

## UFOPLAN-Vorhaben

„Emissionsdaten für flüchtige organische Verbindungen aus der Lösemittel-  
verwendung – Methodenevaluierung, Datenerhebung und Prognosen“

# VOC–Emissionsinventar

FKZ 201 43 306

Endbericht

Ökopol/IER, Hamburg 2004

## **IMPRESSUM**

### **F+E-Vorhaben**

Emissionsdaten für flüchtige organische Verbindungen aus der Lösemittelverwendung – Methodeevaluierung, Datenerhebung und Prognosen - FKZ 43 306.

**Auftrag:** Umweltbundesamt

**Laufzeit:** 01.09.2001 bis 30.11.2003.

### **Bearbeitung:**

Ökopol - Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg  
Nernstweg 32 – 34; 22765 Hamburg, Tel. 040/39 100 2-0, Fax.: -33  
Internet: [www.oekopol.de](http://www.oekopol.de), E-Mail: [jepsen@oekopol.de](mailto:jepsen@oekopol.de)

Projektleitung: **Dipl.-Ing. Dirk Jepsen**

Mitarbeit: **Dr. Anne Ipsen, Dipl.-Ing. Stéphanie Zangl**

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)  
Universität Stuttgart, Heßbrühlstr. 49a; 70550 Stuttgart;  
Tel.: 0711/780 61 – 56; Fax.: 0711/780 3953; E-Mail: [jt@ier@uni.stuttgart.de](mailto:jt@ier@uni.stuttgart.de)

Projektleitung: **Dipl.-Chem. Jochen Theloke**

### Berichts-Kennblatt

Berichtsnummer UBA-FB 201 43 306	2.	3.
4. Titel des Berichts: „Emissionsdaten für flüchtige organische Verbindungen aus der Lösemittelverwendung– Methodenevaluierung, Datenerhebung und Prognosen“ - VOC–Emissionskataster		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Jepsen, Dirk, Theloke, Jochen, Friedrich, Rainer, Ipsen, Anne		8. Abschlußdatum 30.11.2003
		9. Veröffentlichungsdatum 2004
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) ÖKOPOLE – Institut für Ökologie und Politik GmbH Nernstweg 32 - 34, D – 22765 Hamburg und  Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) Universität Stuttgart, Heßbrühlstr. 49a; 70565 Stuttgart;		10. UFOPLAN-Nr. 201 43 306
		11. Seitenzahl ca. 165 davon 4 Anhänge
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift)  Umweltbundesamt  Bismarckplatz 1, D – 14191 Berlin		12. Literaturangaben ca. 100
		13. Tabellen 14 im Haupttext
		14. Abbildungen 10 im Haupttext
15. Bemerkungen		
16. Kurzfassung Europäische und internationale Vereinbarungen und Regelungen erfordern in der Bundesrepublik Deutschland deutliche Minderungen im Bereich der NMVOC-Emissionen. Aufgrund des zunehmenden relativen Anteils an den Gesamtemissionen rückt der Bereich der Lösemittelanwendungen dabei zunehmend in den Focus der Diskussionen. Auf der Basis eines vorliegenden VOC-Emissionskatasters für die Bezugsjahre 1994 und 1996 sollte im Rahmen des vorliegenden Vorhabens gezielt eine fortschreibungsfähigen Basis für die periodische Berichterstattung und das Monitoring der Entwicklungen im Bereich der NVOC-Emissionen aus Lösemittelanwendungen entwickelt werden und dabei insbesondere auch den aktuellen Berichtsanforderungen an Systematik, Transparenz und Vollständigkeit Rechnung getragen werden. Mittels einer Vielzahl von Fachdiskussionen mit verschiedensten Anwenderbranchen und unter Auswertung aktueller Anlagen- und Branchendaten konnte dieses Ziel erreicht und differenzierte Kataster der NMVOC-Emissionen für die Jahre 2000 und 2001 erstellt werden, die den geltenden Qualitätsanforderungen internationalen Berichtspflichten in vollem Umfang genügen. Die Modellierung stützt sich auf den so genannten Verwendungsansatz. Dabei wird von den Einsatzmengen an Lösemitteln und lösemittelhaltigen Produkten in verschiedene Anwendungsbereiche mittels angepasster Emissionsfaktoren auf die NMVOC-Emissionen aus den verschiedenen Quellgruppen rückgeschlossen. Um vor dem Hintergrund der jährlichen Berichtspflichten die Fortschreibungsfähigkeit zu gewährleisten, wurden die Eingangsdaten des Modells entlang der Struktur der Produkt- und Warengruppen der amtlichen Produktions- und Handelsstatistik gegliedert. Darüber hinaus wurden in Bereichen, in denen deutlich differenzierte Branchendaten vorliegen, zusätzlich derartige Detailquellen integriert und mit den entsprechenden Verbänden die Voraussetzungen für eine periodische Übermittlung der Daten diskutiert. Durch die Umsetzung des Modells in ein EDV-gestütztes System konnte darüber den zuständigen Mitarbeitern des Umweltbundesamtes ein Werkzeug an die Hand gegeben werden, mit dem einerseits eine fehlerrobuste Fortschreibung des Modells möglich ist und andererseits die teilweise komplexen rechnerischen Zusammenhänge innerhalb und die Querbezüge zwischen den Emissionsabschätzungen der unterschiedlichen Quellgruppen für eine Fachdiskussionen transparent gemacht werden können. Evaluation und Optimierungsanalyse der vorliegenden Methodik zeigen, dass eine deutliche Aufwandsminderung und Steigerung der Aussagequalität der periodischen Emissionsberichterstattung, insbesondere durch eine Restrukturierung der amtlichen Basis-Statistiken (Produktions- und Handelsstatistik) erreicht werden könnte. Relevante Unschärfen der ermittelten Emissionsdaten bestehen insbesondere im Bereich der Oberflächenentfettung sowie in einzelnen zumeist sehr kleinteiligen Quellgruppen der privaten oder kleingewerblichen Lösemittelanwendung. Offene Fragen bestehen darüber im Bereich der Entwicklungsprognosen. Hier sehen die Gutachter weiteren Untersuchungsbedarf, wie im Dialog mit den Branchen sachgerechtere Prognosefaktoren gewonnen und periodisch in die Emissionsberichterstattung eingespeist werden können.		
17. Schlagwörter: VOC, VOC-Kataster, NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelanwendung, EDV-gestütztes System		
18. Preis	19.	20.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>6</b>
1.1	<b>Ausgangssituation .....</b>	<b>6</b>
1.2	<b>Zielstellung.....</b>	<b>6</b>
1.3	<b>Gang der Untersuchung &amp; Konkretisierung des Untersuchungsgegenstandes.....</b>	<b>7</b>
1.3.1	Definitionsphase: Eingrenzung der zu betrachtenden Berichtspflichten .....	7
1.3.2	Pilotphase: Konkretisierte und detaillierte Arbeitsplanung.....	10
1.3.3	Recherchephase: Evaluation und Optimierung der einzelnen Quellbereiche .....	10
1.3.4	Konsolidierungsphase: Zusammenführung der Teilergebnisse.....	11
<b>2</b>	<b>BERICHTSANFORDERUNGEN .....</b>	<b>11</b>
2.1	<b>Anforderungen.....</b>	<b>11</b>
2.2	<b>Lösungskonzept .....</b>	<b>14</b>
2.3	<b>Unsicherheitsbetrachtung .....</b>	<b>14</b>
2.3.1	Anforderungen .....	14
2.3.2	Methodische Ansätze.....	15
2.3.3	Lösungskonzept .....	15
2.4	<b>Prognosen.....</b>	<b>17</b>
2.4.1	Anforderungen .....	17
2.4.2	Lösungskonzept .....	18
<b>3</b>	<b>EVALUATION.....</b>	<b>22</b>
3.1	<b>Zielsetzung &amp; Vorgehen.....</b>	<b>22</b>
3.2	<b>Prüfung &amp; Optimierung der Grundmethodik .....</b>	<b>22</b>
3.2.1	Beschreibung .....	22
3.2.2	Bewertung .....	24
3.2.3	Problematik der Statistischen Basis-Systeme .....	25
3.2.4	Problematik der Einbindung von Detailinformationen.....	26

<b>3.3</b>	<b>Evaluation der einzelnen Quellbereiche .....</b>	<b>26</b>
<b>4</b>	<b>DAS EDV-GESTÜTZTE INVENTAR-SYSTEM.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Zielsetzungen.....</b>	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Aufbau .....</b>	<b>30</b>
4.2.1	Gesamt-Ergebnis .....	30
4.2.2	Main-Blätter .....	30
4.2.3	Nebenrechnungs-Blätter .....	30
4.2.4	Blatt Prognose-Faktoren .....	31
4.2.5	Die Hilfs-Blätter .....	31
<b>4.3</b>	<b>Bedienungshinweise.....</b>	<b>31</b>
4.3.1	Installation .....	31
4.3.2	Benutzung .....	32
4.3.3	Fortschreibung .....	32
<b>5</b>	<b>ANHÄNGE.....</b>	<b>36</b>
	<b>Anhang I: Kurzfassung .....</b>	
	<b>Anhang II: Methoden der Unsicherheitsbetrachtung .....</b>	

# Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Bei der Reduktion der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (Volatile Organic Compounds, VOC) besteht vor dem Hintergrund der drängenden Ozonproblematik ein national und international anerkannter Handlungsbedarf. Langfristiges Ziel ist die dauerhafte Unterschreitung bodennaher Ozonkonzentrationen von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Zur Annäherung an diese Zielstellung wurden verschiedene internationale Vereinbarungen und Regelungen getroffen.

Benannt seien hier:

- Das Protokoll der UN/ECE zur Bekämpfung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon („Göteborg-Protokoll“) zum Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen
- Die EU-Richtlinie über nationale Emissionshöchstgrenzen für bestimmte Luftschadstoffe (EG-NEC Richtlinie)

Da Ozon ein Treibhausgas ist, werden seine Vorläufersubstanzen vom Kyoto-Protokoll erfasst. Aus den verschiedenen internationalen Übereinkünften resultieren zum einen - gestuft über die nächsten Jahre - deutliche Minderungsziele für NMVOC-Emissionen (NMVOC: Non-Methane Volatile Organic Compounds) und andererseits umfangreiche Monitoring- und Berichtspflichten der Vertragsstaaten.

Hier sind insbesondere die Anforderungen der Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) zu benennen, die auch den Bereich der NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelanwendung adressieren.<sup>1</sup>

## 1.2 Zielstellung

Vor dem skizzierten Hintergrund war es Ziel des vorliegenden Vorhabens, das im Auftrag des UBA erstellte VOC-Emissionsinventar (basiert auf dem UFOPLAN Vorhaben 295 42 628 „Ermittlung der Lösemittlemissionen in Deutschland und Methodik zur Fortschreibung“) für die Bezugsjahre 1994 und 1996 gezielt zu einer fortschreibungsfähigen Basis für die periodische Berichterstattung und das Monitoring der Entwicklung im Bereich der NMVOC-Emissionen aus Lösemittelanwendungen weiterzuentwickeln und dabei insbesondere auch den aktuellen Berichtsanforderungen an Systematik, Transparenz, Vollständigkeit und Genauigkeit Rechnung zu tragen.

Im Rahmen dieser übergreifenden Zielstellung waren insbesondere die folgenden Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Evaluation des früheren Inventars mit gezielter Optimierung der Erhebungs- und Fortschreibungsmethodik
- Weiterentwicklung zu einem vom UBA selbst jährlich fortschreibungsfähigen Inventar
- Erhebung belastbarer Daten über Einsatz- und Emissionsmengen organischer Lösemittel in der Bundesrepublik Deutschland für die Bezugsjahre 2000 und 2001 entsprechend den Anforderungen der IPCC Guidelines
- Anpassung der Einsatz- und Emissionsmengen für das Bezugsjahr 1990 an die Anforderung der IPCC Guidelines
- Erstellung von Emissionsprognosen für die Jahre 2005 und 2010 auf Basis von Szenarien, die die zu erwartenden (Wirtschafts-) Aktivitäten sowie die Minderungseffekte durch Eigeninitiativen der Wirtschaftsakteure und gesetzlich induzierte Maßnahmen berücksichtigen

---

<sup>1</sup> Die Emissions-Berichtsanforderungen, die die Bundesrepublik Deutschland aktuell zu erfüllen hat, sind auf der Website des Umweltbundesamtes hinterlegt (<http://www.umweltbundesamt.de/luft/emissionen/bericht/vorschriften/index.htm>)



Innerhalb der EU gibt es darüber hinaus eine Reihe von Richtlinien, die periodische Berichte der Nationalstaaten an die Gemeinschaft im Kontext mit NMVOC-Emissionen, oder Maßnahmen zu deren Minderung vorsehen.

Zu benennen sind hier:

- 2001/81/EC „on National Emission Ceilings“ (NEC-RL)
- 1999/13/EC “VOC Directive” (Lösemittel-RL oder VOC-RL)
- Commission Decision 2000/479/EC on EPER (EPER)

Dabei ist allerdings einerseits zu differenzieren zwischen Berichtspflichten, die sich eher auf den Grad der Umsetzung struktureller und prozeduraler Anforderungen fokussieren, wie dies z. B. bei der Lösemittel-RL der Fall ist, und Berichtspflichten, die sich auf reale Emissionsmengen beziehen (z. B. im Rahmen der NEC-RL).

Andererseits ist zu unterscheiden zwischen Berichtspflichten auf Ebene von (Einzel-) Anlagen, wie z. B. bei EPER, und Berichtspflichten auf Ebene höher aggregierter Einheiten wie Quellgruppen-Sektoren oder Kategorien.

Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt verschiedene Berichtspflichten und ihre kennzeichnenden Parameter im Überblick.

