am Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei aus dem Jahre 2009 [Dämmgen 2009] zurückgegriffen. Soweit dort insbesondere für spezifische Tierarten keine Unsicherheiten zu finden waren sowie für die Abschätzung der Unsicherheiten der Emissionsfaktoren von Feinstaub, wurden die Angaben aus [EEA 2009] ergänzt.

3.5.1 Aktivitätsraten der Landwirtschaft

Die Unsicherheit der Tierzahlen sind relativ gering und werden von [Dämmgen 2009] mit 4 bis 5 % angegeben. Dies entspricht auch der Größenordnung der Unsicherheiten amtlicher Statistiken. Tendenziell sind die Angaben zu den Tierzahlen zwar zu niedrig [Dämmgen 2008], trotzdem wird von einer Normalverteilung ausgegangen. Außer diesem systematischen Fehler ist auch mit einem stochastischen Fehler von 3 % zu rechnen. Je nach Tierart liegen die Unsicherheiten damit

zwischen 5% (Mastbullen, Geflügel, Schweine), 8% (Milchkühe) und 10% (Ziegen und Schafe). Eine Ausnahme bilden Pferde, Maultiere und Esel sowie Pelztiere deren Unsicherheiten mit 99% angegeben werden. Für Letztere werden offiziell keine Tierzahlen erhoben. Das BMVEL hat die Zahlen für das Jahr 2000 durch Umfragen bei den entsprechenden Länderdienststellen erfragt. Die hohe Unsicherheit bei den Pferdezahlen ergibt sich daraus, dass die Freizeitpferde praktisch nicht erfasst sind.

Für einige Tierarten oder spezifischen Haltungsarten, über die im nationalen Inventar berichtet werden, macht [Dämmgen 2009] keine Angaben. In diesen Fällen wurden die Unsicherheiten von vergleichbaren ähnlichen Tierarten übernommen. Tabelle 7 gibt diesbezüglich einen Überblick:

Tabelle 7: Erweiterte Nutzung von Unsicherheiten für Aktivitätsraten anderer Tierarten

Tierart gemäß [Dämmgen 2009]	Emittentengruppe im nationalen Inventar laut [ZSE 2007]	Unsicherheiten
Milchkühe	Sonstige Rinder	+/- 8%
Gänse	Puten	+/-10%
Legehennen	Junghennen	+/-10%
Mastbullen	Mastrinder (weiblich und männlich), Büffel	+/-5%
Pferde, Maultiere und Esel	Pferde	+/-99%

Neben der Pauschalisierung der Unsicherheiten für unterschiedliche Tierarten wurden teilweise auch identische Unsicherheiten für unterschiedliche Haltungsarten angenommen. Dies betrifft insbesondere gülle- und strohbasierte Systeme sowie die Weidehaltung von Milchkühen, sonstigen Rindern und von Büffeln, welche im nationalen Inventar differenziert erfasst werden.

Für flächenbezogene Aktivitätsraten liegen die Unsicherheiten zwischen 10 und 30%. Quantitative Aussagen zur Genauigkeit der Flächenermittlung liegen laut Mitteilung des statistischen Bundesamtes für Deutschland nicht vor. [Dämmgen 2009] berichtet, dass [EMEP 2003, B1020-14] von einer typischen Fehlergröße in Höhe von < 10 % ausgeht. [Dämmgen 2009] geht auf dieser Grundlage von 5% mit Normalverteilung aus. Allerdings sind die Unsicherheiten der jeweiligen Aktivitäten selbst noch hinzu zunehmen.

Damit ergeben sich nach [Dämmgen 2009] folgende Unsicherheiten: Für ungedüngte Kulturen (Leguminosenanbau und Ernterückstände) 25%, für Ausscheidung beim Weidegang 20%, für gedüngte Kulturen (Ausbringung von importierten Düngemitteln und Anwendung von Wirtschaftsdünger) 30% sowie Anwendung von Mineraldünger 10%.

3.5.2 Emissionsfaktoren der Landwirtschaft

Die maßgeblichen Schadstoffe der Landwirtschaft sind insbesondere NH_3 gefolgt von NO_x , NMVOC und Feinstaub.

Die **Unsicherheiten für die Emissionsfaktoren für NH_3** liegen nach [Dämmgen 2009] bei 30%. Ausnahmen bilden einerseits die Emittentengruppe „Ungedüngte Kulturen“ (Anbau von Leguminosen und Emissionen aus tierischen Ausscheidungen beim Weidegang) mit 10% sowie die Anwendung von Mineraldünger mit 50%. Eine weitere Besonderheit stellen die Pelztiere dar. Zur Bestimmung der Unsicherheiten deren NH_3 Emissionsfaktoren wurde auf [EEA 2009] zurückgegriffen, welches die Abweichung mit +100% und – 50% angibt. Der Beitrag der Pelztiere zur landwirtschaftlichen NH_3 -Emission ist allerdings vernachlässigbar.

Ähnlich wie bei den Aktivitätsraten sind tierartspezifische Unsicherheiten auf Tierarten übertragen worden für die keine Angaben zu Unsicherheiten vorlagen. Die folgende Tabelle gibt diesbezüglich einen Überblick auf Tierarten

Tabelle 8: Erweiterte Nutzung von Unsicherheiten für NH₃-EF anderer Tierarten

Tierart gemäß [Dämmgen 2009]	Emittentengruppe im nationalen Inventar laut [ZSE 2007]	Unsicherheiten
Milchkühe	Sonstige Rinder, Mastrinder (weiblich und männlich)	+/-30%
Schweine	Aufzuchtferkel	
Färsen	Kälber	
Hühner	Geflügel, Legehennen	
Kleinpferde, Ponys und Großpferde	Pferde	
Lämmer	Schafe, gesamt	

Für die Werte der **Unsicherheiten der Emissionsfaktoren von NO_x** wurden die Werte für die NO-Faktoren genutzt. Diese Unsicherheiten sind teilweise sehr erheblich und liegen bei [Dämmgen 2009] zwischen -99% und +1.000%²².

Für Milch- und Mutterkühe, Färsen, Zuchtbullen, Mastschweine, Eber, Ziegen und Lämmer sowie für Kleinpferde, Ponys und Großpferde gibt [Dämmgen 2009] die Unsicherheiten für die NO_x-EF mit +/- 50% an und bezieht sich dabei insbesondere auf [EMEP 2002, B1090-19]. Für die N-Ausscheidungen gilt zunächst generell eine Ungenauigkeit von < 10%. Für N₂O und NO stimmen jedoch laut [IPCC 2006] offenbar nur die Größenordnung der Emissionsfaktoren. Demnach ist für Milchkühe bei den N₂O-Emissionsfaktoren mit einer Unsicherheit von 30 % zu rechnen. Da sich die Emissionsfaktoren für NO- und N₂ aus den N₂O-Faktoren ableiten, was eine weitere Ungenauigkeit birgt, wird in [Dämmgen 2009] eine normalverteilte Unsicherheit von etwa 50% angenommen.

Für Junghennen, Masthenne, Gänse, Enten Puten und Büffel wird eine lognormal verteilte Unsicherheit von +100% und -99% angenommen. [Dämmgen 2009] beruft sich dabei auf [IPCC 2006]. Allerdings sind die Beiträge dieser beiden Gruppen von Tierarten zu den landwirtschaftlichen NO_x Emissionen vernachlässigbar.

Wesentlichere Beiträge leisten hingegen die nicht-tierischen Emissionsquellen. So werden die Unsicherheiten der NO_x-EF für die Emittentengruppe der ungedüngten Kulturen (Ernterückstände und Emissionen aus tierischen Ausscheidungen auf der Weide) mit -99% und +500% angegeben und für die Emittentengruppe der gedüngte Kulturen (Anwendung von Mineral- und Wirtschaftsdünger) gar mit -99% und +1.000% angegeben. [Dämmgen 2008] vermerkte diesbezüglich, dass eigene nationale Berechnungen für die N₂O-Emissionen aus Böden Unsicherheiten in Größenordnungen von einer Zehnerpotenz ergeben hätten wobei die Unsicherheiten für NO diese noch übersteigen. Die IPCC Guidelines 2006 [IPCC 2006; Seite 11.11] geben für N₂O aus landwirtschaftliche genutzten Böden jedoch durchgängig lediglich einen Faktor von drei an. Da keine Kausalitäten für die hohen national berechneten Unsicherheiten vorliegen, wird bis auf weiteres

²² Zur Nutzung dieser hohen relativen Unsicherheiten in PAREST vgl. den Abschnitt zur Operationalisierung der Lognormalverteilung Kapitel 2.5, Seite 17.

die Größenordnung des IPCC in den nationalen Inventaren genutzt auf die auch hier zurückgegriffen wird.

Die Erweiterte Nutzung von Unsicherheiten für andere Tierarten ist bei den NO_x-EF eher gering. Tabelle 9 gibt diesbezüglich einen Überblick

Tabelle 9: Erweiterte Nutzung von Unsicherheiten für NO_x-EF anderer Tierarten

Tierart gemäß [Dämmgen 2009]	Emittentengruppe im nationalen Inventar laut [ZSE 2007]	Unsicherheiten
Junghennen	Geflügel, Legehennen	+100% / -99%
Färsen	Kälber	+/-50%
Lämmer	Schafe, gesamt	
Mastschweine	Aufzuchtferkel, Sauen und Schweine, gesamt	
Milchkühe	Weibliche und männliche Mastrinder, sonstige Rinder.	

Allerdings sind die Beiträge dieser Tierarten zu den landwirtschaftlichen NO_x Emissionen vernachlässigbar. Lediglich die weiblichen Mastrinder leisten einen nennenswerten Beitrag.

Für die **Unsicherheiten der NMVOC- Emissionsfaktoren** wurde neben [Dämmgen 2009] umfangreich auf [EEA 2009] zurückgegriffen. Aus [Dämmgen 2009] konnten lediglich die Unsicherheiten der NMVOC-Emissionsfaktoren bei Schweinen (+/-50%) entnommen und auch auf die Tierarten Mastschweine, Eber und Sauen übertragen werden. Methodisch leitet [Dämmgen 2009] die NMVOC-Faktoren aus denen für NH₃ ab.

Eine Besonderheit stellt die Emittentengruppe „Gedüngte Kulturen“ (Produktion landwirtschaftlicher Nutzpflanzen) dar, deren Unsicherheiten von [Dämmgen 2009] mit -97 und +3000 % angegeben werden. Allerdings ist der Beitrag dieser Quelle zu den NMVOC Emissionen vernachlässigbar.

Die Unsicherheiten der NMVOC-EF weiterer landwirtschaftlicher Emissionsquellen liegen zwischen -90% und +188. Tabelle 10 gibt einen Überblick

Tabelle 10: Unsicherheiten der NMVOC EF für ausgewählte Tierarten

Tierarten gemäß [EEA 2009]	Emittentengruppe im nationalen Inventar laut [ZSE 2007]	Unsicherheiten
Other Cattle on Slurry & Solid	Kälber, weibl. u. männl. Mastrinder, Mutterkühe, Zuchtbullen, Büffel und sonstige Rinder	+188 / -82%
Turkeys and Other Poultry,	Geflügel, Enten, Gänse und Puten	+56% / -89%
Dairy Cattle on Slurry & Solid	Milchkühe	+/-72%
Broilers	Masthähnchen	+100% / -90%
Sheep	Schafe, Ziegen	+100% / -50%
Laying Hens	Jung- und Legehennen	
Quelle: [EEA 2009]		

Für die **Unsicherheiten der Emissionsfaktoren für Feinstaub (PM₁₀)** liegen bei [Dämmgen 2009] keine Angaben vor. Es wird daher auf [EEA 2009] zurückgegriffen. Die obere Abweichung ist dabei mit +13% bis +200% etwas höher als die untere Abweichung die bei -41% bis -78% liegt.