Tab. 1: Wichtige Parameter verschiedener internationaler Berichtspflichten zu NMVOC-Emissionen

Adressat	OECD	EU				UNECE		UN
Rahmen	OECD /EUROSTAT	NEC	VOC-RL	EPER (IPCC)	CO <sub>2</sub> Monitoring	CLRTAP		FCCC
Umfang <sup>2</sup>	NGE	NGE+H	AE	NGE	NGE+H	NGE (4)	KAT	NGE+H
Aggregierungsebene	MS	"sectors"	Anlagen	Anlagen	Stoff	"sectors"	"sectors"	"source categories"
Räumliche Begrenzung <sup>3</sup>	HG MS	HG MS	HG MS	HG MS	HG MS	HG MS	50km*50km Raster	HG MS
VOC-Def. <sup>4</sup>	k. A.	SL	physikalisch	k. A.	k. A.	physikalisch	physikalisch	k. A.
Abgabe	Mitte Folgejahr	31.12 (5)	nach 9 Monaten	31.12	31.12.	31.12 (5)	?	15. Apr
Berichtshäufigkeit	2 Jahre	Jährlich	3 Jahre	3 Jahre	Jährlich (1)	Jährlich	5 Jahre	Jährlich (1)
Zeitreihe ab (2)	1980	2002	2001	1996	1990	1980 (3)	1990	1990
Prognosen	k. A.	2010	k. A.	k. A.	2005, 2010–2015	2010, 2020	?	2010, 2020
Methodik	Joint Questionnaire	AEIG (6)	Fragebogen der EU-Kommission	Guidance Documents	IPCC Guidelines; NIR (7); GPAUM (8)	AEIG (6) (New Reporting Format)	EMEP/Corinair mit AEIG (6)	IPCC Guidelines (Common Reporting Format); NIR (7), GPAUM (8)
Quant/Qual (Menge VOC)	Quant [Mg/a]	Quant [Gg/a]	Qual	Quant [kg/a]	Quant [Gg/a]	Quant [Mg/a]	Quant [Mg/a]	Quant [Gg/a]
Adressat	OECD /Eurostat	EU-Komm. /EEA	EU-Komm.	EU-Komm.	EU-Komm. /EEA	ECE Sekretariat	ECE Sekretariat	UNFCCC/OECD
Eignung der bestehenden Inventar-Grundstruktur	JA	JA	NEIN	NEIN	?	JA	NEIN	JA

Anmerkungen: (1) = jährlich auch erneuert die Emissionen vom Basisjahr bis zum aktuellen (2) = Neue Länder erst ab 1992 (3) = mind. jedoch für Basisjahr des jeweiligen Protokolls, das sie unterzeichneten, und nach Beitrittsjahr jährlich (4) = jede Vertragspartei über die Emissionen, die in den Protokollen verlangt werden, die sie unterzeichneten (5) = für das Kalenderjahr, das 13 Monate vorher endete (6) = Atmospheric Emission Inventory Guidebook (7) = National Inventory Report (8) = Good Practice Guidance and Uncertainty Management

<sup>2</sup> Berichtsumfang:

AE = Emissionsangaben zu Anlagen industrieller Oberflächenbehandlung etc.

NGE = Nationale Gesamtemissionen nach Emittentengruppen

H = Hintergrundangaben (Aktivitätsraten und Emissionsfaktoren)

KAT = Räumliches Inventar (Kataster) mit Emissionen (Punktquellen, Flächenquellen auf Kreisebene)

<sup>3</sup> HG MS= Hoheitsgebiet Mitgliedsstaaten

<sup>4</sup> SL= Sunlight ("VOCs means, unless otherwise specified, all organic compounds of anthropogenic nature, other than methane, that are capable of producing photochemical oxidants by reactions with nitrogen oxides in the presence of sunlight")

Die detaillierte Analyse zeigte zum einen, dass zwischen den auf (Einzel-)Anlagen bezogenen Berichtspflichten (VOC-RL & EPER) und den gesamtstaatlichen (auf höheren Ebenen aggregierten) Berichtspflichten praktisch keine Überschneidung besteht, und zum anderen, dass alle anderen Berichtsansforderungen einen direkten Bezug zu den Berichtsansforderungen unter UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) und CLRTAP (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution - UN/ECE) besitzen. Aus diesem Grund wurden diese Berichtsansforderungen in den Mittelpunkt der weiteren Untersuchung gestellt (vgl. auch Kap. 2.1 „Berichtsansforderungen“).

### 1.3.2 Pilotphase: Konkretisierte und detaillierte Arbeitsplanung

In einer 2. Projektphase (12/01 – 4/02) erfolgte eine weiterführende Auswertung der Berichtsansforderungen entsprechend den IPCC-Guidelines und den EMEP-Guidelines. Auf dieser Basis wurden gemeinsam mit dem Auftraggeber notwendige ergänzende Basis-Klärungen vorgenommen (vgl. hierzu auch Kap.3.4).

- Als Basisdefinition für alle Projektaktivitäten kommt die NMVOC-Definition der EG Lösemittel-RL zur Anwendung: „VOCs sind alle organischen Verbindungen, die bei 293,15 K einen Dampfdruck von mindestens 0,01 kPa oder unter den jeweiligen Gebrauchsbedingungen eine entsprechende Flüchtigkeit haben.“
- Zielgröße des Inventars ist die Gesamtmenge der NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelanwendung für die Bundesrepublik Deutschland. Dies entspricht der Quellgruppen Kategorie 3 der IPCC Systematik. Diese Kategorie wird entsprechend den IPCC Guidelines in die Sub-Kategorien (3A–3D) aufgegliedert. Mit dieser Differenzierung wird den Anforderungen der internationalen Berichtspflichten in vollem Umfang entsprochen.
- Um eine transparente Ableitung der berichteten Emissionen zu gewährleisten, wurde eine weitere Binnendifferenzierung der 4 Subkategorien entsprechend dem Level 3 der SNAP-Systematik nach CORINAIR angestrebt.

Weiterhin wurden erste Schritte zur Evaluation der vorliegenden Inventar-Methodik durchgeführt. Unter Auswertung dieser Referenzerfahrungen wurden einige Konkretisierungen/Veränderungen in der Arbeitsplanung des Gesamtvorhabens abgestimmt:

- Die Methodenevaluation und die Erarbeitung einer optimierten Vorgehensweise wurden in der Arbeitsplanung zusammengeführt, wobei die verschiedenen Quellbereiche (unter Berücksichtigung ihrer Emissionsrelevanz) sequentiell nacheinander bearbeitet wurden. Dies erfolgte einerseits aus Effizienzgründen, zum anderen aber aufgrund der Erfahrungen, dass eine vertrauensvolle Zusammenarbeit mit den betroffenen Wirtschaftsakteuren in den verschiedenen Quellbereichen jeweils die gemeinsame Thematisierung von Problemen/Schwachstellen und Verbesserungsvorschlägen notwendig machte.
- Da sich zeigte, dass brancheninterne Statistiken über Materialeinsätze u. ä. vielfach trennschärfer sind als die offiziellen Produktions- und Handelsstatistiken, wurde im weiteren Projektverlauf gezielt geprüft, in welchen Bereichen mit Herstellern/Verbänden Vereinbarungen über eine regelmäßige Zulieferung detaillierterer Daten möglich erscheinen.
- Als zentrales Arbeitsergebnis des Vorhabens sollte ein EDV-gestütztes Inventar-System (auf EXCEL basierend) erarbeitet werden, welches zukünftig den UBA-Mitarbeitern als „Werkzeug“ für die periodische Fortschreibung des NMVOC-Inventars aus der Lösemittelanwendung dient.
- Die detaillierte Beschreibung von Verknüpfungsoperationen bei der Emissionsberechnung sollte in dieses EDV-Tool verlagert werden und damit die Papierdokumentation entfrachten.

### 1.3.3 Recherchephase: Evaluation und Optimierung der einzelnen Quellbereiche

Auf Basis der vorstehend skizzierten Konkretisierungen der Vorgehensweise wurden im Zeitraum von 5/02 – 4/03 die 37 Quellbereiche einzeln bearbeitet.

Nach einer ersten Evaluation der bisher vorliegenden Methodik und Systematik wurde dabei jeweils Kontakt mit einschlägigen (Branchen-)Verbänden bzw. größeren Herstellern/Anwendern aufgenommen und mit diesen die Möglichkeiten zur weiteren Qualifizierung der bestehenden Datenbasis bzw. zu einer sachgerechteren Neustrukturierung der jeweiligen Emissionsberechnung diskutiert.

Insgesamt verlief diese Kontaktaufnahme durchweg konstruktiv. Allerdings zeigte sich ein recht unterschiedlicher Stand sowohl in Hinblick auf die Vorkenntnisse der jeweils zuständigen Personen zum Thema NMVOC-Emissionen, als auch im Hinblick auf die Verfügbarkeit konkreter Daten und Informationen. Diese Unterschiede sind sowohl der mehr oder minder heterogenen Struktur gerade der Fachverbände geschuldet, als auch damit verknüpft, ob die betreffenden Anwendungsbereiche z. B. in den Regelungsbereich der 31. BImSchV fallen und somit in den letzten Jahren konkrete Fachdiskussionen zur NMVOC-Problematik erfolgt sind.

Insbesondere zur Klärung der Fragen bei der „Passung“ brancheninterner Daten zu den Daten aus den offiziellen Bundesstatistiken sowie aufgrund der Schwierigkeiten bei der Übertragung einzelbetrieblicher Emissionsberechnungen auf sektorweite Emissionsabschätzungen waren in den meisten Fällen mehrfache Abstimmungsschleifen notwendig. Im Rahmen dieser Klärungs- und Abstimmungsprozesse wurde eine Reihe von bilateralen Treffen mit Branchen-Experten durchgeführt.

In einer Reihe von Quellbereichen konnte durch die Verwendung brancheneigener Grunddaten eine deutliche Steigerung der Aussagekraft der Emissionsberechnungen erreicht werden. Bei einigen der Verbände besteht im Zusammenhang mit einer zukünftigen regelmäßigen Überstellung dieser Informationen der dringende Wunsch einer vorherigen Klärung mit dem UBA über die Rahmenbedingungen dieser Zusammenarbeit, insbesondere hinsichtlich einer strikten Zweckbindung der zur Verfügung gestellten Daten.

#### **1.3.4 Konsolidierungsphase: Zusammenführung der Teilergebnisse**

Da aufgrund der, wie vorstehend skizziert, teilweise längeren Abstimmungsprozesse nicht wie vorgesehen zu Beginn der abschließenden Konsolidierungsphase von 5/03 bis 7/03 alle strukturelevanten Basis-Informationen verfügbar waren, wurde in Abstimmung mit dem Auftraggeber eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis 11/03 vorgenommen.

In dieser Arbeitsphase wurden insbesondere die verschiedenen Teile des EDV-gestützten Inventar-Systems zusammengeführt und dabei nach Würdigung der Gesamtschau der verschiedenen Teilkonzepte z. B. systematische Doppelungen bei Basisdateneingaben und Zwischenrechnungen eliminiert.

Darüber hinaus wurden die Eckwerte für qualifizierte Entwicklungsprognosen für die Jahre 2005 und 2010 erfasst und systematisch alle verfügbaren Informationen für die notwendigen Unsicherheitsbetrachtungen eingepflegt.

## **2 Berichtsansforderungen**

### **2.1 Anforderungen**

Im Rahmen der internationalen United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) und der Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) der UN/ECE sind zur Erfüllung der Berichtspflichten jeweils detaillierte Richtlinien erarbeitet worden.

Im Fall des UNFCCC handelt es sich hierbei um die Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) -Guidelines sowie um die Good Practice And Uncertainty Management (GPGAUM) -Guidelines. Bei CLRTAP sind es die European Monitoring Emission Program (EMEP) -Guidelines und das Atmospheric Emission Inventory Guidebook (AEIG).<sup>5</sup>

---

<sup>5</sup> Insgesamt wurden die benannten Berichtsansforderungen in den letzten Jahren in vielen Bereichen harmonisiert, so dass sie heute weitestgehend parallel bedient werden können.

Zur Erfüllung der hier festgelegten nationalstaatlichen Berichtspflichten aus der Klimarahmen-Konvention wird derzeit in Deutschland ein „Nationales System Emissionen“ implementiert. Neben den Berichtsanforderungen nach UNFCCC werden damit auch die Anforderungen von CLRTAP sowie der europäischen NEC-Richtlinie erfüllt<sup>6</sup>.

Den Anforderungen der IPCC-Guidelines ist zu entnehmen, dass:

- jede Vertragspartei für NMVOC bzw. für die verschiedenen Treibhausgase jeweils ein nationales Emissions-Inventar/-Kataster entwickelt<sup>7</sup>, welches jährlich aktualisierbar sein soll.
- dieses Inventar mit den Methoden aus den IPCC-Guidelines und dem GPAUM erstellt werden soll.
- nach GPAUM Unsicherheitsanalysen durchzuführen sind.
- Aktivitätsdaten berichtet werden sollen.

In den IPCC-Guidelines wird innerhalb der nationalen Emissions-Inventare für die NMVOC-Emissionen aus dem Bereich „solvent and other product use“ jeweils eine eigene Kategorie vorgesehen – die Kategorie 3. Da die NMVOC-Emissionen gegenüber anderen Treibhausgasen von deutlich geringerer Klimarelevanz sind, ist dies vor allen Dingen der Tatsache geschuldet, dass für Emissionsberechnungen in diesem Bereich eigene Berechnungsmethoden zur Anwendung kommen.<sup>8</sup>

Während in vielen anderen Emissionsbereichen die Emissionen unter Verwendung des Grundschemas: Aktivitätsrate \* Emissionsfaktor = Emissionsmenge bestimmt werden können, sind im Bereich der Lösemittelanwendung die Mengen der verschiedensten in den Verkehr gebrachten Lösemittel und die sehr vielfältigen Arten ihrer Anwendung zu berücksichtigen.

Die Kategorie 3 „Solvent and Other Product Use“ ist nach dem Common Reporting Format (CRF) untergliedert in die Sub-Kategorien 3 A („Paint Application“), 3 B („Degreasing & Dry Cleaning“), 3 C („Chemical Products, Manufacture & Processing“) und 3 D („Other“).

Nach den aktuellen EMEP-Guidelines ist insbesondere sicherzustellen, dass die berichteten Daten den folgenden fünf Prinzipien entsprechen:

- **Transparenz:**  
Gemeint ist, dass die verwendeten Annahmen und Methoden beschrieben werden und auch für dritte nachvollziehbar und verständlich sind.
- **Konsistenz:**  
Es soll gewährleistet werden, dass für alle zurückliegenden und zukünftigen Jahre die gleiche Methode zur Berechnung des Emissionsinventars verwendet wird.
- **Vergleichbarkeit:**  
Diese soll gewährleisten, dass die Emissionsinventare aller beteiligten Länder miteinander vergleichbar sind.
- **Vollständigkeit:**  
Es soll die vollständige Erfassung aller Emissionsquellen gewährleistet werden.
- **Genauigkeit:**  
Es handelt sich um ein relatives Maß der Exaktheit der Emissionsabschätzungen. Dabei sind zum einen systematische Fehler, die zu einer systematischen Unterschätzung oder Überschätzung führen, und statistische Fehler zu berücksichtigen. Die statistischen Fehler sollen entsprechend

<sup>6</sup> In der NEC-RL wird im Anhang III direkt auf die Berichtsanforderungen nach EMEP/Corinair verwiesen.

<sup>7</sup> Für alle Treibhausgase, die nicht unter das Montrealer Protokoll fallen, sollen solche nationalen Inventare für Emissionen durch Quellen sowie für Beseitigungen durch Senken erstellt werden.

<sup>8</sup> Vgl. hierzu Chapter 3.1 der IPCC-Guidelines, revised 1996: Reference Manual

GPGAUM quantifiziert werden.

Des Weiteren sollen:

- Unsicherheiten der Emissionsinventare möglichst quantitativ bestimmt werden.
- Für die Jahre 2005 und 2010 Prognosen zu Aktivitätsdaten<sup>9</sup> und nationalen Gesamtemissionen gemacht werden. Dabei sind die so genannten „current legislation projections“ zu berücksichtigen, die die zukünftige Entwicklung von umweltverschmutzenden Tätigkeiten und der dadurch verursachten Emissionen darstellen, die aufgrund von Prognosedaten erstellt wurden und alle rechtlichen Regelungen mit einbeziehen.

Die angeführten Guidelines stellen allerdings keine eigenständige Verpflichtung neben den Protokollen und Konventionen dar. Sie dienen vielmehr zur Unterstützung und Harmonisierung des Berichtswesens.

Aus diesen Anforderungen ergibt sich zunächst ein sehr einfaches Berichtsschema. Die folgende Tabelle zeigt – in deutscher Version – die fünf an das IPCC zu berichtenden Datensätze.

Tab.2: Grundschemata für NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelanwendung nach den IPCC-Guidelines

Kategorie & Sub-Kategorien	NMVOC-Emissionen [t/a]	Unsicherheit	Prognose 2005	Prognose 2010
3 Gesamt Lösemittelanwendung	Gesamt-Summe 3A – 3D			
3A Anwendung von Farben und Lacken	Summe der NMVOC-Emissionen			
3B Entfettung, Chemische Reinigung und Elektronik	Summe der NMVOC-Emissionen			
3C Herstellung und Verarbeitung von chem. Produkten	Summe der NMVOC-Emissionen			
3D Andere Anwendungen von Lösemitteln und ähnl. Aktivitäten	Summe der NMVOC-Emissionen			

<sup>9</sup> Unter Aktivitätsdaten wird hier verstanden: Daten zu Energieverbrauch, Strom- und Wärmeproduktion/-erzeugung, Energieverbrauch für den Verkehrssektor, Landwirtschaftliche Aktivitätsdaten.

## 2.2 Lösungskonzept

Dem Ziel des Forschungsvorhabens, ein Inventar für die NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelverwendung zu erstellen, welches Deutschland in die Lage versetzt, seinen internationalen Berichtspflichten nachzukommen, könnte mit dem in der Tabelle 2 skizzierten Berichtsblatt genüge getan werden.

Vor dem Hintergrund, dass einerseits die angeführten „Qualitätsanforderungen“, insbesondere die fünf Prinzipien der EMEP-Guidelines, eine transparente Unterlegung dieser Ergebniswerte nahe legen und andererseits das Umweltbundesamt für die Ableitung und das Monitoring von Maßnahmen zur Emissionsminderung eine differenziertere Datenbasis benötigt, wurde zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer eine weitere Untergliederung der Quellbereiche abgestimmt.

Im Ergebnis kommt der Vorschlag der Gutachter zum tragen, weiterhin die auch in der IER Methodik von 2000 vorgeschlagene Aufgliederung in die SNAP-Gruppen auf der Ebene des so genannten Level 3 aus der CORINAIR-Systematik<sup>10</sup> anzuwenden.

Nach der Harmonisierung der Reporting Formate sind die Quellgruppenbereiche 601 bis 604 deckungsgleich mit den IPCC Sub-Kategorien von 3A bis 3D; ausgenommen ist dabei der Bereich 605 („Use of HFC, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, PFC and SF<sub>6</sub>“), der der IPCC Kategorie 2 zuzuordnen ist<sup>11</sup>.

Auf der Ebene des Level 3 sind die vier Quellgruppenbereiche in insgesamt 39 einzelne Quellgruppen untergliedert. Um keine „künstlichen“ Trennungen sachlich eng verknüpfter Emissionsbereiche zu erzwingen, wurden im abschließend erarbeiteten Konzept der Gutachter mehrere SNAP's zu Quellgruppen zusammengeführt<sup>12</sup>.

## 2.3 Unsicherheitsbetrachtung

### 2.3.1 Anforderungen

Im „Review of the implementation of commitments and other provisions of the convention“ hat die „Conference of the Parties“ die Anforderungen an die Betrachtung von Unsicherheiten festgelegt. Danach ist es Teil der Berichtspflicht, die Qualität der gemeldeten Daten mitzuteilen sowie die gemeldeten Emissionen mit den getroffenen Annahmen zu unterlegen. Die Unsicherheiten sollten, soweit möglich, quantifiziert werden. Die Methode zur Ermittlung der Unsicherheiten muss ebenfalls transparent beschrieben werden.

Von IPCC werden in GPAUM zwei Methoden zur Quantifizierung von Unsicherheiten beschrieben.

- 1) Fehlerfortpflanzung
- 2) Monte-Carlo Simulation

Anzugeben ist letztendlich die Qualität der abgeschätzten Daten in folgender Abstufung (Notation Key for Overview Table 8A der Reporting Instructions of IPCC-Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories):

- H: High Confidence Level  
 M: Medium Confidence Level  
 L: Low Confidence Level

<sup>10</sup> Basierend auf den Selected Nomenclature for Air Pollution for CORINAIR Inventory 97

<sup>11</sup> Dies wird u.a. im Abschnitt „Correspondence between 1996 IPCC source categories and SNAP 97“ der Erläuterungen zur SNAP 97 Systematik Version 1.0 ausgeführt.

<sup>12</sup> Es handelt sich um die SNAPs für Metallentfettung, Fertigung elektronischer Komponenten, Oberflächenreinigung in der Feinoptik, Optoelektronik und Spezialreinigung (SNAP 60201, 60203, 60204 und 60209) sowie um die SNAPs für Kunststoffverarbeitung (SNAP 60301-04).

Unglücklicherweise sind diesen Abstufungen keine einheitlich quantifizierten Vertrauensintervalle zugeordnet worden.

Im Folgenden werden methodische Ansätze zur Beschreibung von Unsicherheiten von Emissionsinventaren grundsätzlich betrachtet.

### 2.3.2 Methodische Ansätze

Es ist zwischen Methoden zur Unsicherheitsanalyse und Methoden zur Verifikation der berechneten Emissionen zu unterscheiden. Zur Unsicherheitsanalyse stehen qualitative sowie deren quantitative Einordnung und quantitative Ansätze zur Verfügung. Bei den zur Verfügung stehenden quantitativen Ansätzen handelt es sich um Fehlerfortpflanzung und Monte-Carlo-Simulation. Zur Verifikation der berechneten Emissionen sind Plausibilitätsprüfungen und Evaluierungsexperimente geeignet.<sup>13</sup>

Im Allgemeinen wird im Rahmen der Emissionsberichterstattung die Methode der Fehlerfortpflanzung zur Quantifizierung von Unsicherheiten als ausreichend angesehen. Aus streng wissenschaftlicher Perspektive ist ihre Anwendung in einer Quellgruppen wie der Lösemittelanwendung methodisch nicht „sauber“, da die Voraussetzungen der Gaußschen Fehlerfortpflanzung<sup>14</sup> nicht erfüllt werden können. Vor diesem Hintergrund wäre der Monte-Carlo-Simulation der Vorzug zu geben, die jedoch einen deutlichen höheren Aufwand bei Datenversorgung und Durchführung erfordert.

### 2.3.3 Lösungskonzept

Um zu prüfen, wie eine möglichst aufwandseffiziente Inventarfortschreibung realisiert werden kann, wurde für ausgewählte Quellbereich die tatsächlichen Abweichungen zwischen den beiden in Frage stehenden quantitativen statistischen Methoden geprüft. Es zeigte sich, dass - wie zu erwarten - die Fehlerintervalle bei der Monte-Carlo-Simulation nominell kleiner sind. Die Relation der Fehlerintervalle der verschiedenen Emissionsgrößen ist aber bei beiden Methoden weitestgehend gleich. Damit verändert sich die Ausgangsinformation für eine qualitative Klassierung entsprechend den Berichtsanforderungen nicht.

Für die Fortschreibung des NMVOC-Emissionsinventars schlagen die Gutachter deshalb eine routinemäßige Unsicherheitsbetrachtung nach der Fehler-Fortpflanzungsmethodik vor. Dies genügt mit vergleichsweise geringem Fortschreibungsaufwand den internationalen Berichtsanforderungen voll .

Um die Datenversorgung für die Fehlerfortpflanzung zu ermöglichen, wurden von den Gutachter im EDV-gestützten Inventar-System für alle Eingangsgrößen zusätzlich Standardabweichungen (95% Konfidenzintervall) in Form von (+ x % / - y %) eingefügt. Als Basiseinstellung wurden dabei die folgenden Standardabweichungen (95% Konfidenzintervall) verwendet:

- **+/- 10%:** Für einfache Größen, die auf einer strukturierten Basis ermittelt werden, wie z. B. die Mengendaten der Produktions- und Handelsstatistiken.
- **+/- 15%:** Für komplexe Größen, die bereits inhärent eine Mittelwertabschätzung vornehmen, wie z. B. die Angaben zu Lösemittelgehalten oder Emissionsfaktoren in Emissionsbereichen, in denen eine gute Detailkenntnis über die üblicherweise vorzufindenden Einzelwerte gegeben ist.
- **+/- 20%:** Für komplexe Größen – siehe vorstehend, in Emissionsbereichen, in denen nur stichpunktartig Einzelerkenntnisse vorliegen.

---

<sup>13</sup> In der Anlage I werden die unterschiedlichen Ansätze kurz beschrieben und in Bezug auf ihre Eignung zur Ermittlung der Unsicherheiten soweit möglich bewertet.

<sup>14</sup> insbesondere Unabhängigkeit der Fehler der verschiedene Eingangsgrößen zur Emissionsberechnung

Wo in einzelnen Bereichen von den Gutachtern für einzelne Quellbereiche andere Einschätzungen vorgenommen wurden oder wo zusätzliche Erkenntnisse über die Belastbarkeit der verfügbaren Eingangsgrößen vorliegen, wurde dies mit entsprechenden Kommentaren gesondert deutlich gemacht. Auf diese Art und Weise kann im Dialog mit den Akteuren der verschiedenen Quellbereiche auch im Verlauf der Fortschreibung des Inventars jederzeit eine transparente Herkunft der Fehlerabschätzung gewährleistet werden.

Vom Prinzip her sollen diese Erst-Setzungen in der Fachdiskussion für die verschiedenen Quellbereiche weiter angepasst werden. Die beteiligten Fachexperten für die einzelnen Quellbereiche tun sich bislang allerdings noch schwer, konkrete Änderungsvorschlägen vorzulegen. Nach den direkten Rückmeldungen ist dies der Schwierigkeit geschuldet, sich die wissenschaftliche Abschätzung von Unsicherheiten in der Praxis vorzustellen und die Auswirkungen und Konsequenzen veränderter Vorschläge in einem statistisch komplexen System vorherzusehen. Für das weitere Vorgehen erscheint es deshalb sinnvoll, mit einzelnen Fachexperten für emissionsrelevante Teilbereiche des konsolidierten Inventars verschiedene Fehlerannahmen durchzuspielen. Auf Basis der im Inventar hinterlegten Informationen wird vom EDV-gestützten Inventarsystem jeweils mittels Fehlerfortpflanzung die Standardabweichung (95% Konfidenzintervall) der Subkategorien (3A – 3D) und der Gesamt-Kategorie (3) berechnet.