Die größten Unsicherheiten sind mit +200% und -78% bei Sauen zu finden gefolgt vom Geflügel, dessen Emissionsfaktoren mit +200% und -69% sehr ähnliche Unsicherheiten besitzt. Die geringsten Unsicherheiten weisen mit +194% und -41% für PM₁₀ die Emissionsfaktoren für Legehennen auf.

Da [EEA 2009] nicht für alle Tierarten und Haltungsformen welche in den nationalen Inventaren differenziert berichtet werden, wurden Übertragungen von ähnlichen Tierarten vorgenommen. Tabelle 11 gibt diesbezüglich einen Überblick:

Tabelle 11: Erweiterte Nutzung von Unsicherheiten für PM-EF anderer Tierarten

Tierarten gemäß [EEA 2009]	Emittentengruppe im nationalen Inventar laut [ZSE 2007]	Unsicherheiten	
		PM 2,5	PM 10
Other Cattle on Slurry	Kälber, männl. u. weibl. Mastrinder, Mutterkühe, sonstige Rinder, Zuchtbullen, Schafe, gesamt; Ziegen	+200% -69%	+200% -67%
Fattening Pigs on Slurry	Aufzuchtferkel, Eber-, Mastschweine, Schweine, gesamt	+200% -63%	+200% -66%

3.6 Schüttgutumschlag

Um die Unsicherheiten für diese Quellgruppe zu quantifizieren, wurde für den Schüttgutumschlag eine Expertenbefragung mit dem zuständigen Fachverantwortlichen im Umweltbundesamt durchgeführt [Kludt 2009]. Hintergrund der Befragung war ein laufendes Forschungsvorhaben im Umweltbundesamt, in welchem die Emissionsberechnungen der Schüttgutemissionen aktualisiert werden.

Für einzelne Jahre liegen für die Schüttgutmengen aufgrund zu hoher Unsicherheiten (>20%) keine amtlichen statistischen Daten vor. Dies hat fälschlicherweise zu einer signifikanten Senke bei den Emissionen geführt. Gleichwohl geht [Kludt 2009] für die Jahre in denen amtliche Statistiken vorliegen, von Unsicherheiten der Aktivitätsraten im Bereich Schüttgut von 3-5% aus. In den unberichteten Jahren ist jedoch von höheren Unsicherheiten auszugehen. Mögliche Ursachen für höhere Unsicherheiten können die Annahmen zur Anzahl der Umladevorgängen sein, welche von den Massenströmen und den Transporten der Schüttgüter über die statistisch solide Daten existieren, abweichen. Die Aktivitätsraten werden bisher aus verschiedenen Datenquellen (Produktion, Verladung, Transport) mit teilweise undokumentierten Methoden und teilweise erheblichen Unsicherheiten anteilig berechnet. Jedoch liegen keine spezifischen Kenntnisse vor. Daher werden die Unsicherheiten der Aktivitätsraten für alle Schüttgüter pauschal mit +100% und -50% abgeschätzt. Diese Schätzung steht allerdings unter dem Vorbehalt der neuen Erkenntnisse aus laufenden Forschungsprojekten.

Die Unsicherheiten der Emissionsfaktoren von Feinstaub schätzt [Kludt 2009] analog zu den Aktivitätsraten pauschal für alle Schüttgüter mit +100 und -50% ab. Ursächlich für die Unsicherheiten bei den Emissionsfaktoren sind vor allem Mehrfachnutzungen von Emissionsfaktoren. So werden für bestimmte Schüttgüter und Umschlagprozesse Faktoren ermittelt, die dann auf andere mehr oder weniger ähnliche Schüttgüter und Umschlagprozesse übertragen werden, und entsprechende Abweichungen generieren.

3.7 Sonstige Quellgruppen

3.7.1 Übernahme von Unsicherheitsdaten aus dem ZSE

Für eine Reihe von Aktivitätsfaktoren, Emissionsfaktoren und Emissionsdaten sind in [ZSE 2007] Unsicherheitsdaten enthalten. Die Quellen dieser Einschätzungen der Unsicherheiten sind nicht immer explizit in [ZSE 2007] dokumentiert, dürften aber im Wesentlichen aus einschlägigen sektoralen Forschungsvorhaben stammen, die auch für die Generierung der berichteten Daten selbst herangezogen (und in [ZSE 2007] dokumentiert) sind. Diese umfassen einen absoluten oberen und unteren Wert (d.h. nicht als Prozent, sondern in der Einheit des berichteten Wertes) sowie ggf. eine Angabe zur Verteilung. Zur Nutzung dieser Daten in PAREST wurde wie folgt vorgegangen:

1. Wenn im ZSE eine Dreiecksverteilung angegeben war, wurden die angegebenen oberen und unteren Schranken als 100%-Perzentil bzw. 0%-Perzentil der Verteilung interpretiert. Die Grenzen der 95%-Konfidenzintervalls können daraus linear berechnet werden.
2. Die Wahl der Verteilung für die Monte-Carlo-Simulation in PAREST richtet sich ansonsten nach dem Grad der Asymmetrie der sich aus [ZSE 2007] ergebenden relativen Abweichungen nach oben und unten, aber nicht unbedingt nach der in [ZSE 2007] angegebenen Verteilung²³:
3. Bei einer oberen Abweichung über 90% in [ZSE 2007] wird eine Lognormalverteilung angenommen. Die genauen Parameter für die Monte-Carlo-Simulation werden wie in Kapitel 2.5 beschrieben berechnet.
4. Wenn der Betrag der Summe von oberer und unterer relativer Abweichung aus [ZSE 2007] kleiner als 10% ist, wird eine Normalverteilung angenommen. Als symmetrische Schranke für die Monte-Carlo-Simulation wird der Mittelwert der Beträge der relativen Abweichungen aus [ZSE 2007] benutzt.
5. Falls das Verhältnis des Betrags der Summe von oberer und unterer relativer Abweichung aus [ZSE 2007] größer als 10% ist und gleichzeitig das Verhältnis dieses Betrags zur oberen relativen Abweichung aus [ZSE 2007] kleiner als 25% ist, wird für PAREST ebenfalls eine Normalverteilung angenommen, die symmetrische Schranke für die Monte-Carlo-Simulation wird wie unter Nr. 4 oben durch Mittelung gebildet.
6. Für die verbleibenden Fälle wird eine Lognormalverteilung bzw. eine inverse Lognormalverteilung angenommen, je nachdem ob die obere (lognormal) oder untere (invers lognormal) Schranke aus [ZSE 2007] weiter vom Mittelwert entfernt liegt. Die Parameter für die Monte-Carlo-Simulation werden nach dem in Kapitel 2.5 beschriebenen Algorithmus berechnet.

3.7.2 Aktivitätsraten sonstiger Quellgruppen

Für einige Quellgruppen konnten keine Angaben zur Quantifizierung der Unsicherheiten gefunden werden. Grundsätzlich erfolgte die Quantifizierung in Form einer abgestuften Vorgehensweise die sich an folgenden Prioritäten orientierte (vgl. Kapitel 3, Seite 27):

²³ Einige Angaben in [ZSE 2007] zur Verteilung sind offensichtlich unplausibel, so z.B. eine Normalverteilung (per Definition symmetrisch!) mit Schranken von +43% und -21%.

1. Im ZSE bereits hinterlegte Unsicherheiten
2. Unsicherheiten aus aktuellen Studien z.B. IFEU 2009, Dämmgen 2009
3. Abschätzungen (Expert Judgement) durch die Fachverantwortlichen im UBA
4. Vom IPCC vorgeschlagene Unsicherheiten
5. Default Unsicherheiten

Die Ableitung von Default Unsicherheiten für die Aktivitätsraten erfolgte in Anlehnung an das EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook [CORINAIR 2007]. Demzufolge werden je nach Herkunft und Struktur der Daten unterschiedliche Größenordnungen der Unsicherheiten angegeben. So werden für Daten aus amtlichen nationalen Statistiken relativ kleine und für Daten aus vielen unterschiedlichen Stellen relativ große Unsicherheiten angenommen. Gleichzeitig lassen sich für bestimmte Brennstoffe unterschiedliche Unsicherheiten annehmen. So besitzen steuerbelegte Brennstoffe relativ geringe Unsicherheiten und feste Brennstoffe mit geringen Heizwerten besitzen höhere Unsicherheiten als gasförmige Brennstoffe mit hoher Energiedichte. Schließlich lassen sich auch für bestimmte Aktivitäten unterschiedliche Unsicherheiten plausibel annehmen. So besitzen Produktionsdaten geringere Unsicherheiten als Aktivitätsdaten im Bereich Verteilung, Transport und Logistik. Gemäß dieser Vorgehensweise wurden Werte für Default Unsicherheiten entwickelt. Tabelle 12 gibt diesbezüglich einen Überblick.

Tabelle 12: Default-Unsicherheiten für Aktivitätsraten nach Datenherkunft, Brennstoff und Aktivität

Brennstoff/Aktivität	Datenherkunft				
	A	B	C	D	E
Heizöl	5%	8%	10%	12%	15%
Sonstige Flüssigkeiten	8%	10%	12%	15%	18%
Erdgas	5%	8%	10%	12%	15%
Sonstige Gase	8%	10%	12%	15%	18%
Steinkohle	5%	8%	10%	12%	15%
Braunkohle	8%	10%	12%	15%	18%
Sonstige Kohlen	10%	12%	15%	18%	20%
Sonstige Brennstoffe	12%	15%	18%	20%	25%
Produktion	5%				
Verteilung, Transport, Logistik					25%
Anwendung					20%
sonstige Aktivitäten					25%
Für die Kategorisierung der Datenherkunft wurden folgende Annahmen getroffen:					
A Amtliche Statistik					
B Amtliche Statistik, viele Einzeldaten					
C Daten basieren auf dezentral erhobene Betreiberdaten					
D Betreiberdaten mit vielen Einzeldaten					
E Gemischte Datenbasen mit vielen Datenquellen und pauschalen Abschätzungen					
Quelle: nach [CORINAIR 2007]					

Für Brennstoffverbräuche zur Energiegewinnung mussten diese Default-Daten in PAREST allerdings nicht benutzt werden, da dort bessere Datenquellen vorlagen (vgl. Kapitel 3.1).

Für die Bevölkerungszahl als Aktivitätsrate der Emissionsmodellierung gemäß [ZSE 2007] für Feinstaub aus Kleingewerbe, Feuerwerk, Grillen und Zigarettenrauch wurde in PAREST eine Unsicherheit von 0,25% geschätzt²⁴.

3.7.3 Emissionsfaktoren für sonstige Quellgruppen

Ähnlich wie bei den Aktivitätsraten lagen auch für einige Emissionsfaktoren keine spezifischen Daten zu ihren Unsicherheiten vor, so dass Default-Unsicherheiten genutzt werden mussten. Größtenteils wurde dabei auf Default Unsicherheiten aus [EEA 2009] zurückgegriffen. Für einige wenige, gänzlich neue Emissionsquellen wurden IZT eigene Schätzungen genutzt.