Sollte zu einem späteren Zeitpunkt, z. B. im Rahmen veränderter Berichtsanforderungen, ein entsprechender Bedarf entstehen, kann darüber hinaus jederzeit mit frei erwerblichen EDV-Tools<sup>15</sup> auf die erstellte Datenbasis aufgesetzt und eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden. Diese benötigt für alle Eingangsgrößen<sup>16</sup> die folgenden statistischen Parameter:

- Median
- Standardabweichung (95%- Konfidenzintervall)
- Art der Verteilung

Als Median (oder Mittelwert) kann direkt der Wert der jeweiligen Eingangsgröße verwendet werden, wie er im Inventar hinterlegt ist. Für die Standardabweichung (95%-Konfidenzintervall) kann ohne Abweichung auf die ebenfalls hinterlegten Standardabweichungen zurückgegriffen werden. In Bezug auf die Art der Verteilung wird als Grundannahme für die meisten Eingangsgrößen von einer Gauß'schen Normalverteilung ausgegangen.

In der Inventar-Systematik ergeben sich bei der Durchführung einer solchen aufwendigen Unsicherheitsbetrachtung die in der folgenden Tabelle dargestellten zusätzlichen Informationen.

---

<sup>15</sup> Für die technische Durchführung der Monte-Carlo-Simulation wird von den Gutachtern ein spezielles Software-Tool, die kommerzielle Software @RISK von PALISADE Co. eingesetzt. Es handelt sich um eine Add-on Lösung zu MS-Excel, mit der flexibel auf die in den Excel-Arbeitsblättern hinterlegten Daten zurückgegriffen werden kann.

<sup>16</sup> Eingangsgrößen sind alle veränderlichen Rechenfaktoren, die in die Emissionsberechnung eingehen. Im vorliegenden Inventar also z. B. die Produktionsmengen, die Außenhandelsmengen, die Lösemittelgehalte oder die Emissionsfaktoren.

Tab. 3: Schema für den Bericht von NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelanwendung mit qualifizierter Unsicherheitsbetrachtung

Kategorie & Sub-Kategorien	NMVOC-Emissionen (Mittelwert)	Unsicherheit				Prognose 2005	Prognose 2010
		Standard-abwei-chung (95% - Konfidez-Intervall)	Ver-teilung	Quelle	Ergebnis		
	[t/a]	[+/- x %]	[Typ]	[Name]	[Dicht-Fkt]	[t/a]	[t/a]
3 Lösemittelanwendung	Gesamt-Summe						
3A Anwendung von Farben und Lacken	Summe						
3B Entfettung, Chemische Reinigung und Elektronik	Summe						
3C Herstellung und Verarbeitung von chem. Produkten	Summe						
3D Andere Anwendungen von Lösemitteln und ähnl. Aktivitäten	Summe						

## 2.4 Prognosen

### 2.4.1 Anforderungen

Im "Review of the implementation of commitments and other provisions of the convention" hat die „Conference of the Parties“ auch die Anforderungen für die Erstellung von Projektionen festgelegt.

Der Fokus von Projektionen liegt auf der Ermittlung der zukünftigen Entwicklung der betrachteten Emissionen. Dabei sollen die Entwicklung der Aktivitätsdaten, etwaige abzusehende Technologieentwicklungen sowie die Implementierung gesetzlicher Maßnahmen und darüber hinausgehende zukünftige Maßnahmen berücksichtigt werden.

Die berichtspflichtigen Parteien sollen mindestens folgende drei Projektionen erstellen:

- 1) Emissionsentwicklung unter Berücksichtigung gesetzlicher Maßnahmen für die Bezugsjahre 2005 und 2010
- 2) Emissionsentwicklung unter Berücksichtigung zusätzlicher Maßnahmen für die Bezugsjahre 2005 und 2010
- 3) Emissionsentwicklung ohne Berücksichtigung von Maßnahmen

Optional können Sensitivitätsanalysen für die einzelnen Projektionen durchgeführt werden. Allerdings sollte die Zahl der Szenarien ein überschaubares Maß nicht überschreiten.

### 2.4.2 Lösungskonzept

Um die skizzierten Anforderungen bedienen zu können, werden in dem vorgelegten Konzept drei Faktoren berücksichtigt:

1. Sozioökonomische Entwicklungen,  
die die (Basis-) Aktivitäten in den zu betrachtenden Quellbereichen verändern
2. Gesetzlich induzierte Aktivitäten,  
die zu einer Verringerung der Emissionen führen
3. Weitere eigenständige Entwicklungen,  
die zu einer Verringerung der Emissionen führen

Für die Berücksichtigung der sozioökonomischen Entwicklung werden Indexfaktoren verwendet, die von der PROGNOSE AG im Rahmen des Deutschland Report (Deutschland bis zum Jahr 2020) für eine Reihe von Wirtschaftssektoren in Deutschland erstellt wurden.

Diese Indexfaktoren basieren auf Analysen der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung; Modellrechnungen, Branchenstatistiken und den Ergebnissen des – vom Statistischen Bundesamt regelmäßig durchgeführten – Mikrozensus sowie der Analyse internationaler Rahmenbedingungen (Stichwort: Globalisierung). Sie berücksichtigen damit die allgemeine konjunkturelle Entwicklung, die Marktentwicklung in verschiedenen Branchen sowie grundlegende strukturelle Veränderungen innerhalb der Volkswirtschaft.

Es handelt sich um bruttowertbezogene Indexfaktoren, die inflationsbereinigt Aussagen zur Entwicklung der Wertschöpfung oder zum verfügbaren Konsum- bzw. Investitionskapital in den verschiedenen untersuchten Sektoren liefern. Diese Indexfaktoren sind prinzipiell als „Aktivitätsfaktoren“ im Sinne der Berichtsanforderungen (nach IPCC Guidelines) geeignet. Allerdings treten bei ihrer Verwendung im Kontext mit dem Berichtssystem für NMVOC-Emission Unschärfen auf.

Zum einen unterscheidet sich die Sektorenauflösung naturgemäß deutlich von der hier in Frage stehenden Quellgruppensystematik (SNAP-Codes und Source Categories), zum anderen muss die Entwicklung der wertbezogenen Indexfaktoren nicht zwingend mit den Stoffdurchsätzen – und damit u. a. der Lösemittelverwendung – in den verschiedenen Sektoren korrelieren.

Zur Verdeutlichung dieser Problematik ein Beispiel, für das diese Schwierigkeiten besonders signifikant sind: Für den Sektor „Kfz-Handel, Autoreparatur und Tankstellen“ werden, bezogen auf den Wert 100 für das Jahr 2000, Indexfaktoren von 111 für 2005 und 129 für 2010 prognostiziert. Von den subsumierten Aktivitäten ist der Kfz-Handel kaum emissionsrelevant, während der Bereich der NMVOC-Emissionen aus Tankstellen (aus dem Benzin) an ganz anderer Stelle der Berichtssystematik zu erfassen ist. Aufgrund zunehmend komplexer Fahrzeug- und Motorentechnologien werden zwar auch bei der Autoreparatur immer höhere Wertumsätze erzielt, die jährlich pro angemeldetem KFZ verwendete Reparatur-Lackmenge nimmt dagegen seit Jahren stetig ab. Diese Entwicklung ist vielen Faktoren geschuldet, wie einer besseren Erstlackierung und Konservierung der Fahrzeuge, effektiveren Lackiertechniken bei Reparaturlackierungen und einem veränderten Verbraucherverhalten in Bezug auf die „Beulentoleranz“. Die Minderverbräuche überkompensieren dabei sogar den wachsenden Fahrzeugbestand, so dass von 1991 bis 2000 ein Mengen-Rückgang der Reparaturlacke um fast 30%<sup>17</sup> feststellbar war und für die Entwicklung bis 2005 in der Branche selbst mit einem Indexwert von 0,82 gearbeitet wird<sup>18</sup>.

Da für den überwiegenden Teil der im Kontext der Lösemittelanwendungen relevanten Produktgruppen keine aus öffentlich zugänglichen Quellen verfügbaren Indexfaktoren für die Mengenentwicklungen verfügbar sind<sup>19</sup>, wird im Rahmen des Konzeptvorschlages – trotz der skizzierten Problematik –

<sup>17</sup> Nach CRB-Markt Zahlen, die praktisch den gesamten Kreis der deutschen Hersteller abdecken.

<sup>18</sup> Pers com Herr May, Dupont Performance Coating, Okt 03

<sup>19</sup> Während der im Projektverlauf geführten Gespräche mit den verschiedenen relevanten Herstellerverbänden und Einzelproduzenten konnten in diesem Kontext zwar eine Vielzahl derartiger Marktprognosen identifiziert werden, doch beziehen sich diese fast immer nur

vorgeschlagen, die PROGNOSE-Indexfaktoren zu verwenden. Dort, wo fundierte Erkenntnisse über abweichende Entwicklungen der Mengenentwicklungen verfügbar sind, sollten diese über entsprechende bereichsspezifische Aktivitätsfaktoren berücksichtigt werden (siehe unten).

In Bezug auf die gesetzlich induzierten Minderungsmaßnahmen sind derzeit insbesondere die Auswirkungen der folgenden Regelungen (bzw. Regelungsvorhaben) zu berücksichtigen:

1. Die EG-Lösemittelrichtlinie 1999/13/EG bzw. ihre Umsetzung und Anpassung an deutsches Recht im Rahmen der 31. BImSchV.
2. Die IVU-Richtlinie 96/61 EG bzw. ihre Umsetzung und Anpassung an deutsches Recht im Rahmen des Artikelgesetzes zur Novellierung des Bundesimmissionsschutzrechtes vom August 2002 sowie die Arbeiten zur Erstellung von Referenzdokumenten über den besten Stand der verfügbaren Techniken (BREF-Dokumente) aus dem „Sevilla Prozess“<sup>20</sup>.
3. Die EG-Richtlinie 2004/42/EG zur Begrenzung der VOC-Emissionen beim Einsatz von bestimmten Dekorfarben und -lacken und bei der Fahrzeugreparaturlackierung („Decopaint-RL“) und ihre Umsetzung in deutsches Recht („Lösemittelhaltige Farben- und Lack-Verordnung – ChemVOCFarbV“).
4. Normierungs- und Regelungsvorhaben im Rahmen der europäischen Bauproduktenrichtlinie 89/106/EWG.

Auch die Berücksichtigung der Effekte dieser Regelungen ist nicht unproblematisch. Sie adressieren jeweils nur einen Teil der Anlagen bzw. Produkte innerhalb der verschiedenen, hier in Frage stehenden Quellbereiche, und sie sind z. T. eher prozedural als normativ angelegt.

Selbst dort, wo die Regelungen normative Zielvorgaben (Emissionsgrenzwerte) haben, bedarf es i) regelmäßig der Abschätzung, wieweit diese neuen Anforderungen unterhalb der derzeit in der Betriebspraxis erreichten Werte liegen, ii) der Abschätzung, welcher Anteil der Emissionsmenge (nicht der Zahl der Anlagen) von den neuen Regelungen erfasst wird und iii) stellt sich jeweils die Frage nach einer Einschätzung der Stringenz bzw. Zeitverzögerung des realen Vollzuges „Vor-Ort“.

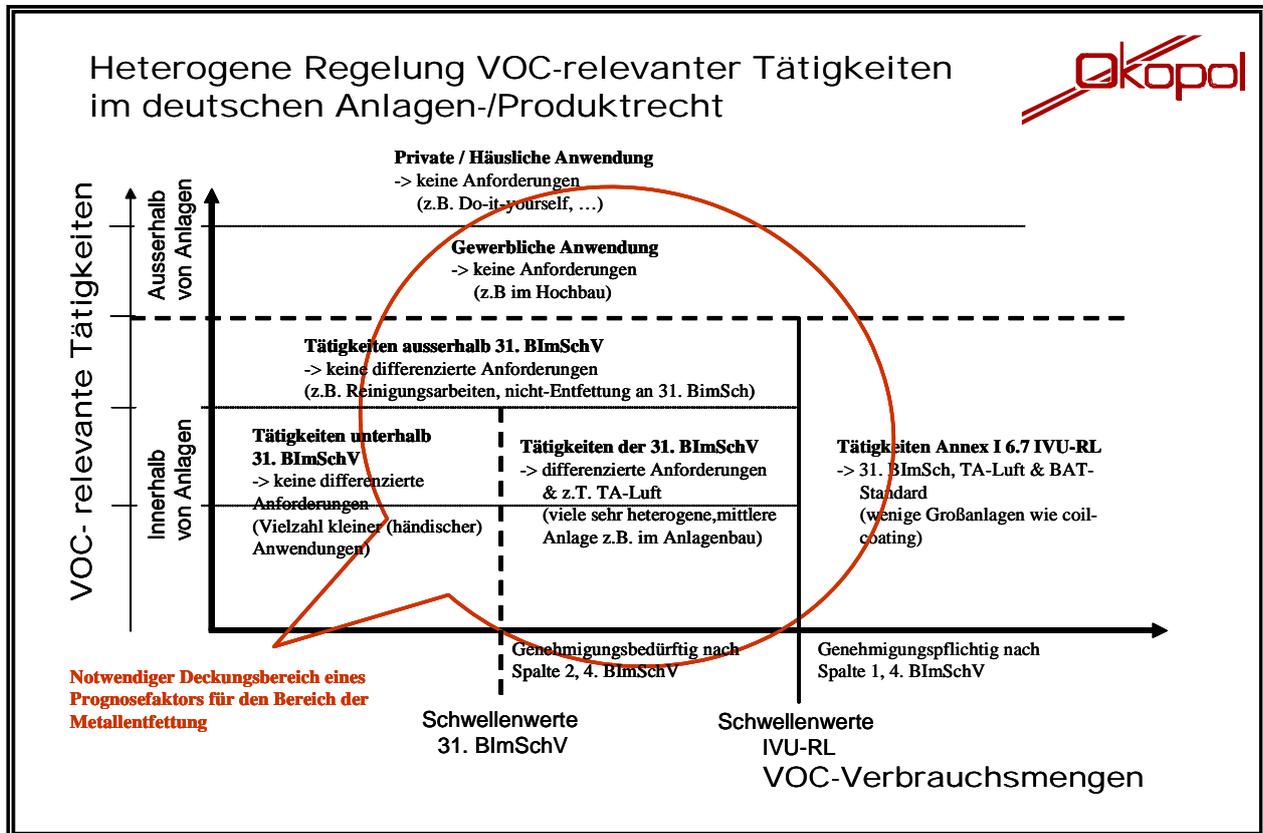
Die folgende Abbildung zeigt schematisch die Problematik der sehr unterschiedlichen Rechtslage in dem von einer Emissionsprognose abzudeckenden Bereich am Beispiel der Metallentfettung.