Für die **Unsicherheiten der SO₂-Emissionsfaktoren**, wurden vor allem für Industrieprozesse Default Unsicherheiten angewandt. Die folgende Tabelle gibt diesbezüglich einen Überblick:

Tabelle 13: Default Unsicherheiten für SO₂ Emissionsfaktoren

Quellgruppe	Datenquelle	Default-Unsicherheit
Produktion diverser Glasprodukte, Kalk, Grobkeramik, Bitumen, Zementklinker	[EEA 2009]: Nickel Production	+122% -50%
Produktion von H ₂ SO ₄ , Ruß und TiO ₂	[EEA 2009]: Production Pulp and paper	+100% -98%
Einsatz von Erdgas, Erdölgas bei der Verarbeitung von Gas	CORINAIR Guidebook 2009 Refinery Gas in Petroleum Refining	+30% -43%

Für die **Unsicherheiten der NO_x-Emissionsfaktoren** wurden ebenfalls überwiegend für Industrieprozesse Default Unsicherheiten angewandt. Die folgende Tabelle gibt diesbezüglich einen Überblick:

Tabelle 14: Default Unsicherheiten für NO_x-Emissionsfaktoren

Quellgruppe	Datenquelle	Default-Unsicherheit
Produktion diverser Glasprodukte, Kalk, Grobkeramik, Bitumen, Zementklinker	[EEA 2009]: Aluminium Production	+100% -50%
Einsatz von Ottokraftstoffen in mobilen Haushaltsgeräten	[EEA 2009]: Household and Gardening Vehicles	+50% -50%

Für die **Unsicherheiten der NMVOC-Emissionsfaktoren** wurden außer für Industrieprozesse auch für verschiedene mobile Emissionsquellen Default Unsicherheiten angewandt. Die folgende Tabelle gibt diesbezüglich einen Überblick:

²⁴ Auch wenn man dieses eher niedrige Schätzung der Unsicherheit der Bevölkerungszahl durch eine höhere ersetzen würde, hätte dies nur einen marginalen Einfluss auf die Unsicherheiten der Emissionen der genannten Quellgruppen, da es sich um sehr „primitive“ Emissionsmodelle handelt, bei denen die Emissionsfaktoren mit Unsicherheiten >>+100% bewertet werden.

Tabelle 15: Default Unsicherheiten für NMVOC-Emissionsfaktoren

Quellgruppe	Datenquelle	Default-Unsicherheit
Produktion diverser Glasprodukte, Zementklinker, Dolomitkalk	[EEA 2009]: Iron and Steel Production	+193% -63%
Einsatz diverser Kohlen im Schienenverkehr	[EEA 2009]: Combustion in energy and transformation industries	+92% -63%
Einsatz von Ottokraftstoffen in mobilen Haushaltsgeräten	[EEA 2009]: Household and Gardening Vehicles	+50% -50%

Für die **Unsicherheiten der NH₃-Emissionsfaktoren** wurden Default Unsicherheiten nur für verschiedene mobile Emissionsquellen angewandt. Die folgende Tabelle gibt diesbezüglich einen Überblick:

Tabelle 16: Default Unsicherheiten für NH₃-Emissionsfaktoren

Quellgruppe	Datenquelle	Default-Unsicherheit
Einsatz von Ottokraftstoffen in mobilen Haushaltsgeräten	[EEA 2009]: Household and Gardening Vehicles	+50% -50%
Einsatz von Flüssigtreibstoffen im zivilen Luftverkehr sowie in Offroad-Verkehren der Land-, Forst und Bauwirtschaft sowie dem Militär	[EEA 2009]: Industry Vehicles (Construction Equipment)	+50% -50%

Für die **Unsicherheiten der Feinstaub (PM₁₀)-Emissionsfaktoren** wurden Default Unsicherheiten überwiegend für den übrigen Umwandlungsbereich und den zivilen Luftverkehr angewandt. Die folgende Tabelle gibt diesbezüglich einen Überblick:

Tabelle 17: Default Unsicherheiten für PM₁₀-Emissionsfaktoren

Quellgruppe	Datenquelle	Default-Unsicherheit
Wärmeerzeugung im übrigen Umwandlungsbereich	IZT Schätzung	+50% -50%
Einsatz von Flugtreibstoff im zivilen Luftverkehr	[EEA 2009]: Aviation (domestic, LTO), gemäß Datenquelle wie Road Transport HDV Exhaust	67% -42%
Feuerwerk, Grillen Zigaretten	IZT Schätzung	+200% -79%

3.8 Splitfaktoren zur Berechnung von $PM_{2,5}$ aus PM_{10}

Wie in Kapitel 2.6 bereits angesprochen wurden im Rahmen der Monte-Carlo-Simulation in PAREST die $PM_{2,5}$ -Emissionen generell in allen Quellgruppen über Splitfaktoren aus den PM_{10} -Emissionen berechnet. Diese Splitfaktoren ihrerseits werden als unsicherheitsbehaftete Inputvariablen aufgefasst, als Mittelwert wird jeweils der deterministische Splitfaktor des PAREST-Referenzszenarios übernommen. Für die Generierung der weiteren Parameter der einzubindenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen wurde auf den in Kapitel 3.1 erläuterten Algorithmus für allgemeine Splitfaktoren zurückgegriffen, vgl. auch Tabelle 3 auf Seite 31.

Zusätzlich wurde eine Reihe von Korrelationen berücksichtigt:

1. Stationäre Feuerung: identische (100% korrelierte) Splitfaktoren bei korrelierten Emissionsfaktoren (vgl. Kapitel 3.2, Seite 34)
2. Schüttgutumschlag (vgl. Kapitel 3.6): identische (100% korrelierte) Splitfaktoren für ein und dasselbe Schüttgut bei verschiedenen Transportmitteln²⁵
3. Wiederaufwirbelung von Straßenstaub (vgl. Kapitel 3.3.3): identische (100% korrelierte) Splitfaktoren für alle Fahrzeugkategorien²⁶.

Für die Auspuffemissionen des Straßenverkehr erübrigt sich eine Definition von Korrelationen, da der in der PAREST-Referenz benutzte Splitfaktor von 100% ($EM_{PM_{2,5}} = EM_{PM_{10}}$) ohnehin als konstanter Faktor beibehalten wird und nicht durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung ersetzt wird.

²⁵ Die Emissionsfaktoren PM_{10} sind z.T. je nach Transportmittel unterschiedlich. Für die Korrelation der Splitfaktoren wird angenommen, dass die Korngrößenverteilung eine Funktion des Schüttguts und unabhängig vom Transportmittel ist.

²⁶ Es wird also in erster Näherung angenommen, dass die Korngrößenverteilung des wieder aufgewirbelten Straßenstaubs unabhängig vom verursachenden Fahrzeug ist.

4 Ergebnisse der Unsicherheitsrechnungen

In diesem Kapitel werden für jedes der betrachteten Schadstoffinventare die aus der Monte-Carlo-Simulation gewonnenen Ergebnisse der Unsicherheitsrechnungen vorgestellt: Dazu werden in dem in PAREST benutzten Aggregationsniveau der SNAP²⁷-Systematik die für die Emissionen berechneten Unsicherheiten vorgestellt. Die Quantifizierungen beziehen sich weiterhin auf den Abstand der oberen bzw. unteren Grenze des 95%-Konfidenzintervalls zum berichteten Wert (Mittelwert), in diesem Falle nicht der Inputvariablen (wie in Kapitel 3 behandelt) sondern der Outputvariablen des Emissionsmodells, der aggregierten Emissionen.

Die Unsicherheiten der Ergebnisse werden sowohl relativ angegeben (d.h. +x%/ -y%) als auch absolut (d.h. +x/-y Tonnen Schadstoff). Bei den absoluten Unsicherheiten ist zu beachten, dass die verschiedenen Zeilen (SNAP Codes) der Tabellen **nicht addierbar** sind um z.B. die absolute Unsicherheit der gesamten nationalen Emission des betreffenden Schadstoffs zu berechnen. Die absolute Unsicherheit der Summe von Emissionen ist (außer bei 100%-iger Korrelation der Summanden) immer kleiner als die Summe der absoluten Unsicherheiten (vgl. auch Gleichung 4, Seite 19).

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%.

In diesem Sinne werden für jeden Schadstoff die absolut bedeutendsten Quellgruppen identifiziert. Eine vollständige Analyse der Hauptquellgruppen²⁸ gemäß der Inventar-Richtlinien des IPCC (vgl. [IPCC 2000], [IPCC 2006]) würde auf einem ähnlichen Vorgehen beruhen, wäre aber noch umfangreicher und war in PAREST nicht vorgesehen.

²⁷ SNAP: Selected Nomenclature for Air Pollution, im Rahmen von Modellierungen gebräuchliches Kodierungssystem für emissionsverursachende technische Prozesse und Verfahren

²⁸ In [IPCC 2000] wird der Begriff „key source category“ (Hauptquellgruppe) benutzt, in [IPCC 2006] ist dagegen von „key category“ die Rede, weil im Zusammenhang der Treibhausgase Quellen und Senken parallel behandelt werden.

4.1 Unsicherheit der PM₁₀-Emissionen 2005

Tabelle 18 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Emissionen an PM₁₀. Die Unsicherheit der deutschlandweiten Summe der Emissionen für 2005 liegt bei +23%/-16%. Die herausragenden Einzelbeiträge zur Gesamtunsicherheit stammen aus den Emissionsschätzungen für Baugewerbe, Kleingewerbe (Tischlereien) und Wiederaufwirbelung im Straßenverkehr. Weitere bedeutende Quellen der Unsicherheit sind die Datenbasen- und Modelle für Schweinemast, Feuerwerk & Zigarettenrauch, mobile Maschinen in Land- und Bauwirtschaft, Eisen- und Stahl-Industrie, Spanplattenindustrie sowie Holzfeuerungen.

Tabelle 18: Unsicherheiten der PM₁₀-Emissionen 2005

PM₁₀ - Emissionen in Deutschland						
Unsicherheiten im PAREST - Referenzszenario						
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip						
Quellgruppe / SNAP	95%-Konfidenzintervall in %		berichtete Emissionen 2005 in Gg	95%-Konfidenzintervall in Gg		Quellgruppen mit den höchsten Beiträgen zur Unsicherheit
	2,5%-Quantil	97,5%-Quantil		2,5%-Quantil	97,5%-Quantil	
01 Combustion in energy and transformation industry	-25%	25%	11	-3	3	
02 Non-industrial combustion plants	-24%	27%	29	-7	8	Brennholz
03 Combustion in manufacturing industry	-32%	49%	20	-6	10	Eisen- & Stahl
04 Production processes	-39%	101%	52	-20	53	Bau & Gewerbe (Tischlereien)
05 Extraction and distr. of fossil fuels	-56%	104%	4	-2	5	
06 Solvent and other product use	-68%	146%	9	-6	13	Feuerwerk & Zigarettenrauch
07 Road transport	-29%	28%	90	-26	25	Wiederaufwirbelung
08 Other mobil sources and machinery	-45%	53%	21	-10	11	mobile Maschinen in Land- & Bauwirtschaft
09 Waste treatment and disposal	-39%	45%	0	0	0	
10 Agriculture	-34%	58%	26	-9	15	Mastschweine
11 Other sources and sinks			-			
Summe	-16%	23%	262	-41	60	
07_1 Road transport gasoline			-			
07_2 Road transport diesel	-20%	25%	21	-4	5	
07_3 Road transport LPG			-			
07_4 Road transport non-ehhaust (volatilisation)			-			
07_5 Road transport non-ehhaust (tire, break & road wear)	-20%	21%	20	-4	4	
07_6 Road transport non-ehhaust (resuspension)	-51%	51%	49	-25	25	Wiederaufwirbelung
04_01 Production processes, high altitude	-33%	72%	19	-6	13	Spanplatten + Eisen & Stahl
04_02 Production processes, low altitude	-52%	148%	34	-17	50	Bau & Gewerbe (Tischlereien)

4.2 Unsicherheit der PM_{2,5}-Emissionen 2005

Tabelle 19 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Emissionen an PM_{2,5}. Die Unsicherheit der deutschlandweiten Summe der Emissionen für 2005 liegt bei +19%/-15% und damit unterhalb der Unsicherheit der PM₁₀-Emissionen. Es gibt im Vergleich zu PM₁₀ keine einzeln herausragenden Quellgruppen. Bedeutende Einzelbeiträge zur Gesamtunsicherheit stammen aus den Emissionsschätzungen für Kleingewerbe (Tischlereien) Feuerwerk & Zigarettenrauch, mobile Maschinen in Land- und Bauwirtschaft und Wiederaufwirbelung im Straßenverkehr. Einige für PM₁₀ noch stärker im Fokus stehende Quellgruppen wie Bauwirtschaft und Schweinemast erscheinen also für die Unsicherheit der PM_{2,5}-Emissionen weniger bedeutend.

Tabelle 19: Unsicherheiten der PM_{2,5}-Emissionen 2005

PM_{2,5} - Emissionen in Deutschland						
Unsicherheiten im PAREST - Referenzszenario						
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip						
Quellgruppe / SNAP	95%-Konfidenzintervall in %		berichtete Emissionen 2005 in Gg	95%-Konfidenzintervall in Gg		Quellgruppen mit den höchsten Beiträgen zur Unsicherheit
	2,5%-Quantil	97,5%-Quantil		2,5%-Quantil	97,5%-Quantil	
01 Combustion in energy and transformation industry	-26%	27%	10	-3	3	
02 Non-industrial combustion plants	-30%	29%	27	-8	8	
03 Combustion in manufacturing industry	-35%	63%	9	-3	6	
04 Production processes	-39%	95%	16	-6	16	Kleingewerbe (Tischlereien)
05 Extraction and distr. of fossil fuels	-61%	129%	1	-1	1	
06 Solvent and other product use	-68%	146%	9	-6	13	Feuerwerk & Zigarettenrauch
07 Road transport	-18%	27%	37	-7	10	Wiederaufwirbelung
08 Other mobil sources and machinery	-45%	53%	21	-10	11	mobile Maschinen in Land- & Bauwirtschaft
09 Waste treatment and disposal	-43%	50%	0	0	0	
10 Agriculture	-40%	67%	6	-2	4	
11 Other sources and sinks			-			
Summe	-15%	19%	136	-20	26	
07_1 Road transport gasoline			-			
07_2 Road transport diesel	-20%	25%	21	-4	5	
07_3 Road transport LPG			-			
07_4 Road transport non-ehhaust (volatilisation)			-			
07_5 Road transport non-ehhaust (tire, break & road wear)	-23%	25%	11	-2	3	
07_6 Road transport non-ehhaust (resuspension)	-73%	178%	5	-4	9	Wiederaufwirbelung
04_01 Production processes, high altitude	-39%	78%	9	-3	7	
04_02 Production processes, low altitude	-58%	171%	7	-4	13	Kleingewerbe (Tischlereien)

4.3 Unsicherheit der SO₂-Emissionen 2005

Tabelle 20 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Emissionen an SO₂. Die Unsicherheit der deutschlandweiten Summe der Emissionen für 2005 liegt bei nur +/-9%. Die herausragenden Einzelbeiträge zur Gesamtunsicherheit stammen aus den Emissionsschätzungen für Kohlekraftwerke, Heizöl-Kessel sowie einige Industriebranchen wie Erdölverarbeitung, Zellstoffindustrie und Schwefelsäureproduktion.

Tabelle 20: Unsicherheiten der SO₂ -Emissionen 2005

SO₂ - Emissionen in Deutschland						
Unsicherheiten im PAREST - Referenzszenario						
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip						
Quellgruppe / SNAP	95%-Konfidenzintervall in %		berichtete Emissionen 2005 in Gg	95%-Konfidenzintervall in Gg		Quellgruppen mit den höchsten Beiträgen zur Unsicherheit
	2,5%-Quantil	97,5%-Quantil		2,5%-Quantil	97,5%-Quantil	
01 Combustion in energy and transformation industry	-12%	12%	290	-34	35	Kohlekraftwerke
02 Non-industrial combustion plants	-30%	31%	78	-24	24	Heizöl EL-Kessel
03 Combustion in manufacturing industry	-14%	22%	65	-9	14	
04 Production processes	-21%	24%	118	-24	28	Ölverarbeitung, Zellstoff, Schwefelsäure
05 Extraction and distr. of fossil fuels	-43%	40%	8	-3	3	
06 Solvent and other product use			-			
07 Road transport	-18%	20%	1	0	0	
08 Other mobil sources and machinery	-39%	45%	3	-1	1	
09 Waste treatment and disposal	-94%	512%	0	0	0	
10 Agriculture			-			
11 Other sources and sinks			-			
Summe	-9%	9%	562	-49	53	
07_1 Road transport gasoline	-30%	33%	0	0	0	
07_2 Road transport diesel	-21%	22%	0	0	0	
07_3 Road transport LPG			-			
07_4 Road transport non-exhaust (volatilisation)			-			
07_5 Road transport non-exhaust (tire, break & road wear)			-			
07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)			-			
04_01 Production processes, high altitude	-21%	24%	118	-24	28	Ölverarbeitung, Zellstoff, Schwefelsäure
04_02 Production processes, low altitude			-			

4.4 Unsicherheit der NO_x-Emissionen 2005

Tabelle 21 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Emissionen an NO_x. Die Unsicherheit der deutschlandweiten Summe der Emissionen für 2005 liegt bei +23%/-10%, ist also deutlich schlechter als SO₂ und liegt etwa in der Größenordnung der Unsicherheit der PM₁₀-Emissionen. Die alles überragende Quelle der Unsicherheit im NO_x-Inventar ist die Schätzung der NO-Emissionen aus der Anwendung von Düngemitteln in der Landwirtschaft. Mit deutlichem Abstand sind noch Unsicherheiten der NO_x-Berechnung aus Straßenverkehr und mobilen Maschinen von Bedeutung.

Tabelle 21: Unsicherheiten der NO_x-Emissionen 2005

NO_x - Emissionen in Deutschland						
Unsicherheiten im PAREST - Referenzszenario						
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip						
Quellgruppe / SNAP	95%-Konfidenzintervall in %		berichtete Emissionen 2005 in Gg	95%-Konfidenzintervall in Gg		Quellgruppen mit den höchsten Beiträgen zur Unsicherheit
	2,5%-Quantil	97,5%-Quantil		2,5%-Quantil	97,5%-Quantil	
01 Combustion in energy and transformation industry	-9%	13%	283	-25	37	
02 Non-industrial combustion plants	-20%	19%	102	-20	19	
03 Combustion in manufacturing industry	-15%	35%	71	-10	25	
04 Production processes	-21%	29%	91	-19	26	
05 Extraction and distr. of fossil fuels			-			
06 Solvent and other product use			-			
07 Road transport	-10%	10%	684	-67	68	schwere Nutzfahrzeuge & PKW
08 Other mobil sources and machinery	-26%	27%	233	-61	64	mobile Maschinen in Land- & Bauwirtschaft
09 Waste treatment and disposal	-100%	601%	0	0	1	
10 Agriculture	-93%	420%	81	-75	339	Düngemittel
11 Other sources and sinks			-			
Summe	-10%	23%	1.544	-152	359	
07_1 Road transport gasoline	-31%	34%	112	-35	38	
07_2 Road transport diesel	-10%	10%	571	-57	57	
07_3 Road transport LPG			-			
07_4 Road transport non-ehhaust (volatilisation)			-			
07_5 Road transport non-ehhaust (tire, break & road wear)			-			
07_6 Road transport non-ehhaust (resuspension)			-			
04_01 Production processes, high altitude	-21%	29%	91	-19	26	
04_02 Production processes, low altitude			-			

4.5 Unsicherheit der NH₃-Emissionen 2005

Tabelle 22 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Emissionen an NH₃. Die Unsicherheit der deutschlandweiten Summe der Emissionen für 2005 liegt bei +/-13%, und wird dominiert von der Unsicherheit der bei weitem größten Quellgruppe, der Landwirtschaft (Tierhaltung und Bodenbewirtschaftung). Mit deutlichem Abstand sind noch Unsicherheiten der NH₃-Emissionen aus Benzinmotoren und Düngemittelproduktion von Bedeutung.

Tabelle 22: Unsicherheiten der NH₃-Emissionen 2005

NH₃ - Emissionen in Deutschland						
Unsicherheiten im PAREST - Referenzszenario						
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip						
Quellgruppe / SNAP	95%-Konfidenzintervall in %		berichtete Emissionen 2005 in Gg	95%-Konfidenzintervall in Gg		Quellgruppen mit den höchsten Beiträgen zur Unsicherheit
	2,5%-Quantil	97,5%-Quantil		2,5%-Quantil	97,5%-Quantil	
01 Combustion in energy and transformation industry	-14%	13%	3	0	0	
02 Non-industrial combustion plants	-39%	30%	3	-1	1	
03 Combustion in manufacturing industry	-27%	46%	1	0	1	
04 Production processes	-57%	114%	10	-6	11	Düngemittelproduktin
05 Extraction and distr. of fossil fuels			-			
06 Solvent and other product use	-52%	57%	2	-1	1	
07 Road transport	-75%	200%	11	-8	21	Otto-PKW
08 Other mobil sources and machinery	-30%	36%	1	0	0	
09 Waste treatment and disposal			-			
10 Agriculture	-13%	14%	577	-77	79	Tierhaltung & Böden
11 Other sources and sinks			-			
Summe	-13%	13%	607	-78	82	
07_1 Road transport gasoline	-79%	211%	10	-8	21	Otto-PKW
07_2 Road transport diesel	-12%	14%	1	0	0	
07_3 Road transport LPG			-			
07_4 Road transport non-ehhaust (volatilisation)			-			
07_5 Road transport non-ehhaust (tire, break & road wear)			-			
07_6 Road transport non-ehhaust (resuspension)			-			
04_01 Production processes, high altitude	-57%	114%	10	-6	11	
04_02 Production processes, low altitude			-			

4.6 Unsicherheit der NMVOC-Emissionen 2005

Tabelle 23 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation für die Emissionen an NMVOC. Die Unsicherheit der deutschlandweiten Summe der Emissionen für 2005 liegt bei +12%/-10%, ist also fast so gut wie bei SO₂. Die bedeutendsten Quellen der Unsicherheit im NMVOC-Inventar stellen die Quellgruppen Lösemittelverwendung sowie Verwendung von Wirtschaftsdünger in der Landwirtschaft dar. Nicht zu vernachlässigen sind weiterhin die Unsicherheiten der NMVOC-Berechnung aus Holzfeuerungen sowie aus dem Straßenverkehr (Benzin-PKW und Mopeds).