---

auf kleinere, spezialisierte Teilmärkte, die aufgrund methodischer Inkonsistenzen und nicht kompatibler Abgrenzungen für Quellgruppen oder sectorweite Hochrechnungen kaum geeignet sind. Darüber hinaus handelt es sich überwiegend um sensible Marketing-Daten, die für eine periodische Berichterstattung nicht erschlossen werden können.

<sup>20</sup> Hier ist insbesondere das BREF-Dokument der technischen Arbeitsgruppe zu „surface treatment using solvents“ zu benennen, welches derzeit in der Erarbeitung ist.

Abb. 2 : Inhomogenität der Rechtslage innerhalb eines exemplarischen Quellbereiches



In dem vorgelegten Inventarsystem haben die Gutachter den Versuch unternommen, für jeden der behandelten Quellbereiche diese Problematik einer transparenten und sachgerechten Lösung zuzuführen.<sup>21</sup>

Im Folgenden wird eine generelle Einschätzung der vorstehend angeführten relevanten Regelungen, die bei den Einzelabschätzungen jeweils berücksichtigt wurden, vorgenommen.

Zu 1) In Bezug auf die 31. BImSchV stellen sich bei fast allen Quellbereichen, deren Tätigkeiten von der Richtlinie erfasst werden, die Fragen, welcher Anteil der Anlagen in den Geltungsbereich (d.h. überschreitet die Schwellenwerte)<sup>22</sup> fällt und welchen Lösemittelverbrauch diese Anlagen repräsentieren<sup>23</sup>. Im vorgelegten Konzept ist ein gesondertes Eingabefeld für die hier notwendige Abschätzung der „rechtlichen Reichweite“ vorgesehen.

<sup>21</sup> Im Prognoseblatt finden sich für die verschiedenen Quellbereiche jeweils entsprechende Kommentare an den angesetzten Prognosefaktoren.

<sup>22</sup> Eine Umfrage bei den für die Umsetzung der 31. BImSchV Verantwortlichen in den Bundesländern im Juli/August 2003 zeigte, dass dort bislang keine belastbaren Informationen zum Anlagen-Register vorliegen.

<sup>23</sup> Wie auch bei der Abschätzung der Emissionsfaktoren ist dies die dominierende Unsicherheit bei der Wirkungsprognose der gesetzlichen Veränderungen, insbesondere in heterogenen und emissionsrelevanten Bereichen, wie z. B. der „sonstigen industriellen Lackierung SNAP 60108“.

Daneben muss deutlich unterschieden werden zwischen Tätigkeitsbereichen, in denen die normativen Anforderungen der 31. BImSchV (Grenzwerte) heute bereits weitestgehend eingehalten werden<sup>24</sup> und Tätigkeitsbereichen, die diese Anforderungen heute noch nicht erfüllen, und Bereichen, in denen über die Breite der betroffenen Anlagen noch massive Anstrengungen unternommen werden müssen.

Während im ersten Bereich de facto keine durch die 31. BImSchV induzierten Minderungen anzusetzen sind, wurde für den zweiten Bereich angenommen, dass sich die Emissionsminderung in der Praxis an den Grenzwerten für die diffusen Emissionen bzw. den anforderungsgleichen Zielvorgaben der Reduzierungspläne orientiert. In Bereichen, in denen keine detaillierteren Informationen vorliegen, wurde deshalb zwischen 2001 und 2010 eine Emissionsminderung von ca. 30% angesetzt.<sup>25</sup> Von dieser Regelvorgabe wurde in einzelnen Bereichen, in denen bereits eine höhere Erfüllung der normativen Anforderungen oder besonders deutliche Umsetzungsanforderungen bekannt sind, abgewichen.

Zu 2) Der IVU-RL und den derzeit in Erarbeitung befindlichen BREF-Dokumenten zum BVT Standard für Anlagen zur Oberflächenbehandlung mit organischen Lösungsmitteln wird keine eigenständige Minderungswirkung zugeordnet.

Zu 3) Der Decopaint-RL wird für den Bereich der Kfz-Reparaturlackierung kein über die 31. BImSchV hinausgehende Minderungswirkung zugeordnet, da die deutsche Umsetzung der Lösemittel-RL bereits einen Schwellenwert von > 0 t/a vorgegeben hat. Im Bereich der „Dekor-Lackierungen“ werden für den Baubereich und den Bereich der nicht in Anlagen stattfindenden Metalllackierungen jeweils Minderungen von ca. 20% angesetzt, allerdings erst für den Zeitraum von 2005 bis 2010 (zulässige VOC-Höchstmengen gelten in Stufen ab den Jahren 2007 und 2010).

Zu 4) Den Aktivitäten unterhalb der Bauproduktenrichtlinie werden aufgrund fehlender Zuordnungsdaten derzeit keine Minderungseffekte zugerechnet.

Insbesondere in Quellbereichen die nicht direkt von rechtlichen Auflagen erreicht werden, sowie für Bereiche in denen die rechtlichen Auflagen derzeit keine weitere Minderungen erzwingen, sind dennoch aufgrund technischer Entwicklung, marktinduzierter Anforderungen sowie proaktivem Handel von Herstellern emissionsmindernde Effekte erkennbar.<sup>26</sup> Diese werden als eigenständige Entwicklungen in einem zusätzlichen Indexfeld erfasst und berücksichtigt.

Die folgende tabellarische Aufstellung zeigt nochmals die verschiedenen im vorliegenden Konzept berücksichtigten Prognosefaktoren die für jeden Quellbereich angesetzt werden im Überblick.

Tab. 4 : Faktoren für die Entwicklungsprognosen der NMVOC-Emissionen

Quellbereich	(Basis-) Aktivitäten		Emissions-Situation		Gesamt-Faktor
	Prognos-Aktivitätsfaktor	Spezifische Bereichsaktivität	Gesetzlich induzierte Minderung	eigenständige Minderungen	Prognose Indexfaktor
SNAP .....			Erfasster Anteil	Minderung	

<sup>24</sup> Beispiele hierfür sind: Anlagen nach Anhang I, Nr. 1.1 Illustrationstiefdruck, Nr. 17 Extraktion von Pflanzenöl oder tierischem Fett, Nr. 4.1 Fahrzeugserienlackierung KFZ oder die Nr. 19 Herstellung von Arznei-Mitteln.

<sup>25</sup> Die Praxiserfahrungen der Autoren selbst und einer Vielzahl anderer derzeit mit der Umsetzung der 31. BImSchV befassten Experten zeigen, dass die meisten Anlagen (die die Grenzwerte nicht bereits unmittelbar erfüllen) eng bei dem 1,5 fachen Zielwert der speziellen Reduzierungspläne nach Anhang IV liegen, den sie formal erst im Jahr 2005 erreichen müssten. Andererseits kann damit gerechnet werden, dass der rechtliche Vollzug etwas verzögert verläuft, so dass erst 2008- 2010 eine weitgehende Konformität mit den Zielemissionen erreicht sein wird, die formal bereits 2007 erreicht werden müssten.

<sup>26</sup> Ein Beispiel hierfür ist z. B. die deutliche Reduktion von VOC-Einsätzen im Bogenoffset-Druck. Seit 1990 wurden hier durch Substitution der verwendeten Reinigungsmittel sowie durch eine technologisch unterstützte Minderung der Alkoholzusätze im „Wischwasser“ spezifische Emissions-Minderungen von ca. 50% erreicht.

Mit dem ermittelten Gesamt-Faktor werden die Emissionswerte des jeweiligen Basisjahres (z. B. aktuelle für 2001) hochgerechnet. Die Summation dieser Hochrechnungswerte über die Quellbereiche ergibt dann den Emissionsprognosewert für das jeweilige Prognosejahr. Diese Methodik entspricht damit vollständig den skizzierten Anforderungen der in Frage stehenden Berichtspflichten, insbesondere auch in Hinblick auf Vollständigkeit und Transparenz.

## 3 Evaluation

### 3.1 Zielsetzung & Vorgehen

Auftragsgemäß sollte im Rahmen des vorliegenden Vorhabens eine Evaluation der – auf Basis des UFOPLAN-Vorhabens 295 42 628 „Ermittlung der Lösemittlemissionen 1994 in Deutschland und Methoden zur Fortschreibung“ vom Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) – erarbeiteten Methodik (im Folgenden IER-Methode) für ein nationalstaatliches NMVOC-Inventar erfolgen.

Ziel des Gesamtvorhabens war es allerdings, nicht nur Schwachstellen in der vorliegenden Methodik zur Berechnung der NMVOC-Emissionen zu identifizieren, sondern vielmehr eine konkrete weitere Optimierung des Inventar-Systems zu erarbeiten. Aus diesem Grund wurde die Methodenevaluation jeweils direkt mit einer Optimierungsprüfung gekoppelt.

Bei Schwachstellen und Optimierungsprüfung wurde prinzipiell nach den folgenden Schritten vorgegangen, wobei sich in der Praxis zeigte, dass die Schritte 2 und 3, gerade in Hinblick auf eine mögliche Optimierung, sehr eng miteinander verzahnt sind:

1. Die Grundmethodik
2. Die Methodik für die einzelnen Quellbereiche
3. Einzelne Faktoren oder Abschätzungen innerhalb der Berechnungen für die einzelnen Quellbereiche

Als mögliche Schwachstellen wurde dabei im Kontext mit den in Kap. 2.1 aufgeführten „Qualitätsanforderungen“ der internationalen Berichtspflichten insbesondere auf die folgende Aspekte geachtet:

- Ausblendung oder Doppelzählungen von emissionsrelevanten Lösemittleinsatzmengen
- Ungenügende Transparenz der angewendeten Methode zur Emissionsberechnung
- Die Nicht-Fortschreibbarkeit von emissionsrelevanten und im Zeitlauf veränderlichen Strukturinformationen oder Emissionsfaktoren
- Berücksichtigung von Emissionen, die nicht in den Bereich der Kategorie 3 fallen

Unter dem Blickwinkel der im Projektkontext zu leistenden „Werkzeugentwicklung“ für die effiziente Bedienung der zukünftig periodisch wiederkehrenden Berichtspflichten wurde darüber hinaus auch der Frage der „Fortschreibbarkeit“ eine hohe Bedeutung beigemessen. Dabei war besonders die Problematik der Nicht-Fortschreibbarkeit emissionsrelevanter und im Zeitlauf veränderlicher Strukturinformationen oder Emissionsfaktoren zu beachten.

### 3.2 Prüfung & Optimierung der Grundmethodik

#### 3.2.1 Beschreibung

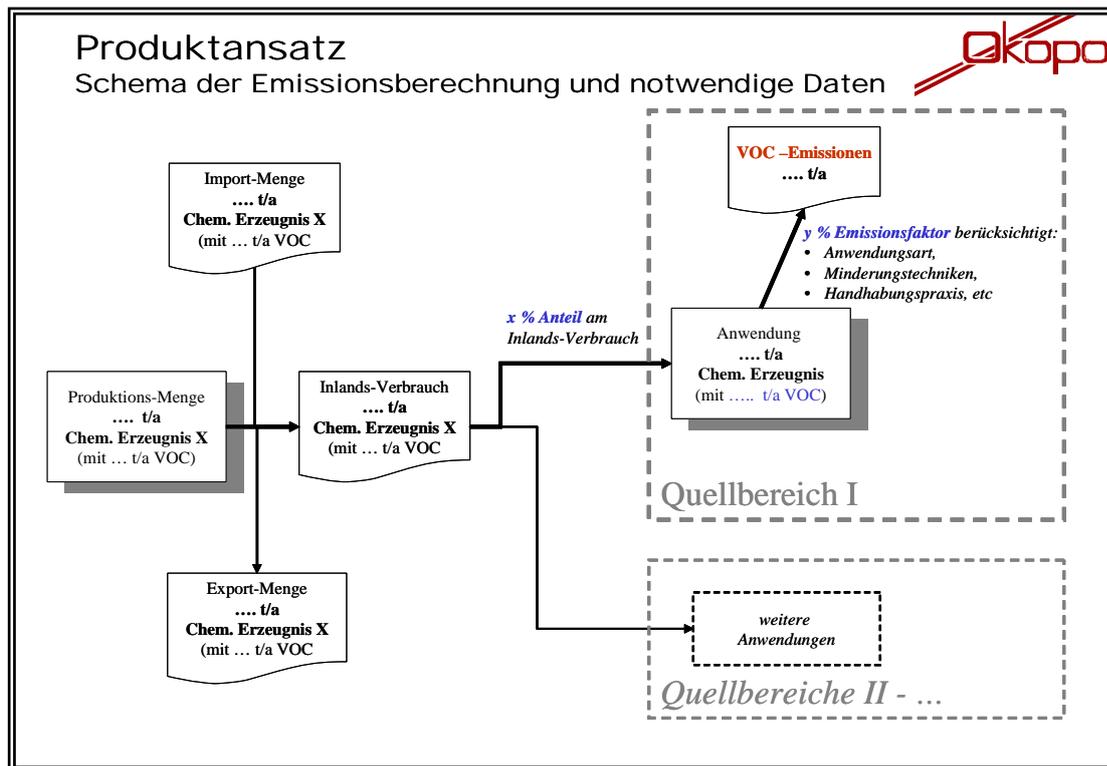
Bei der IER-Methodik handelt es sich um einen verwendungsorientierten Ansatz der Emissionsberechnung. Dabei werden die NMVOC-Mengen, die über lösemittelhaltige Produkte<sup>27</sup> in die zu be-

<sup>27</sup> Das IER spricht aus diesem Grunde auch von einem „Produktansatz“ in Unterscheidung zum prinzipiell auch möglichen „Lösemittelansatz“, bei dem direkt die Lösemittelverwendung betrachtet wird.

trachtenden Quellbereiche eingetragen werden, ermittelt und über jeweils speziell angepasste Emissionsfaktoren die Emissionsmengen ermittelt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt diese Methodik schematisch.