Tabelle 23: Unsicherheiten der NMVOC-Emissionen 2005

NMVOC - Emissionen in Deutschland						
Unsicherheiten im PAREST - Referenzszenario						
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip						
Quellgruppe / SNAP	95%-Konfidenzintervall in %		berichtete Emissionen 2005 in Gg	95%-Konfidenzintervall in Gg		Quellgruppen mit den höchsten Beiträgen zur Unsicherheit
	2,5%-Quantil	97,5%-Quantil		2,5%-Quantil	97,5%-Quantil	
01 Combustion in energy and transformation industry	-25%	26%	8	-2	2	
02 Non-industrial combustion plants	-76%	50%	85	-65	42	Brennholz
03 Combustion in manufacturing industry	-21%	37%	4	-1	1	
04 Production processes	-25%	28%	86	-22	24	
05 Extraction and distr. of fossil fuels	-76%	76%	25	-19	19	
06 Solvent and other product use	-12%	15%	743	-90	111	Lösemittel
07 Road transport	-23%	26%	153	-35	40	Otto-PKW & Mopeds
08 Other mobil sources and machinery	-23%	26%	78	-18	20	
09 Waste treatment and disposal			-			
10 Agriculture	-33%	39%	255	-85	100	Wirtschaftsdünger
11 Other sources and sinks			-			
Summe	-10%	12%	1.438	-150	166	
07_1 Road transport gasoline	-36%	41%	92	-33	38	Otto-PKW & Mopeds
07_2 Road transport diesel	-15%	16%	38	-6	6	
07_3 Road transport LPG			-			
07_4 Road transport non-exhaust (volatilisation)	-41%	61%	23	-10	14	
07_5 Road transport non-exhaust (tire, break & road wear)			-			
07_6 Road transport non-exhaust (resuspension)			-			
04_01 Production processes, high altitude	-25%	28%	86	-22	24	
04_02 Production processes, low altitude			-			

5 Generierung von Sensitivitätsszenarien für die Immissionsmodellierung in PAREST

Um auf Basis der Unsicherheitsanalyse des Emissionsinventars auch Sensitivitätsszenarien für die Immissionsmodellierung in PAREST rechnen zu können, wurden die in Kapitel 4 vorgestellten Ergebnisse für 2005 in zwei Richtungen weiterentwickelt:

1. Generierung von Datensätzen in der ZSE-Struktur für die obere und untere Schranke des Konfidenzintervalls (Kapitel 5.1) sowie
2. Ableitung von Zeitreihen bis 2020 (Kapitel 5.2).

In Kapitel 5.3 werden schließlich Rahmendaten der so erzeugten Zeitreihen an Emissionsszenarien dokumentiert, die in PAREST als Sensitivitätsszenarien für die Immissionsmodellierung (vgl. [Stern 2010 c]) benutzt wurden.

5.1 Datensätze für die Immissionsmodellierung

Der grundlegende Ansatz, die Ergebnisse der Unsicherheitenberechnung des Emissionsinventars in der PAREST-Modell-Kette für die Immissionsmodellierung zu nutzen, ist es, zwei Datensätze für die obere bzw. die untere Schranke des 95%-Konfidenzintervalls der Emissionen zu generieren (Szenario „obere Schranke“ bzw. Szenario „untere Schranke“).

Diese Datensätze mussten in der ZSE-Struktur erzeugt werden, da diese das Inputformat der räumlichen Verteilung der deutschen Emissionen darstellt (vgl. [Thiruchittampalam et al. 2010]), die der eigentlichen Immissionsmodellierung (vgl. [Stern 2010 a]) vorgeschaltet ist.

Aus der Monte-Carlo-Simulation liegen zwar schon Ergebnisse für die Unsicherheiten der Emissionen (d.h. 2,5%-Quantil und 97,5%-Quantil) auf Niveau der ZSE Struktur vor. Diese sind aber nicht unmittelbar zur Einspeisung in die deterministischen Modelle der räumlichen Emissionsverteilung und Immissionsmodellierung geeignet, weil die berechneten Konfidenzintervalle nicht gleichzeitig gelten, die einzelnen oberen bzw. unteren Grenzen also nicht über die vielen Hundert Zeilen der ZSE-Struktur addierbar sind. So beträgt z.B. die Summe der oberen Abweichungen der PM_{10} -Emissionen auf ZSE-Struktur 304 Gg, während die obere Abweichung des aufaddierten PM_{10} -Inventars nur 60 Gg beträgt.

Um vor diesem Hintergrund einen Datensatz in ZSE-Struktur zu generieren, der bestmöglich die Unsicherheit des Gesamtinventars abbildet, wurden die oberen und unteren Abweichungen auf ZSE-Niveau jeweils linear so gestaucht, dass die Summe der gestauchten oberen bzw. unteren Abweichungen der oberen bzw. unteren Abweichungen des aufaddierten Inventars entspricht. Im Beispiel vom PM_{10} wurden also alle oberen Abweichungen auf ZSE-Niveau mit dem Faktor $60\text{ Gg}/304\text{ Gg}$ multipliziert.

Dieses Verfahren wurde für alle Schadstoffe und für die obere und untere Abweichung getrennt durchgeführt. Innerhalb eines Schadstoffes wird so eine Summe von Emissionen abgebildet, die der jeweiligen Schranke des Konfidenzintervalls genau entspricht. In der gleichzeitigen Betrachtung aller Schadstoffe ist allerdings zu beachten, dass die verschiedenen Schadstoffe nur partiell über gemeinsame Aktivitätsraten korrelieren. Deshalb stellt das gewählte Vorgehen systematisch eine Überschätzung der Abweichung eines deterministischen Multi-Schadstoff-Emissionsszenarios „obere Schranke“ bzw. „untere Schranke“ vom Referenzszenario dar, die

aber mangels einer eingeführten und für PAREST anwendbaren Methode für „Feinstaub-Äquivalente“ in Analogie zu den Treibhausgas-Äquivalenten (vgl. [IPCC 1995]) in Kauf genommen wird.

5.2 Unsicherheiten der Prognosejahre 2010 - 2020

Um in der Immissionsmodellierung auch die Effekte einer systematischen Überschätzung bzw. Unterschätzung der Emissionen in der Zeitabfolge der Emissionsinventare abbilden zu können, wurden neben den Datensätzen für das Basisjahr 2005 (vgl. Kapitel 5.1) auch Datensätze für die Prognosejahre 2010, 2015 und 2020 entwickelt. Dazu wurden die für 2005 gefundenen prozentualen Abweichungen der oberen bzw. unteren Schranke vom Mittelwert auf die jeweiligen Mittelwerte (berichteten Werte) des Referenzszenarios für 2010 bis 2020 angewendet. Die Datensätze für die obere bzw. untere Schranke 2010-2020 enthalten also keine zusätzliche Einschätzung über die Unsicherheit der zugrundeliegenden Prognosen als solche, sondern nur (wie der Datensatz für 2005) über die Unsicherheit der retrospektiven Emissionsinventare und –berichterstattung. Die Dimension der „Unsicherheit der Prognose“ wird in PAREST über alternative deterministische Szenarien, z.B. Energieszenarien (vgl. [Jörß und Degel 2010]) abgebildet.

5.3 Emissionsszenarien „obere Schranke“ und „untere Schranke“

In den folgenden Tabellen ist – in gleicher SNAP-Aggregation wie die Ergebnisse der Unsicherheitsberechnung in Kapitel 4 – dokumentiert, wie die gemäß Kapitel 5.1 und 5.2 generierten Zeitreihen für die Emissionsszenarien „obere Schranke“ bzw. „untere Schranke“ aussehen. Diese Emissionsszenarien wurden im Rahmen von PAREST benutzt, um auszuloten, welchen Einfluss die Unsicherheit der Emissionsberichterstattung auf die Immissionsmodellierung hat [Stern 2010 c]. Wie bereits in Kapitel 5.2 betont, bilden diese Szenarien „obere Schranke“ bzw. „untere Schranke“ nur die Unsicherheit der national aggregierten Emissionsbasis 2005 ab, nicht aber die „Unsicherheit“ der Prognosen und Annahmen für die Projektionsjahre 2010 bis 2020.

Im Folgenden werden für jeden der in PAREST betrachteten Emittenten PM_{10} , $PM_{2,5}$, SO_2 , NO_x , NH_3 und NMVOC drei Tabellen gezeigt:

- a) Eine Übersicht zu den prozentualen und absoluten Abweichungen der Szenarien „obere Schranke“ bzw. „untere Schranke“ für das Jahr 2005.

Diese Tabellen sind in ihrer Struktur mit den Übersichtstabellen zu den Unsicherheiten der Emissionsinventare in Kapitel 4 vergleichbar und verdeutlicht den quantitativen Effekt des in Kapitel 5.1 beschriebenen Rechenweges: Die prozentualen und absoluten Abweichungen der Szenarien „obere Schranke“ bzw. „untere Schranke“ vom PAREST-Referenzszenario (Kapitel 5.3) sind in der Zeile der Summe über alle Sektoren identisch mit der Abweichung der Schranken des 95%-Konfidenzintervalls der Unsicherheitsberechnung. (Kapitel 4). Für alle einzelnen Sektoren sind die Abweichungen der Schranken-Szenarien von der PAREST-Referenz deutlich geringer als bei den jeweiligen Schranken des 95%-Konfidenzintervalls. Dies ist anschaulich damit zu erklären, dass die einzelnen Sektoren-Zeilen der Tabellen zu den Unsicherheiten (Kapitel 4) Ausschnitte eines probabilistischen Szenarios sind und nicht „gleichzeitig“ gelten, also nicht addierbar sind.

Demgegenüber stellen die folgenden Tabellen zu den Schrankenszenarien (Kapitel 5.3) ein deterministisches Szenario dar, in dem alle Sektor-Zeilen „gleichzeitig“ gelten und addierbar sind.

- b) eine Übersicht über die absoluten Rahmendaten des Szenarios „obere Schranke“ im Zeitverlauf und
- c) eine Übersicht über die absoluten Rahmendaten des Szenarios „untere Schranke“ im Zeitverlauf

Die in prozentualen Angaben für 2005 in den jeweils ersten Tabellen (nach Anstrich a) gelten unverändert auch für die Prognosejahre 2010 bis 2020 (vgl. Kapitel 5.2).

Tabelle 24: Abweichung der PM₁₀-Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz

PM₁₀ - Emissionen in Deutschland					
PAREST - Szenarien "Referenz" und "obere / untere Schranke"					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>					
Quellgruppe / SNAP	Abweichung der Schranken-Szenarien in %		PAREST-REF Emissionen in Gg	Abweichung der Schranken-Szenarien in Gg	
	2005 unten	2005 oben	2005 REF	2005 unten	2005 oben
01 Combustion in energy and transformation industry	-11%	10%	11	-1	1
02 Non-industrial combustion plants	-10%	9%	29	-3	3
03 Combustion in manufacturing industry	-13%	20%	20	-2	4
04 Production processes	-18%	44%	52	-9	23
05 Extraction and distr. of fossil fuels	-17%	28%	4	-1	1
06 Solvent and other product use	-20%	40%	9	-2	4
07 Road transport	-16%	15%	90	-15	13
08 Other mobil sources and machinery	-16%	15%	21	-3	3
09 Waste treatment and disposal	-10%	9%	0	0	0
10 Agriculture	-18%	31%	26	-5	8
11 Other sources and sinks			-	0	0
Summe	-16%	23%	262	-41	60
07_1 Road transport gasoline			-	0	0
07_2 Road transport diesel	-14%	18%	21	-3	4
07_3 Road transport LPG			-	0	0
07_4 Road transport non-ehxaust (volatilisation)			-	0	0
07_5 Road transport non-ehxaust (tire, break & road wear)	-13%	10%	20	-2	2
07_6 Road transport non-ehxaust (resuspension)	-19%	15%	49	-9	7
04_01 Production processes, high altitude	-13%	31%	19	-2	6
04_02 Production processes, low altitude	-20%	52%	34	-7	18

Tabelle 25: PM₁₀-Emissionen im Szenario „obere Schranke“

PM10 - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF obere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	12	11	11	11
02 Non-industrial combustion plants	Gg	32	32	34	35
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	23	21	21	20
04 Production processes	Gg	76	65	64	63
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	6	5	5	5
06 Solvent and other product use	Gg	13	13	13	12
07 Road transport	Gg	103	95	89	88
08 Other mobil sources and machinery	Gg	24	18	13	9
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	33	35	36	36
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	323	295	284	281
07_1 Road transport gasoline	Gg	0	0	0	0
07_2 Road transport diesel	Gg	25	13	5	2
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break and road we	Gg	22	23	23	24
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)	Gg	56	59	60	62
04_01 Production processes, high altitude	Gg	24	19	18	17
04_02 Production processes, low altitude	Gg	51	45	46	46

Tabelle 26: PM₁₀-Emissionen im Szenario „untere Schranke“

PM10 - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF untere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	10	9	9	9
02 Non-industrial combustion plants	Gg	26	26	28	30
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	17	16	15	14
04 Production processes	Gg	43	36	35	35
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	4	3	3	3
06 Solvent and other product use	Gg	7	7	7	7
07 Road transport	Gg	75	69	65	65
08 Other mobil sources and machinery	Gg	18	14	9	6
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	21	22	22	23
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	221	202	195	192
07_1 Road transport gasoline	Gg	0	0	0	0
07_2 Road transport diesel	Gg	18	10	4	2
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break and road we	Gg	17	18	19	19
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)	Gg	40	42	42	43
04_01 Production processes, high altitude	Gg	16	12	11	11
04_02 Production processes, low altitude	Gg	27	24	24	24

Tabelle 27: Abweichung der PM_{2,5}-Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz

PM_{2,5} - Emissionen in Deutschland					
PAREST - Szenarien "Referenz" und "obere / untere Schranke"					
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip					
Quellgruppe / SNAP	Abweichung der Schranken-Szenarien in %		PAREST-REF Emissionen in Gg	Abweichung der Schranken-Szenarien in Gg	
	2005 unten	2005 oben	2005 REF	2005 unten	2005 oben
01 Combustion in energy and transformation industry	-12%	9%	10	-1	1
02 Non-industrial combustion plants	-11%	9%	27	-3	2
03 Combustion in manufacturing industry	-15%	24%	9	-1	2
04 Production processes	-17%	37%	16	-3	6
05 Extraction and distr. of fossil fuels	-18%	31%	1	0	0
06 Solvent and other product use	-19%	33%	9	-2	3
07 Road transport	-14%	18%	37	-5	6
08 Other mobil sources and machinery	-15%	13%	21	-3	3
09 Waste treatment and disposal	-10%	8%	0	0	0
10 Agriculture	-19%	34%	6	-1	2
11 Other sources and sinks			-	0	0
Summe	-15%	19%	136	-20	26
07_1 Road transport gasoline			-	0	0
07_2 Road transport diesel	-13%	15%	21	-3	3
07_3 Road transport LPG			-	0	0
07_4 Road transport non-ehxaust (volatilisation)			-	0	0
07_5 Road transport non-ehxaust (tire, break & road wear)	-13%	10%	11	-1	1
07_6 Road transport non-ehxaust (resuspension)	-22%	44%	5	-1	2
04_01 Production processes, high altitude	-15%	29%	9	-1	3
04_02 Production processes, low altitude	-21%	46%	7	-2	3

Tabelle 28: PM_{2,5}-Emissionen im Szenario „obere Schranke“

PM_{2,5} - Emissionen in Deutschland					
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF obere Schranke					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	11	9	10	10
02 Non-industrial combustion plants	Gg	30	29	31	33
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	11	10	10	9
04 Production processes	Gg	22	18	18	17
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	1	1	1	1
06 Solvent and other product use	Gg	12	12	12	12
07 Road transport	Gg	43	33	26	23
08 Other mobil sources and machinery	Gg	24	18	13	8
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	8	8	8	8
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	162	138	127	121
07_1 Road transport gasoline	Gg	0	0	0	0
07_2 Road transport diesel	Gg	24	13	5	2
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxaust (tire, break and road we	Gg	12	12	13	13
07_6 Road transport non-ehxaust (resuspension)	Gg	7	7	7	8
04_01 Production processes, high altitude	Gg	11	9	8	8
04_02 Production processes, low altitude	Gg	11	9	9	9

Tabelle 29: PM_{2,5}-Emissionen im Szenario „untere Schranke“

PM2.5 - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF untere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	9	7	8	8
02 Non-industrial combustion plants	Gg	24	24	26	27
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	7	7	7	6
04 Production processes	Gg	13	11	10	10
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	1	1	1	1
06 Solvent and other product use	Gg	7	7	7	7
07 Road transport	Gg	31	24	18	16
08 Other mobil sources and machinery	Gg	18	14	10	6
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	5	5	5	5
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	116	99	91	87
07_1 Road transport gasoline	Gg	0	0	0	0
07_2 Road transport diesel	Gg	18	10	4	2
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break and road we	Gg	9	10	10	10
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)	Gg	4	4	4	4
04_01 Production processes, high altitude	Gg	8	6	5	5
04_02 Production processes, low altitude	Gg	6	5	5	5

Tabelle 30: Abweichung der SO₂-Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz

SO₂ - Emissionen in Deutschland					
<i>PAREST - Szenarien "Referenz" und "obere / untere Schranke"</i>					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>					
Quellgruppe / SNAP	Abweichung der Schranken-		PAREST-REF	Abweichung der Schranken-	
	Szenarien in %		Emissionen in Gg	Szenarien in Gg	
	2005 unten	2005 oben	2005 REF	2005 unten	2005 oben
01 Combustion in energy and transformation industry	-6%	6%	290	-19	18
02 Non-industrial combustion plants	-12%	11%	78	-9	9
03 Combustion in manufacturing industry	-11%	15%	65	-7	9
04 Production processes	-11%	14%	118	-13	16
05 Extraction and distr. of fossil fuels	-9%	7%	8	-1	1
06 Solvent and other product use			-	0	0
07 Road transport	-12%	12%	1	0	0
08 Other mobil sources and machinery	-11%	13%	3	0	0
09 Waste treatment and disposal	-20%	97%	0	0	0
10 Agriculture			-	0	0
11 Other sources and sinks			-	0	0
Summe	-9%	9%	562	-49	53
07_1 Road transport gasoline	-11%	12%	0	0	0
07_2 Road transport diesel	-12%	13%	0	0	0
07_3 Road transport LPG			-	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)			-	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break & road wear)			-	0	0
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)			-	0	0
04_01 Production processes, high altitude	-11%	14%	118	-13	16
04_02 Production processes, low altitude			-	0	0

Tabelle 31: SO₂-Emissionen im Szenario „obere Schranke“

SO₂ - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF obere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	308	253	264	274
02 Non-industrial combustion plants	Gg	86	54	47	40
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	74	72	72	72
04 Production processes	Gg	133	114	109	104
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	9	6	6	6
06 Solvent and other product use	Gg	0	0	0	0
07 Road transport	Gg	1	1	1	1
08 Other mobil sources and machinery	Gg	3	1	1	1
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	0	0	0	0
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	614	502	500	499
07_1 Road transport gasoline	Gg	0	0	0	0
07_2 Road transport diesel	Gg	0	1	1	1
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break and road we	Gg	0	0	0	0
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)	Gg	0	0	0	0
04_01 Production processes, high altitude	Gg	133	114	109	104
04_02 Production processes, low altitude	Gg	0	0	0	0

Tabelle 32: SO₂-Emissionen im Szenario „untere Schranke“

SO₂ - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF untere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	271	221	231	240
02 Non-industrial combustion plants	Gg	68	42	37	32
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	58	55	55	56
04 Production processes	Gg	104	90	85	80
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	7	5	5	5
06 Solvent and other product use	Gg	0	0	0	0
07 Road transport	Gg	1	1	1	1
08 Other mobil sources and machinery	Gg	3	1	1	1
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	0	0	0	0
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	512	415	415	415
07_1 Road transport gasoline	Gg	0	0	0	0
07_2 Road transport diesel	Gg	0	0	0	0
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break and road we	Gg	0	0	0	0
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)	Gg	0	0	0	0
04_01 Production processes, high altitude	Gg	104	90	85	80
04_02 Production processes, low altitude	Gg	0	0	0	0

Tabelle 33: Abweichung der NO_x-Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz

NO_x - Emissionen in Deutschland					
PAREST - Szenarien "Referenz" und "obere / untere Schranke"					
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip					
Quellgruppe / SNAP	Abweichung der Schranken-Szenarien in %		PAREST-REF Emissionen in Gg	Abweichung der Schranken-Szenarien in Gg	
	2005 unten	2005 oben	2005 REF	2005 unten	2005 oben
01 Combustion in energy and transformation industry	-7%	16%	283	-21	46
02 Non-industrial combustion plants	-11%	15%	102	-11	16
03 Combustion in manufacturing industry	-14%	36%	71	-10	26
04 Production processes	-11%	21%	91	-10	19
05 Extraction and distr. of fossil fuels			-	0	0
06 Solvent and other product use			-	0	0
07 Road transport	-8%	11%	684	-54	76
08 Other mobil sources and machinery	-12%	17%	233	-28	40
09 Waste treatment and disposal	-24%	184%	0	0	0
10 Agriculture	-23%	170%	81	-19	137
11 Other sources and sinks			-	0	0
Summe	-10%	23%	1.544	-152	359
07_1 Road transport gasoline	-15%	23%	112	-17	26
07_2 Road transport diesel	-7%	9%	571	-37	50
07_3 Road transport LPG			-	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)			-	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break & road wear)			-	0	0
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)			-	0	0
04_01 Production processes, high altitude	-11%	21%	91	-10	19
04_02 Production processes, low altitude			-	0	0

Tabelle 34: NO_x-Emissionen im Szenario „obere Schranke“

NO_x - Emissionen in Deutschland						
Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF obere Schranke						
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020	
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	328	301	312	325	
02 Non-industrial combustion plants	Gg	118	121	114	108	
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	97	93	90	87	
04 Production processes	Gg	110	88	85	83	
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	0	0	0	0	
06 Solvent and other product use	Gg	0	0	0	0	
07 Road transport	Gg	760	507	283	184	
08 Other mobil sources and machinery	Gg	273	233	199	172	
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0	
10 Agriculture	Gg	218	222	222	222	
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0	
Summe	Gg	1.903	1.565	1.307	1.180	
07_1 Road transport gasoline	Gg	138	65	36	29	
07_2 Road transport diesel	Gg	622	442	248	155	
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0	
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0	
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break and road we	Gg	0	0	0	0	
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)	Gg	0	0	0	0	
04_01 Production processes, high altitude	Gg	110	88	85	83	
04_02 Production processes, low altitude	Gg	0	0	0	0	