Abb. 3: Schematische Darstellung der Emissionsberechnung auf Basis des Verwendungsansatzes



Die Emissionsberechnung auf Basis des Verwendungsansatzes wird in den IPCC Guidelines<sup>28</sup> unter der Bezeichnung „consumption-based emissions estimating“ explizit als eine von zwei üblicherweise für die Emissionsberechnung der Kategorie 3 anzuwendenden Methoden angeführt.<sup>29</sup>

Diese Methodik erfordert für jeden der betrachteten Quellbereiche die Kenntnis über:

- die im jeweiligen Berichtsjahr eingesetzte Menge an VOC-haltigen (Vor)-Produkten und Hilfsstoffen;
- die VOC-Gehalte dieser Produkte und Stoffe;
- die konkreten Anwendungs- und damit Emissionsbedingungen.

In Hinblick auf die Emissionsbedingungen sind dabei insbesondere die VOC-Mengenanteile, die über Produkte oder Abfälle „gefasst“ ausgetragen werden, zu bestimmen. Bei den verbleibenden und damit im Regelfall verdunstenden Mengen ist zu betrachten, welcher Anteil von ihnen durch abluftseitige

<sup>28</sup> Hier das Reference Manual, Chapter 3, revised 1996

<sup>29</sup> Als zweite Methode wird dort das „production-based emissions estimating“ aufgeführt. Dabei handelt es sich um eine Indexwerthochrechnung von Basisaktivitäten, also z. B. die Berechnung der NMVOC-Emissionen der Automobilfertigung über Emissionsfaktoren pro Fahrzeug.

„Sekundärmaßnahmen“ erfasst und zerstört (bzw. zurück gewonnen) wird.

### 3.2.2 Bewertung

Die vorliegende Methodik auf Basis des Verwendungsansatzes erfordert für ihre sachgerechte Entwicklung ein hohes Maß an Fachkompetenz für sehr unterschiedliche Quellbereiche sowie eine Vielzahl von Einzelinformationen für eine qualitativ hochwertige Fortschreibung.

Für jedes Berichtsjahr sind sämtliche VOC-haltigen Verwendungsmengen zu erfassen und den verschiedenen Quellbereichen zuzuordnen. Darüber hinaus müssen in kurzen Intervallen (mindestens alle 2-3 Jahre) die Strukturinformationen, wie durchschnittliche Lösemittelgehalte, Emissionsfaktoren u. ä. überprüft und angepasst werden. Gleiches gilt für die Bewertung der Unsicherheiten und die Fortschreibung der Prognosefaktoren.

Pflege und Fortschreibung des Systems stellen somit einen relevanten Aufwand dar, der im Kontext mit dem nationalen System der Emissionsberichterstattung zu sehen ist.

Trotz dieses Aufwandes bleibt auch ein solches System der Emissionsberechnung „unscharf“. Es muss mit gemittelten Lösemittelgehalten, qualitativ beschriebenen Anwendungsbedingungen sowie abgeschätzten Ausstattungs- und Wirkungsgraden der Emissionsbegrenzung arbeiten. Es wird damit immer nur eine Annäherung an die Realität darstellen (wenngleich im Optimalfall, unter gesetzten Aufwand-/ Nutzenrelationen, auch der bestmöglichen). Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse in Fachdebatten und der politischen Diskussion jeweils zu beachten und im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtungen explizit zu bewerten.

Nach intensiver Prüfung alternativer Emissionsberechnungsmethoden erscheint der Verwendungsansatz aus Sicht der Gutachter – auch unter Würdigung der vorstehenden „Herausforderungen“ – eindeutig als die am besten geeignete Methode, um die gesteckten Berichtsanforderungen zu erfüllen.

Höher aggregierte Methoden, wie der – auch in den IPCC Guidelines aufgeführte – Aktivitätsansatz, bei dem sektorbezogene Emissionsfaktoren mit der Sektoraktivität verrechnet werden, sind aus zwei Gründen problematisch:

1. Sie sind intransparent, da die Emissionsfaktoren naturgemäß eine so große Zahl von Einflussgrößen erfassen müssen, dass Einfluss und Ausprägung der Einzelfaktoren für eine Sachdiskussion nicht mehr zugänglich sind.
2. Sie sind nur begrenzt „automatisch“ fortschreibbar, da strukturelle Veränderungen innerhalb der betrachteten Sektoren nicht erfasst werden und damit jeweils eine Neuermittlung der Emissionfaktoren notwendig machen.

Methoden, die noch stärker disaggregiert, also auf die Ebene der Einzelquellen bzw. sehr gleichartiger Quellen „herunter gebrochen“ sind, sind dagegen zumindest mit den beiden folgenden Hindernissen behaftet:

1. Mangelnde Datenverfügbarkeit auf Ebene von Einzelquellen.  
Selbst wenn eine vollständige Umsetzung der anlagenbezogenen Emissionsberichtsanforderungen (einschl. einer 100%igen Abforderung und auswertbaren Erfassung sämtlicher Lösemittelbilanzen nach 31. BImSchV) angenommen würde, würden aufgrund der begrenzten Reichweite dieser Regelungen immer noch unüberbrückbare Lücken zu den Gesamtemissionen verbleiben.
2. Mangelnde Handhabbarkeit der Komplexität.  
Auch bei einer theoretischen Vollerfassung von Emissionquellen würde selbst bei einer Klasterung von Bereichen, die in Hinblick auf die Lösemittelanwendung und die Emissionsbedingungen „gleichartig“ sind, eine so große Anzahl von zu betrachtenden Emissionsbereichen entstehen, dass eine transparente Bearbeitung mit vertretbarem Aufwand nicht machbar erscheint.

Der Verwendungsansatz wurde nach dieser Bewertung, in Abstimmung mit dem Auftraggeber, im Rahmen der Methodenoptimierung weiter beibehalten.

Bevor für die einzelnen Quellbereiche die Evaluationsergebnisse auf den Ebenen 2 und 3 dargestellt werden, wird im Folgenden noch auf zwei Problemkreise eingegangen, die in den meisten Quellbereichen relevant und damit Teil der grundlegenden Methodik sind.

### 3.2.3 Problematik der Statistischen Basis-Systeme

Das Statistische Bundesamt veröffentlicht unterschiedliche Statistiken, die in einem NMVOC-Emissionsinventar teilweise als Basisdaten für die Berechnung der NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelverwendung benutzt werden können.

Dabei handelt es sich um:

1. Die Produktionsstatistik mit der GP-Systematik<sup>30</sup> für Produktgruppen (erscheint monatlich)
2. Die Außenhandelsstatistik mit der WA-Nummerierung verschiedener Handelsgüterklassen (erscheint monatlich)
3. Weiterhin enthalten die Zuordnungen der Wirtschaftszweige (WZ)<sup>31</sup> und der Produktionsindex hilfreiche Informationen

Diese statistischen Basisdaten erfassen sowohl den Geldwert als auch die Menge produzierter und ausgeführter Güter. Damit ist es prinzipiell möglich, den Verbrauch bestimmter Produktgruppen innerhalb Deutschlands zu bestimmen (Inlandsverbrauch). Es treten allerdings regelmäßig zwei Problembereiche auf:

1. Verknüpfung von Produktions- und Handelsstatistik:  
Zwischen der GP-Systematik innerhalb der Produktionsstatistik und den WA-Nummern der Handelsstatistiken besteht kein eindeutiger systematischer Bezug. In der Praxis finden sich sowohl 1:1 als auch 1:n, n:1 sowie n:n Beziehungen. In der Konsequenz bedeutet dies, dass bei der Bestimmung des Inlandsverbrauches einer bestimmten Produktgruppe nach GP-Systematik häufig die gemeinsame Auswertung mit weiteren Produktgruppen notwendig wird, um dann auf einer höheren Aggregationsebene die Import-Export Korrektur vorzunehmen. In einem weiteren Schritt ist dann Disaggregation durchzuführen, die zu einer gemittelten Import-Export Korrektur auf Ebene der Produktgruppe führt. Der über die Aggregation/Disaggregation ermittelte Import-Export Faktor ist naturgemäß mit einer erhöhten Unschärfe behaftet.
2. Fehlender Lösemittelbezug:  
In den meisten Fällen können die Angaben zu einzelnen Gütergruppen nicht eindeutig lösemittelhaltigen Produkten zugeordnet werden. Beispielsweise können sich unter der Bezeichnung „Reiniger“ sowohl lösemittelhaltige als auch nicht-lösemittelhaltige Produkte verbergen. Nur in wenigen Fällen (z. B. bei der Angabe von Produktions- und Außenhandelsmengen von Parfüms) ist die Bezeichnung der Güterart so eindeutig, dass man die Angaben direkt einem lösemittelhaltigen Produkt zuordnen kann.  
Der Einbezug nicht exakt quantifizierter Mengen der Nicht-VOC relevanten Produkte führt zu einer sinkenden Genauigkeit der angesetzten durchschnittlichen Lösemittelgehalte.

Die angeführten systematischen Probleme sind bei der Emissionsberechnung im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtung angemessen zu berücksichtigen.

Eine weitere Unsicherheit besteht in Hinblick auf die Meldegenauigkeit und Einheitlichkeit bei den Produzenten und Handelsunternehmen.

<sup>30</sup> GP2002 ist das „Güterverzeichnis für die Produktionsstatistik 2002“. Diese Systematik gliedert die produzierten Güterarten nach neunstelligen Nummern. Jede dieser Nummern hat eine Bezeichnung. Die Wertangaben aus der Produktionsstatistik werden für diese GP Nummern gemacht. Diese Klassifikation ist nicht mit derjenigen für die Erhebung zur Außenhandelsstatistik gleichzusetzen. Für den Außenhandel werden die Güter nach dem Warenverzeichnis für die Außenhandelsstatistik gegliedert (WA Nummern). Zwischen beiden Systematiken gibt es eine Zuordnungssystematik.

<sup>31</sup> Betrieben wird nach ihrer Haupttätigkeit vom jeweiligen Statistischen Landesamt eine WZ Nummer (Wirtschaftszweige) zugeordnet (entspricht NACE).

Sowohl die Zuordnung von produzierenden Betrieben zu den verschiedenen Wirtschaftszeigen als auch die dort dann verwendeten GP- und WA-Nummern sind nicht in allen Fällen sachlich eindeutig. Darüber hinaus sind diese Zuordnungen vielfach historisch gewachsen, von gänzlich anders gelagerten Interessen (wie Zollrecht oder Steuerbelastungen u. ä) geprägt und nicht permanent Gegenstand einer fachlichen Überprüfung. Dadurch ist es durchaus möglich, dass über eine lange Zeit Fehlmeldungen in den veröffentlichten Statistiksyste men verarbeitet werden.

Eine durch die Recherchen und Branchendiskussionen im Projektrahmen ausgelöste Nachrecherche des VCI beim statistischen Bundesamt führte zur Identifikation einer Fehlmeldung von mehr als 100.000 t/a, die nach der aktuellen sachbezogenen Zuordnung dieser Produktmenge nicht mehr als lösemittelrelevant im Sinn der Kategorie 3 (und mit hoher Wahrscheinlichkeit auch nicht als emissionsrelevant) anzusehen ist.

### 3.2.4 Problematik der Einbindung von Detailinformationen

Für viele der zu betrachtenden Quellgruppen liegen in der veröffentlichten Literatur, aber insbesondere auch aus der betrieblichen Beratungs- und Überwachungspraxis, eine Vielzahl von Einzelinformationen auf der Ebene einzelner Betriebe oder einzelner Produktgruppen vor.<sup>32</sup>

Aus diesem Grund taucht in den Fachdiskussionen zum Inventar-System mit Anlagenbetreibern und Herstellern vielfach die Frage auf, warum diese Informationen nicht unmittelbar im Inventar verwendet werden. So nahe liegend dieser Gedanke ist, so sehr blendet er aus, dass selbst beim Vorliegen einer sehr gut abgesicherten Datenbasis für eine große Zahl von Anlagen oder Produkten die Einbindung dieser Informationen in das Gesamtinventar jeweils eine Abschätzung über exakt jenen Teil der Anlagen/Produkte voraussetzt, über den just diese Informationen nicht vorliegen. Erschwerend kommt hinzu, dass in der Praxis der Mengenanteil der Anlagen, für die solche Werte übertragbar wären, bzw. derer, für die die Übertragbarkeit nicht gegeben ist, gerade nicht bekannt ist.

Die angeführten Anmerkungen schmälern nicht die hohe Wichtigkeit der Verfügbarkeit solcher gut verifizierten Einzeldaten für einen sachgerechten Aufbau des Inventarsystems. Dennoch ist eine unmittelbare Einbindung praktisch nie möglich, sondern es ist immer eine mit Abschätzungen verbundene Übertragung auf die Gesamtheit zu erbringen.

Um vor dem Hintergrund dieser Sachlage keine „Scheingenauigkeit“ zu erzeugen, wurden auch in den Bereichen, in denen den Gutachtern größere Zahlen einzelbetrieblicher Detailinformationen vorlagen, jeweils gerundete Abschätzwerte in das neue Inventar eingesetzt. Der Verfügbarkeit und Qualität der Detailinformationen wird im Rahmen der Unsicherheitsbetrachtungen Rechnung getragen.