Tabelle 35: NO_x Emissionen im Szenario „untere Schranke“

NO_x - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF untere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	262	239	250	262
02 Non-industrial combustion plants	Gg	91	94	89	84
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	61	59	57	56
04 Production processes	Gg	81	65	63	60
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	0	0	0	0
06 Solvent and other product use	Gg	0	0	0	0
07 Road transport	Gg	630	422	233	150
08 Other mobil sources and machinery	Gg	205	178	154	135
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	62	63	63	63
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	1.392	1.122	910	810
07_1 Road transport gasoline	Gg	95	45	25	20
07_2 Road transport diesel	Gg	534	377	208	130
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxaust (tire, break and road we	Gg	0	0	0	0
07_6 Road transport non-ehxaust (resuspension)	Gg	0	0	0	0
04_01 Production processes, high altitude	Gg	81	65	63	60
04_02 Production processes, low altitude	Gg	0	0	0	0

Tabelle 36: Abweichung der NH₃-Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz

NH₃ - Emissionen in Deutschland					
PAREST - Szenarien "Referenz" und "obere / untere Schranke"					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>					
Quellgruppe / SNAP	Abweichung der Schranken-Szenarien in %		PAREST-REF Emissionen in Gg	Abweichung der Schranken-Szenarien in Gg	
	2005 unten	2005 oben	2005 REF	2005 unten	2005 oben
01 Combustion in energy and transformation industry	-19%	17%	3	-1	0
02 Non-industrial combustion plants	-23%	19%	3	-1	1
03 Combustion in manufacturing industry	-27%	38%	1	0	1
04 Production processes	-24%	44%	10	-2	4
05 Extraction and distr. of fossil fuels			-	0	0
06 Solvent and other product use	-19%	19%	2	0	0
07 Road transport	-33%	110%	11	-3	12
08 Other mobil sources and machinery	-19%	22%	1	0	0
09 Waste treatment and disposal			-	0	0
10 Agriculture	-12%	11%	577	-71	64
11 Other sources and sinks			-	0	0
Summe	-13%	13%	607	-78	82
07_1 Road transport gasoline	-34%	115%	10	-3	11
07_2 Road transport diesel	-13%	13%	1	0	0
07_3 Road transport LPG			-	0	0
07_4 Road transport non-ehxaust (volatilisation)			-	0	0
07_5 Road transport non-ehxaust (tire, break & road wear)			-	0	0
07_6 Road transport non-ehxaust (resuspension)			-	0	0
04_01 Production processes, high altitude	-24%	44%	10	-2	4
04_02 Production processes, low altitude			-	0	0

Tabelle 37: NH₃-Emissionen im Szenario „obere Schranke“

NH₃ - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF obere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	3	3	3	3
02 Non-industrial combustion plants	Gg	3	4	4	3
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	2	2	2	2
04 Production processes	Gg	14	14	14	14
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	0	0	0	0
06 Solvent and other product use	Gg	2	2	2	2
07 Road transport	Gg	22	18	16	15
08 Other mobil sources and machinery	Gg	1	1	1	1
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	641	642	646	650
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	689	686	687	691
07_1 Road transport gasoline	Gg	21	17	15	14
07_2 Road transport diesel	Gg	1	1	1	1
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break and road we	Gg	0	0	0	0
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)	Gg	0	0	0	0
04_01 Production processes, high altitude	Gg	14	14	14	14
04_02 Production processes, low altitude	Gg	0	0	0	0

Tabelle 38: NH₃-Emissionen im Szenario „untere Schranke“

NH₃ - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF untere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	2	2	2	2
02 Non-industrial combustion plants	Gg	2	2	2	2
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	1	1	1	1
04 Production processes	Gg	7	7	7	7
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	0	0	0	0
06 Solvent and other product use	Gg	1	1	1	1
07 Road transport	Gg	7	6	5	5
08 Other mobil sources and machinery	Gg	1	1	1	1
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	506	504	506	508
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	528	525	527	528
07_1 Road transport gasoline	Gg	7	5	5	4
07_2 Road transport diesel	Gg	0	1	1	1
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxhaust (volatilisation)	Gg	0	0	0	0
07_5 Road transport non-ehxhaust (tire, break and road we	Gg	0	0	0	0
07_6 Road transport non-ehxhaust (resuspension)	Gg	0	0	0	0
04_01 Production processes, high altitude	Gg	7	7	7	7
04_02 Production processes, low altitude	Gg	0	0	0	0

Tabelle 39: Abweichung der NMVOC-Emissionen 2005 im Szenario obere / untere Schranke von der PAREST-Referenz

NMVOC - Emissionen in Deutschland					
PAREST - Szenarien "Referenz" und "obere / untere Schranke"					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>					
Quellgruppe / SNAP	Abweichung der Schranken-Szenarien in %		PAREST-REF Emissionen in Gg	Abweichung der Schranken-Szenarien in Gg	
	2005 unten	2005 oben	2005 REF	2005 unten	2005 oben
01 Combustion in energy and transformation industry	-15%	15%	8	-1	1
02 Non-industrial combustion plants	-24%	14%	85	-20	12
03 Combustion in manufacturing industry	-19%	32%	4	-1	1
04 Production processes	-14%	19%	86	-12	17
05 Extraction and distr. of fossil fuels	-20%	17%	25	-5	4
06 Solvent and other product use	-4%	5%	743	-33	35
07 Road transport	-16%	20%	153	-24	31
08 Other mobil sources and machinery	-14%	14%	78	-11	11
09 Waste treatment and disposal			-	0	0
10 Agriculture	-17%	21%	255	-42	54
11 Other sources and sinks			-	0	0
Summe	-10%	12%	1.438	-150	166
07_1 Road transport gasoline	-18%	23%	92	-17	21
07_2 Road transport diesel	-10%	9%	38	-4	4
07_3 Road transport LPG			-	0	0
07_4 Road transport non-ehxaust (volatilisation)	-17%	26%	23	-4	6
07_5 Road transport non-ehxaust (tire, break & road wear)			-	0	0
07_6 Road transport non-ehxaust (resuspension)			-	0	0
04_01 Production processes, high altitude	-14%	19%	86	-12	17
04_02 Production processes, low altitude			-	0	0

Tabelle 40: NMVOC-Emissionen im Szenario „obere Schranke“

NMVOC - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF obere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	10	9	9	10
02 Non-industrial combustion plants	Gg	96	97	103	108
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	5	6	5	5
04 Production processes	Gg	103	96	94	92
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	29	20	16	14
06 Solvent and other product use	Gg	778	720	773	841
07 Road transport	Gg	184	128	104	94
08 Other mobil sources and machinery	Gg	89	80	60	53
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	309	309	309	309
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	1.603	1.465	1.474	1.527
07_1 Road transport gasoline	Gg	113	66	43	32
07_2 Road transport diesel	Gg	42	44	47	49
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxaust (volatilisation)	Gg	29	18	15	13
07_5 Road transport non-ehxaust (tire, break and road we	Gg	0	0	0	0
07_6 Road transport non-ehxaust (resuspension)	Gg	0	0	0	0
04_01 Production processes, high altitude	Gg	103	96	94	92
04_02 Production processes, low altitude	Gg	0	0	0	0

Tabelle 41: NMVOC-Emissionen im Szenario „untere Schranke“

NMVOC - Emissionen in Deutschland					
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip; REF untere Schranke</i>					
SNAP	Einheit	2005	2010	2015	2020
01 Combustion in energy and transformation industries	Gg	7	7	7	7
02 Non-industrial combustion plants	Gg	64	64	69	72
03 Combustion in manufacturing industry	Gg	3	3	3	3
04 Production processes	Gg	74	69	68	67
05 Extraction and distribution of fossil fuels and geotherma	Gg	20	14	11	10
06 Solvent and other product use	Gg	709	652	701	762
07 Road transport	Gg	129	93	77	71
08 Other mobil sources and machinery	Gg	68	61	46	41
09 Waste treatment and disposal	Gg	0	0	0	0
10 Agriculture	Gg	213	213	213	213
11 Other sources and sinks	Gg	0	0	0	0
Summe	Gg	1.288	1.176	1.194	1.246
07_1 Road transport gasoline	Gg	75	44	28	22
07_2 Road transport diesel	Gg	35	36	39	41
07_3 Road transport LPG	Gg	0	0	0	0
07_4 Road transport non-ehxaust (volatilisation)	Gg	19	12	10	9
07_5 Road transport non-ehxaust (tire, break and road we	Gg	0	0	0	0
07_6 Road transport non-ehxaust (resuspension)	Gg	0	0	0	0
04_01 Production processes, high altitude	Gg	74	69	68	67
04_02 Production processes, low altitude	Gg	0	0	0	0

6 Fazit

Für PAREST ist es gelungen, sämtliche Inputvariablen in das Modell-System der Emissionsberichterstattung am Umweltbundesamt in verschiedener Tiefe durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen zu ersetzen, deren Parameter durch Primär- und Sekundärliteratur sowie durch Expertenschätzungen bestimmt wurden. Auf dieser Basis wurde unter Berücksichtigung von Korrelationen eine Monte-Carlo-Simulation für die Unsicherheit der deutschlandweit aggregierten Emissionen an Feinstaub (PM₁₀ und PM_{2,5}) sowie an den Aerosol-Vorläufern SO₂, NO_x, NH₃ und NMVOC im Jahr 2005 durchgeführt. Einen Überblick über die Ergebnisse der Berechnungen zeigt Tabelle 42.

Tabelle 42: Übersicht Unsicherheiten im PAREST Referenzszenario

Unsicherheiten im deutschen Emissionsinventars 2005		
<i>PAREST-Referenzszenario</i>		
<i>Emissionsberechnung nach dem Inlandsprinzip</i>		
Schadstoff	95%- Konfidenzintervall	
	2,5%-Quantil	97,5%-Quantil
PM 10	-16%	23%
PM 2.5	-15%	19%
SO ₂	-9%	9%
NO _x	-10%	23%
NH ₃	-13%	13%
NMVOC	-10%	12%

Im Vergleich der betrachteten Schadstoffe sind die Inventare 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 wird vom Umweltbundesamt für 2007 +/-9,7% [UBA 2010] angegeben, also in derselben Größenordnung wie SO₂ und NMVOC in dieser Studie.

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

- **Landwirtschaft:** NO_x aus Düngemittelanwendung, NMVOC aus Umgang mit Wirtschaftsdünger, NH₃ aus Tierhaltung und Bodenbewirtschaftung, PM₁₀ aus Schweinemast
- **Mobile Maschinen in Land- und Forstwirtschaft:** PM₁₀, PM_{2,5} und NO_x
- **Bauwirtschaft**²⁹: PM₁₀
- **Kleingewerbe (Tischlereien)**²⁹: PM₁₀ und PM_{2,5}
- **Zigarettenrauch & Feuerwerk**²⁹: PM_{2,5}
- **Straßenverkehr:** PM₁₀ und PM_{2,5} aus 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

²⁹ Das UBA-Inventar beruht hier auf einer sehr groben, aus dem RAINS-Modell übernommenen Schätzung (vgl. [Klimont et al. 2002]).