## 3.3 Evaluation der einzelnen Quellbereiche

Die folgende tabellarische Aufstellung zeigt im Überblick das Gesamtergebnis der Evaluation. Dabei wird zum einen auf die in der zukünftigen Methodik verwendeten Datenquellen eingegangen, zum anderen wird eine Kurzbewertung des erzielten Optimierungsergebnisses vorgenommen.

Tab.5: Gesamtüberblick über das Ergebnis von Evaluation und Optimierung

SNAP	Bezeichnung	Zukünftige Datenbasis	Bewertung des Ergebnisses
601	Anwendung von Farben und Lacken		
60101	Herstellung von Fahrzeugen	Grundlegende Neustrukturierung	Sehr gutes Gesamtergebnis (H)
60102	Reparatur von Fahrzeugen		

<sup>32</sup> So verfügt z. B. die Ökopol GmbH selbst aufgrund der bundes- und europaweiten Beratung von Unternehmen in Hinblick auf die Anforderungen der VOC-RL/31. BImSchV über ein umfangreiches Archiv von Lösemittelbilanzen für Unternehmen der verschiedensten Tätigkeitsbereiche.

SNAP	Bezeichnung	Zukünftige Datenbasis	Bewertung des Ergebnisses
60103	Konstruktionen und Gebäude	Jetzt direkte Verknüpfung der Lackartenmengen nach <b>Basis-Statistik</b> mit Lackanwendung nach <b>Verbandsstrukturdaten</b> (VdL) Emissionsfaktoren nach VdL zusätzlich verifiziert	Sehr gute Fortschreibbarkeit
60104	Häusliche Anwendung von Farben und Lacken		Unschärfen im Bereich von 60108
60105	Bandbeschichtung		Deutliche Veränderungen durch Weiterverteilung & Korrektur der sonstigen Verdüner
60106	Schiffsbau		
60107	Holz		
60108	Andere industrielle Anwendung von Farben und Lacken		
60109	Andere nichtindustrielle Anwendungen von Farben und Lacken		
602	Entfettung, Chemische Reinigung und Elektronik		
60201	Metallentfettung	Mengen aus der <b>Basis-Statistik</b> Verteilung auf Anwendungen und Emissionsfaktoren nach <b>Öko-Recherche</b> Schlüsseln  Grundlegende Neustrukturierung für Chemische Reinigungen hier <b>Verbandsdaten</b> für <b>Aktivitätsbezug</b>	Gutes Gesamtergebnis (H)
60202	Chemische Reinigung		Fortschreibbarkeit perspektivisch problematisch
60203	Herstellung von Elektronikkomponenten		Kein einheitlicher & aktiver Branchenakteur (außer bei 60202)
60204	Andere industrielle Reinigung (Feinmechanik, Optik, Herstellung von Uhren)		
603	Herstellung und Verarbeitung von chemischen Produkten		
60301	Verarbeitung von Polyester	<b>Basis-Statistik</b> neue VOC- & Emissionsfaktoren durch Anpassung an IPCC-Anforderung	Gutes Gesamtergebnis (H)
60302	Verarbeitung von Polyvinylchlorid		Fortschreibbarkeit gegeben
60303	Verarbeitung von Polyurethan		Deutliche Korrekturen durch aktuellere Faktoren
60304	Verarbeitung von Polystyrolschaum		
60305	Gummiverarbeitung	<b>Basis-Statistik</b> mit Wertbezug nur für den <b>Reifenbereich</b>	Mittleres Ergebnis mit erhöhter Unsicherheit (L-M) Fortschreibbarkeit gegeben
60306	Herstellung von pharmazeutischen Produkten	Verknüpfung von <b>Basis-Statistik</b> mit <b>Wertbezug</b> und <b>Verbandstatistik</b> & <b>Firmendaten</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben
60307	Herstellung von Farben und Lacken	<b>Basis-Statistik</b> und <b>Verbandsdaten</b> zur VOC-Struktur	Sehr gutes Ergebnis (H) Gute Fortschreibbarkeit Aktualisierte VOC-Mengen & E-Faktoren
60308	Herstellung von Druckfarben und Tinten	<b>Basis-Statistik</b> und <b>Verbandsdaten</b> (VdD) zur VOC-Struktur (außer bei Tinten)	Sehr gutes Ergebnis (H) Gute Fortschreibbarkeit Aktualisierte VOC-Mengen & E-Faktoren
60309	Herstellung von Klebstoffen	<b>Basis-Statistik</b> und <b>Verbandsdaten</b> zur VOC-Struktur	Sehr gutes Ergebnis (H) Gute Fortschreibbarkeit Aktualisierte VOC-Mengen & E-Faktoren
60310	Asphaltverarbeitung und Herstellung	<b>Basis-Statistik</b>	Mäßiges Ergebnis (L-M) Keine aktuellen E-Daten.

SNAP	Bezeichnung	Zukünftige Datenbasis	Bewertung des Ergebnisses
60311	Herstellung von Haftmaterialien, Magnetbändern, Filmen und Photographien	<b>Basis-Statistik</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
60312	Produktion und Verarbeitung von Textilien (Textilveredlung)	<b>Basis-Statistik</b> mit ungenügender Produktarten-Differenzierung, <b>Verbandsdaten</b>	Mittleres Ergebnis (M) Vorschlag wegen geringer Relevanz nicht weiter berücksichtigen
60313	Gerben von Ledermaterialien	<b>Basis-Statistik</b> mit ungenügender Produktarten-Differenzierung, <b>Verbandsdaten</b>	Mittleres Ergebnis (M) Vorschlag wegen geringer Relevanz nicht weiter berücksichtigen
60314	Andere (Feinchemikalienproduktion)	<b>Basis-Statistik</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
604	Andere Anwendungen von Lösemitteln		
60401	Behandlung von Glaswolle	<b>Basis-Statistik</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
60402	Behandlung von Mineralwolle	<b>Basis-Statistik</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
60403	Druckindustrie und andere Druckfarbenanwendungen	<b>Verbandsstatistik (VdD)</b> mit Produktartendifferenzierung Zusätzlich Okopol-Detaildaten	Sehr gutes Ergebnis (H) Fortschreibbarkeit auf Basis der Verbandsdaten möglich, Unschärfe bei Nicht-Verbandsmengen
60404	Extraktion von Ölen und Fetten	<b>Basis-Statistik</b> -Mengen und <b>Verbandsfaktoren</b>	Sehr gutes Ergebnis (H) Fortschreibbarkeit gegeben
60405	Anwendung von Klebstoffen und Haftmaterialien	<b>Basis-Statistik</b> -Mengen und <b>Verbands-Informationen</b> zu Strukturen und Faktoren	Sehr gutes Ergebnis (H) Fortschreibbarkeit gegeben Mengen weitgehend konstant
60406	Anwendung von Holzschutzmitteln	<b>Basis-Statistik</b> mit ungenügender Produktarten Differenzierung	Mäßiges Ergebnis (L-M) Fortschreibbarkeit eingeschränkt
60407	Anwendung von Unterbodenschutz und Konservierung von Fahrzeugen	<b>Basis-Statistik</b> zum Fahrzeugbestand	Eine Erhebung der Daten wäre durch den VdA prinzipiell möglich. Vor Klärung der Verbindlichkeiten mit dem UBA jedoch keine Bereitschaft vorhanden.
60408	Häusliche Verwendung von Lösemitteln (außer der Anwendung von Farben und Lacken)	<b>Basis-Statistik</b>	Daten sind verfügbar und sind auch zugesagt; Daten aus Basisstatistiken (StaBuA) verfügbar.
60409	Entwachsen von Fahrzeugen	Mengen aus der <b>Basis-Statistik</b> Verteilung auf Anwendungen und Emissionsfaktoren nach <b>Öko-Recherche</b> Schlüsseln	Gutes Gesamtergebnis (H) Fortschreibbarkeit perspektivisch problematisch

SNAP	Bezeichnung	Zukünftige Datenbasis	Bewertung des Ergebnisses
60410	Herstellung von pharmazeutischen Produkten		in 60306 erfasst
60411	Häusliche Verwendung von pharmazeutischen Produkten	Wertbezogene <b>Angaben aus Basis-Statistik + Verbandsinformationen</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
60412	Entfernung von Farben und Lacken	<b>Basis-Statistik + Verbandsinformationen</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
	Verwendung von Pflanzenschutzmitteln	<b>Basis-Statistik</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
	Betonzusatzmittel	<b>Basis-Statistik</b> mit ungenügender Produktarten Differenzierung Ergänzende Informationen notwendig aber Verbandsunterstützung ausgesetzt	Nicht ausreichend (L-M)
	Flugzeugenteisung	Einzelinformationen	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Geringe Relevanz
	Anwendung von Treibgasen	<b>Basis-Statistik</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
	Hochschulen	<b>Basis-Statistik</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
	Tabakwarenproduktion	<b>Basis-Statistik</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen
	Wissenschaftliche Laboratorien (F+E, Prüfung, nicht an Hochschulen)	<b>Basis-Statistik</b>	Mittleres Ergebnis (M) Fortschreibbarkeit gegeben Wenig Veränderungen

## 4 Das EDV-gestützte Inventar-System

### 4.1 Zielsetzungen

Wie bereits im Kapitel 1 ausgeführt, wurde gemeinsam mit dem Auftraggeber in einer frühen Projektphase festgelegt, die notwendigen Verknüpfungs- und Rechenoperationen zur differenzierten NMVOC-Emissionsermittlung unmittelbar in einem EXCEL-basierten Inventar-System vorzunehmen.

Diese Entscheidung erfolgte mit zwei Zielsetzungen:

- Zum einen konnte so projektbegleitend ein „Werkzeug“ erarbeitet werden, welches den Fachmitarbeitern des Umweltbundesamtes auch zukünftig bei der Ermittlung und Fortschreibung der NMVOC-Emissionen zur Verfügung steht.
- Zum anderen lassen sich die Algorithmen der mehrstufigen Verknüpfungen von Produkt- und Lösemittelmengen sowie ihre Verteilung auf unterschiedlichste Anwendungsbereiche und dergl. auf diese Art und Weise sehr viel besser nachvollziehbar dokumentieren.

### 4.2 Aufbau

Vom Grundkonzept her handelt es sich bei dem entwickelten Inventar-System um eine EXCEL-Arbeitsmappe, die 12 verknüpfte Arbeitsblätter sowie 2 weitere Arbeitsblätter mit ergänzenden Informationen umfasst.

Die Arbeitsmappe enthält das komplette Emissions-Inventar für ein konkretes Berichtsjahr sowie zwei Prognosejahre. Für kommende Berichtsjahre ist die komplette Arbeitsmappe zu duplizieren und es sind die aktuellen Eingabewerte zu erfassen.

Entsprechend den zu bedienenden Berichtspflichten ist das Inventarsystem im Kern, entlang der vier Subkategorien sowie darunter, nach den einzelnen SNAP-Codes gegliedert.

#### 4.2.1 Gesamt-Ergebnis

Unter dem Namen „Gesamt-Ergebnis“ findet sich ein Blatt, auf dem für alle Sub-Kategorien 3A-3D die berichtsrelevanten Informationen zusammenfassend dargestellt und zu dem ebenfalls zu berichtenden Gesamtergebnis der Kategorie 3 aggregiert werden. Das Blatt entspricht in seinem Aufbau damit den im Kapitel 2 dargestellten Berichtsformularen.

#### 4.2.2 Main-Blätter

Für jede der vier Sub-Kategorien 3A-3D existiert ein so genanntes „main“ Blatt. Auf diesem Blatt werden für alle in dieser Sub-Kategorie enthaltenen SNAP-Gruppen die Einzelergebnisse in differenzierter Form dargestellt. Neben den Emissionswerten für die SNAPS sind dies auch die Produkt- und Lösemittelsatzmengen, die durchschnittlichen Lösemittelgehalte und die angesetzten Emissionsfaktoren (nur bei einzelnen SNAP Gruppen, in denen abweichende Methoden der Emissionsberechnung angewendet werden, fehlen teilweise einzelne dieser Informationen).

Auf den „main“-Blättern sind zusätzlich zu allen Eingangswerten der Emissionsberechnung auch die Werte des Expert-Judgements zur Unsicherheitsbetrachtung dargestellt. Außerdem sind die SNAP-code bezogenen Prognosefaktoren und die damit ermittelten Emissionsprognosen enthalten.

Die „main“-Blätter enthalten somit alle Informationen, die für die transparente Diskussion der im Inventar erfassten Emissionssituation notwendig sind.

#### 4.2.3 Nebenrechnungs-Blätter

Zu jedem „main“-Blatt gibt es mindestens ein Nebenrechnungsblatt. Auf diesen Nebenrechnungsblättern werden jeweils die Eingaben für die Mengenwerte aus Produktions- und Handelsstatistik sowie fallweise die Werte aus Branchenstatistiken erfasst.

Durch die entsprechend hinterlegten Verknüpfungen dieser Eingabegrößen miteinander und mit hinterlegten Struktur- und Faktorwerten werden auf diesen „Nebenrechnungs“-Blättern die Eingangsgrößen für die Emissionsberechnung auf den „main“-Blättern ermittelt.

Je nach Struktur der Verknüpfungs-Operationen erfolgen diese Nebenrechnungen entweder für mehrere SNAP-Gruppen gemeinsam (z. B. im Bereich der SNAP-Gruppen 60101 – 09) oder aber SNAP-Gruppe für SNAP Gruppe getrennt (z. B. im Bereich der SNAP-Gruppen 60301 – 60314).

Da die Sub-Kategorie 3D bereits über ein sehr differenziertes Nebenrechnungsblatt verfügt, sind dort für den Bereich des SNAP 60403 „Druckanwendungen“ und den SNAP 60408 „Häusliche Anwendung“ jeweils eigene zusätzliche Nebenrechnungs-Blätter eingefügt worden, die umfangreiche Berechnungen auf Basis öffentlicher und brancheninterner Statistiken enthalten.