7 Literatur

- [Aardenne 2002] J.A. van Aardenne (2002): „Uncertainties in emission inventories“, Thesis Wageningen University, ISBN 90-5808-641-0
- [BEU 2006] „Bilanz der Emissionsursachen“, Modell des Umweltbundesamtes zur Zerlegung von Rahmendaten der Energiebilanz, Version „BEU-D-72_Izt_44“ vom 17. Juni 2006, wie beschrieben in [Jörß und Kamburow 2006]; Umweltbundesamt / IZT (2006)
- [Bultjes et al. 2010] Peter Bultjes, Jochen Theloke, Rainer Stern, Wolfram Jörß (2010): PAREST-Endbericht, Schlussbericht an das Umweltbundesamt zum Forschungsvorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“
- [CORINAIR 2007] EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook – 2007, EEA Technical report No 16/2007, Copenhagen, 2007;
<http://www.eea.europa.eu/publications/EMEPCORINAIR5>
- [Dämmgen 2008] Expert Judgement: Einschätzung von Ulrich Dämmgen, Johann Heinrich von Thünen-Institut Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (vTI) ehemals Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) über die Unsicherheiten der landwirtschaftlichen Emissionen am 1.4.2008.
- [Dämmgen 2009] Ulrich Dämmgen, Hans-Dieter Haenel, Claus Rösemann, Jürgen Conrad, Manfred Lüttich, Helmut Döhler, Brigitte Eurich-Menden, Petra Laubach, Maria Müller-Lindenlauf und Bernhard Osterburg. „Berechnungen der Emissionen aus der deutschen Landwirtschaft - Nationaler Emissionsbericht (NIR) 2009 für 2007“ Johann Heinrich von Thünen-Institut Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei (vTI) Braunschweig, 2009. ISSN 0376-0723, ISBN 978-3-86576-049-4.
- [De Ceuster et al. 2007] 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
- [Degel und Jörß 2009] Degel, Melanie und Jörß, Wolfram (2009): „Aufbereitung von Daten der Emissionserklärungen gemäß 11. BImSchV aus dem Jahre 2004 für die Verwendung bei der UNFCCC- und UNECE-Berichterstattung - Teilbericht Stationäre Verbrennungsmotoren“. UBA-TEXTE Nr. 45/2009, Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt
- [Denier van der Gon et al. 2009] H.AC. Denier van der Gon, A.J.H. Visschedijk, H. van der Brugh (2009): „Gridded European emission data for projection years 2010, 2015 and 2020“; Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“
- [Denier van der Gon et al. 2010] H.AC. Denier van der Gon, A.J.H. Visschedijk, H. van der Brugh, R. Droge (2010): „A high resolution European emission data base for the

- year 2005“; Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“
- [EEA 2009] EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook — 2009; EEA Technical report No 6/2009, Copenhagen, 2009; ISBN 978-92-9213-034-3; DOI 10.2800/23924; <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009>
- [EMEP 2002] EMEP, 2002: EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 3rd edition October 2002 UPDATE
- [EMEP 2003] EMEP, 2003: Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Third Edition September 2003 UPDATE, EEA, Copenhagen, 2003
- [Harthan et al. 2007] Ralph O. Harthan, Jakob Graichen, Verena Graichen, Julia Repenning, Hans-Joachim Ziesing, Franz Wittke (2007): „Dokumentation der Datenqualität von Aktivitätsdaten für die Berichte über Emissionen aus stationären Feuerungen im Rahmen des Nationalen Inventarberichtes und des Monitoring Mechanismus nach RL EG 99/296“; Endbericht des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens FKZ 204 41 132 im Auftrag des Umweltbundesamtes, Berlin, 2007
inklusive eines Excel-Tabellenanhangs zur Dokumentation der Berechnung und Aggregation von Unsicherheiten der Aktivitätsraten „Unsicherheitsabschätzung BEU v21.xls“
- [Handke et al. 2004] Handke, Volker; Jörß, Wolfram; Pfitzner, Ralf; Brinkschneider, Frank; Schollenberger, Hannes (2004): „Das Qualitäts-System-Emissionsinventare – Handbuch“; Forschungsbericht für das Umweltbundesamt FKZ 202 42 266; Berlin: IZT
- [Hartung et al. 1989] Joachim Hartung, Bärbel Elpelt, Karl-Heinz Klösener (1989): Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik; R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 7. Auflage, 1989; ISBN 3-486-21448-9
- [IPCC 1995] Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Summary for Policymakers and Technical Summary of the Working Group I Report, IPCC, 1995
- [IPCC 1996] The IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Reporting Instructions, IPCC-Guidelines <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs1.htm>
- [IPCC 2000] Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/english/>
- [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. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>
- [Jörß 2007] W. Jörß (2007): „Anpassung von Energie- und Emissionsprognosewerten an das Energiemodell BEU“; Forschungsbericht an das Umweltbundesamt, FKZ 360 16 007, März 2007, Berlin: IZT

- [Jörß 2010] W. Jörß (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 et al. 2007] 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 et al. 2010] W. Jörß, 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 und Degel 2010] W. Jörß 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 und Handke 2007] Jörß, Wolfram und Handke, Volker (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 und Kamburow 2006] Jörß, Wolfram und Kamburow, Christian (2006): „Bilanzierung und Modellierung emissionsrelevanter Daten zum Energieverbrauch in stationären Quellen“. Werkstattbericht Nr. 78. Berlin: IZT - Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung
- [Kerschbaumer 2010 a] Andreas Kerschbaumer (2010): „Meteorologie – Vergleich 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“, Berlin: FU Berlin, Institut für Meteorologie, Troposphärische Umweltforschung
- [Kerschbaumer 2010 b] Andreas Kerschbaumer (2010): „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“, Berlin: FU Berlin, Institut für Meteorologie, Troposphärische Umweltforschung
- [Klimont et al. 2002] Zbigniew Klimont, Janusz Cofala, Imrich Bertok, Markus Amann, Chris Heyes and Frantisek Gyarfas (2002): „Modelling Particulate Emissions in Europe -A Framework to Estimate Reduction Potential and Control Costs“, IIASA Interim Report IR-02-076, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- [Kludt 2009] Expert Judgement: Einschätzung von Robert Kludt Umweltbundesamt über die Unsicherheiten von Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren für Feinstaub im Schüttgutumschlag Berlin 26.8.2009

- [Knörr et al. 2005]: TREMOD (Transport Emission Estimation Model): Wolfram Knörr et al. (IFEU): 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, 2005
- [Knörr et al. 2009] Wolfram Knörr, Jürg Heldstab, Florian Kasser, Mario Keller (2009): „Ermittlung der Unsicherheiten der mit den Modellen TREMOD und TREMOD-MM berechneten Luftschadstoffemissionen des landgebundenen Verkehrs in Deutschland“. INFRAS AG Zürich, Schweiz. ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung. Heidelberg. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. FKZ 360 16 023. Heidelberg/Zürich/Bern, 20. Juli 2009
- [Kugler et al. 2010] U. Kugler, 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“
- [Lambrecht et al. 2004] Udo Lambrecht, Hinrich Helms, Kathrin Kullmer, Wolfram Knörr (2004): „Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und des Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen“ (TREMOD MM): Forschungsbericht an das Umweltbundesamt, FKZ 29945113; Heidelberg, 2004
- [Morgan und Henrion 1990] Morgan, M.G., Henrion, M., (1990): Uncertainty. A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 0-521-42744-4
- [Müller 1991] P.H. Müller (1991): Lexikon der Stochastik; Akademie Verlag, Berlin, 1991, 5. Auflage
- [Olivier 2002] Jos G.J. Olivier (2002): On the Quality of Global Emission Inventories. Approaches, Methodologies, Input Data and Uncertainties. Thesis Utrecht University; ISBN 90-393-3103-0
- [Pfeiffer et al. 2000] Pfeiffer, F.; Struschka, M.J.; Baumbach, G. (2000): Ermittlung der mittleren Emissionsfaktoren zur Darstellung der Emissionsentwicklung aus Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher. Forschungsbericht 295 46 364, IVD Universität Stuttgart im Auftrag des Umweltbundesamtes, UBA-Texte 14/2000; Berlin 2000.
- [Rentz et al. 2002] O. Rentz, U. Karl, H. Peter (2002): Ermittlung und Evaluierung von Emissionsfaktoren für Feuerungsanlagen in Deutschland für die Jahre 1995, 2000 und 2010. UBA-Forschungsbericht 299 43 142.
inklusive zweier Excel-Tabellenanhänge zur Bereitstellung von Daten in der ZSE-Struktur „EF_13Bimsch_DL.xls“ und „EF_TA_Luft_DL.xls“
- [Schaap et al. 2009] M. Schaap, 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. Builtjes (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

- [Struschka et al. 2003] Michael Struschka, Ulrich Zuberbühler, Anja Dreiseidler, Daniel Dreizler, Prof. Günter Baumbach, Hans Hartmann, Volker Schmid, Heiner Link (2003): "Ermittlung und Evaluierung der Feinstaubemissionen aus Kleinf Feuerungsanlagen im Bereich der Haushalte und Kleinverbraucher sowie Ableitung von geeigneten Maßnahmen zur Emissionsminderung, Forschungsbericht für das Umweltbundesamt; UBA-TEXTE 41/03
- [Struschka et al. 2008] M. Struschka, D. Kilgus, M. Springmann, G. Baumbach (2008): "Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung"; Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen (IVD) UBA-FB 205 42 322. UBA-FB 001217; UBA Texte 44/08. Dessau-Roßlau, November 2008. ISSN 1862-4804.
- [Stern 2010 a] R. Stern (2010): "Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: PM10- und PM2.5-Minderungspotenziale von Maßnahmenpaketen zur weiteren Reduzierung der Immissionen in Deutschland"; Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: FU Berlin, Institut für Meteorologie, Troposphärische Umweltforschung
- [Stern 2010 b] R. Stern (2010): "Bewertung von Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe chemischer Transportberechnungen: Verkehrsmodell TREMOD und Verkehrsmodell TREMOVE"; Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: FU Berlin, Institut für Meteorologie, Troposphärische Umweltforschung
- [Stern 2010 c] Stern, R. (2010) „Analyse der Unsicherheiten/Bandbreiten in der im PAREST-Projekt verwendeten Kausalkette Emission-Transmission-Immission“; Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“, Berlin: FU Berlin
- [Theloke 2005] Theloke, J (2005):. NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelanwendung und Möglichkeiten zu ihrer Minderung. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 15 Nr. 252. Düsseldorf: VDI-Verlag 2005
- [Theloke et al. 2007] Theloke, J., Calaminus, B., Dünnebeil, F., Friedrich, R., Helms, H., Kuhn, A., Lambrecht, U., Niklaß, 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 NO_x und SO₂ und NMVOC in Deutschland, Forschungsbericht an das Umweltbundesamt, FKZ 205 42 221, UBA-TEXTE Nr. 36/2007. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- [Theloke et al. 2010] J. Theloke, U. Kugler, W. Jörß, B. Thiruchittampalam, T. Geftler, M. Uzbasich (2010): „Beschreibung der maßnahmenbasierten Minderungsszenarien in PAREST“; Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“

- [Thiruchittampalam et al. 2010] B. Thiruchittampalam, R. Köble, J. Theloke, U. Kugler, M. Uzbasich, T. Geftler (2010): „Dokumentation des PAREST Emissionsverteilungsmodells für Deutschland“; Forschungs-Teilbericht an das Umweltbundesamt, im Rahmen des PAREST-Vorhabens: FKZ 206 43 200/01 „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung“
- [UBA 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
- [ZSE 2007] Zentrales System Emissionen (ZSE), Emissionsdatenbank des Umweltbundesamtes mit dem Stand vom 08.06.2007