#### **4.2.4 Blatt Prognose-Faktoren**

Auf dem Blatt „Prognosefaktoren“ erfolgt für alle SNAP-Gruppen die Eingabe der verschiedenen Prognosefaktoren sowie die Errechnung des jeweiligen Gesamtprognose-Indexwertes. Bei besonderen Faktoreinträgen sind jeweils Kommentare eingefügt, die das Vorgehen bei der Faktorsetzung erläutern bzw. die entsprechende Quelle identifizieren.

#### **4.2.5 Die Hilfs-Blätter**

Ergänzend zu den vorstehend skizzierten verknüpften Rechen-Blättern sind in der Arbeitsmappe noch drei ergänzende „Hilfs“-Blätter enthalten.

Das „Farbkennungs“-Blatt enthält die Darstellung der im Inventar-System einheitlich verwendeten Farbkennungen, die eine einfachere Orientierung, Bedienung und Fortschreibung des Systems unterstützen sollen.

Das „Notwendige Dokumente“- Blatt enthält alle für eine Fortschreibung des Inventars benötigten Dokumente und Datenquellen mit ihrer Zuordnung zu den verschiedenen Sub-Kategorien sowie dem jeweiligen Fortschreibungsturnus, sofern es sich nicht um Basis-Mengengrößen (wie z. B. die jährliche Produktionsmenge eines lösemittelrelevanten Produktes), sondern um Struktur-Informationen (wie z. B. den Anteil VOC-freier Produkte in bestimmten Anwendungsbereichen) handelt.

Das „Kontakte“-Blatt enthält eine Zusammenstellung der Kontaktadressen von Institutionen und Personen, die an der Erarbeitung des vorliegenden Inventars beteiligt waren und die für die Diskussion von Anpassungen und Veränderungen im Rahmen der Fortschreibung des Systems relevant sind.

### **4.3 Bedienungshinweise**

#### **4.3.1 Installation**

Da es sich bei dem EDV-gestützten Inventar um verknüpfte EXCEL-Arbeitsblätter handelt, werden an die Hardware- und Software-Ausstattung des Rechnersystems lediglich die Anforderungen „normaler“ Bürokommunikations-Software gestellt, d. h. es muss sich um ein System handeln, auf dem eine aktuelle EXCEL-Version und die üblichen Standard-Schriften des Betriebssystems Microsoft Windows installiert sind.

Die Datei mit den zusammengefassten Arbeitsblättern kann in ein beliebiges Verzeichnis des Rechners kopiert werden. Da in den Arbeitsblättern bewusst keine weitergehenden Schutzmechanismen gegen das Überschreiben von Formeln u. ä. installiert wurden, um den Charakter des Arbeitswerkzeuges nicht zu schmälern, sollte aus Sicherheitsgründen vor der Benutzung immer eine Ursprungs-version der Datei an einem gesonderten Speicherort abgelegt werden.

### 4.3.2 Benutzung

Das System kann für eine Reihe verschiedener Zwecke verwendet werden:

- Für das Betrachten der VOC-relevanten IST-Daten in den einzelnen Sub-Kategorien oder in einzelnen Quellbereichen sowie für die detaillierte Nachverfolgung der jeweiligen Berechnungswege.  
Dabei ist es am sinnvollsten, von den Berechnungsergebnissen im jeweiligen „main“-Blatt auszugehen und im Fall komplexerer Nebenrechnungen den in den blau unterlegten „Importfeldern“ hinterlegten Formelverweisen in die entsprechenden Nebenrechnungen zu folgen. Alle Berechnungen enden immer in den rot unterlegten Eingabefeldern für die „Basis-Eingangsgrößen“.
- Für das „Durchspielen der Auswirkungen von Veränderungen an den „Struktur-Eingangsgrößen“ wie z. B. Lösemittelgehalt oder Emissionsfaktor.  
Diese strukturbildenden Größen sind in den lila unterlegten Feldern abgelegt und können dort direkt überschrieben werden. Allerdings sollte vor dem Durchspielen der Veränderung mehrerer Größen jeweils eine Kopie des bestehenden Inventars abgelegt werden (siehe oben), da es im Normalfall leichter ist, später wieder auf diese Basisversion zurück zu greifen, als alle Veränderungen korrekt rückgängig zu machen.
- Für das Fortschreiben des Inventarsystems an eine veränderte Erkenntnislage oder für ein neues Berichtsjahr.  
Für die Fortschreibung des Inventars wird am besten eine einfache Kopie der vorhergehenden Version erstellt, die mit einem eindeutigen Namen, also z. B. dem Bezugsjahr und dem Datum der Aktualisierung, versehen ist. In dieser neuen Datei können dann direkt die neuen Eingangsgrößen eingetragen werden. Bei solchen in die rot oder lila unterlegten „Engabe“-Felder einzutragenden Größen besteht keine Gefahr, dass versehentlich Verknüpfungen oder Rechenformeln überschrieben werden. Sollen hingegen neue Verknüpfungen (in den andersfarbigen Feldern) eingefügt werden, so sollte mit großer Sorgfalt jeweils zuvor geprüft werden, welche Verknüpfungen bestehen, die ggf. wieder eingerichtet oder verändert werden müssen. Für die Fortschreibung (ohne Veränderung der Grundstrukturen) werden nachfolgend noch speziellere Hinweise gegeben.

### 4.3.3 Fortschreibung

Bei der periodischen Fortschreibung des Inventars für ein neues Berichtsjahr sind, wie bereits erwähnt, alle „Basis-Eingangsgrößen einzugeben. In der Regel handelt es sich in den meisten Quellbereichen dabei zunächst um Mengendaten aus der Produktions- und Handelsstatistik, für die immer die vollständige GP- oder WA-Nummern angegeben sind. In allen Fällen, in denen abweichende Eingangsgrößen verwendet werden, ist dies durch entsprechende Feldbezeichnungen und Kommentarfelder kenntlich gemacht.

Die Reihenfolge der Eingabe der Basisdaten ist belanglos. Allerdings bestehen aufgrund der Wechselbeziehungen z. B. zwischen der privaten und der industriellen Anwendung von Reinigungsmitteln Verknüpfungen zwischen allen Sub-Kategorien, so dass durch das Inventar tatsächlich erst eine vollständige Fortschreibung gewährleistet ist, wenn alle rot unterlegten Eingabefelder neu gefüllt wurden.

Anders verhält es sich bei den - lila unterlegten - die Struktur beeinflussenden Eingangsgrößen. Diese können und sollten auf den jeweils aktuellen Stand der Erkenntnisse angepasst werden, bei fehlenden aktualisierten Daten können sie aber auch unverändert übernommen werden, ohne dass Inkonsistenzen im System auftreten.

In der nachfolgenden Tabelle 6 werden für alle SNAP-Bereiche jeweils nochmals die notwendigen Basis-Eingaben sowie ggf. wünschenswerte Zusatzeingaben mit ihren Datenquellen benannt. Die vollständigen Angaben zu den einzelnen in dieser Checkliste erwähnten Datenquellen finden sich im „Notwendige-Dokumente“-Blatt im Inventar-System selbst.

Tab.6: Checkliste zur Fortschreibung des Inventars

SNAP97	Emittentengruppe	Anleitung zur Fortschreibung
<b>060100</b>	<b>Anwendung von Farben und Lacken</b>	
060101	Herstellung von Fahrzeugen	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar, Emissionsfaktoren, Kontaktierung Verband der Lackindustrie e.V. (VdL), <a href="http://www.lackindustrie.de/">http://www.lackindustrie.de/</a> , zu Allokation der Verbräuche
060102	Reparatur von Fahrzeugen	
060103	Konstruktionen und Gebäude	
060104	Häusliche Anwendung von Farben und Lacken	
060105	Bandbeschichtung	
060106	Schiffsbau	
060107	Holz	
060108	Andere industrielle Anwendung von Farben und Lacken	
060109	Andere nichtindustrielle Anwendungen von Farben und Lacken	
<b>060200</b>	<b>Entfettung, Chemische Reinigung und Elektronik</b>	
060201	Metallentfettung	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar
060202	Chemische Reinigung	1) Eintragen der CKW-Frischwarenstatistik in das Inventar 2) Eintragen der Daten des DTV, <a href="http://www.dtv-bonn.de/">http://www.dtv-bonn.de/</a> 3) Periodisch (z. B. alle 3 Jahre) Kontaktierung des DTV wegen Emissionsfaktoren
060203	Herstellung von Elektronikkomponenten	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar
060204	andere industrielle Reinigung (Feinmechanik, Optik, Herstellung von Uhren)	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar
<b>060300</b>	<b>Herstellung und Verarbeitung von chemischen Produkten</b>	
060301	Verarbeitung von Polyester	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar; Prüfen des Emissionsfaktors (Gesamtverband Kunststoffverarbeitende Industrie - AKV-TV)
060302	Verarbeitung von Polyvinylchlorid	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar
060303	Verarbeitung von Polyurethan	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar, Anteil an Hart- und Weichschäumen prüfen
060304	Verarbeitung von Polystyrolschaum	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar

SNAP97	Emittentengruppe	Anleitung zur Fortschreibung
060305	Gummiverarbeitung	Ermittlung des Geldwertes der in Deutschland im Bezugsjahr verbrauchten Gummiwaren; Quelle Statist. Jahrbuch
060306	Herstellung von pharmazeutischen Produkten	Produktionswert der in Deutschland produzierten Arzneimittel beim Bundesverband der pharmazeutischen Industrie (Jahresbericht), zu recherchieren unter <a href="http://www.bpi.de/internet/">http://www.bpi.de/internet/</a>
060307	Herstellung von Farben und Lacken	Keine Datenrecherche notwendig, ergibt sich aus anderen Eingaben automatisch
060308	Herstellung von Druckfarben und Tinten	Keine Datenrecherche notwendig, ergibt sich aus anderen Eingaben automatisch
060309	Herstellung von Klebstoffen	Keine Datenrecherche notwendig, ergibt sich aus anderen Eingaben automatisch
060310	Asphaltverarbeitung und Herstellung	Mineralölwirtschaftsverband e.V., Jahresstatistik, Gesamtproduktionsmenge Bitumen, <a href="http://www.mwv.de/">http://www.mwv.de/</a>
060311	Herstellung von Filmen und Photographien	Chemiewirtschaft in Zahlen, <a href="http://www.vci.de/">http://www.vci.de/</a> , Produktionsindex "sonstige Chemische Industrie"
	Herstellung von Magnetbändern	Chemiewirtschaft in Zahlen, <a href="http://www.vci.de/">http://www.vci.de/</a> , Produktionsindex "sonstige Chemische Industrie"
	Herstellung von Haftmaterialien	
060312	Produktion und Verarbeitung von Textilien (Textilveredlung)	Produktionsindex Textilindustrie, Datenreihe des Statistischen Bundesamtes, zu beziehen über <a href="http://www.destatis.de/">http://www.destatis.de/</a>
060314	andere (Feinchemikalienproduktion)	Keine Datenrecherche notwendig, ergibt sich aus anderen Eingaben automatisch
<b>060400</b>	<b>Andere Anwendungen von Lösemitteln und ähnlichen Aktivitäten</b>	
060401	Behandlung von Glaswolle	Absatzmenge Mineralwollendämmstoffe, zu beziehen über Gesamtverband Dämmstoffindustrie, <a href="http://www.gdi-daemmstoffe.de/">http://www.gdi-daemmstoffe.de/</a>
060402	Behandlung von Mineralwolle	
060403	Druckindustrie und andere Druckfarbenanwendungen	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar sowie der differenzierten Daten aus der Verbandsstatistik des Verbands der Druckfarbenindustrie im Verband der Mineralfarbenindustrie e.V. (VdD), <a href="http://www.vdmi.de/">http://www.vdmi.de/</a> . Periodisch mit VdD oder Okopol über notwendige Anpassung der zu Grunde gelegten Struktur diskutieren
060404	Extraktion von Ölen und Fetten	Aktuelle Verbandsstatistik Ölmühlenverband, Angaben zu Menge verarbeitetes Produkt, Menge produziertes Öl, Menge Ölkuchen, zu beziehen über Verband deutscher Ölmühlen e.V., Bonn, <a href="http://www.oelmuehlen.de/">http://www.oelmuehlen.de/</a> ; sowie verbandsinterne Statistiken des Ölmühlenverbandes zu Menge Produkt, Verbrauch Hexan pro t verarbeitetes Produkt, wenn gewünscht zu beziehen über Industrieberatung Umwelt GbR

SNAP97	Emittentengruppe	Anleitung zur Fortschreibung
060405	Anwendung von Klebstoffen und Haftmaterialien	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar; wenn möglich: verbandsinterne Verbrauchsstatistiken beim Industrieverband Klebstoffe e.V. (IVK) nachfragen <a href="http://www.klebstoffe.com/">http://www.klebstoffe.com/</a>
060406	Anwendung von Holzschutzmitteln	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar, Splitting der Bautenschutzmittel auf die verschiedenen Anwendungen (hier Holzschutzmittel), Emissionsfaktoren, Info über Deutsche Bauchemie e.V., Karlstrasse 21, 60329 Frankfurt;
060407	Anwendung von Unterbodenschutz und Konservierung von Fahrzeugen	Anzahl der Neufahrzeuge, Verkehr in Zahlen
060408	Häusliche Verwendung von Lösemitteln (außer der Anwendung von Farben und Lacken )	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar
060409	Entwachsen von Fahrzeugen	Anzahl der Neufahrzeuge, Verkehr in Zahlen
060411	Häusliche Verwendung von pharmazeutischen Produkten	Umsatzwert der in Deutschland produzierten Arzneimittel beim Bundesverband der pharmazeutischen Industrie (Jahresbericht), zu recherchieren unter <a href="http://www.bpi.de/internet/">http://www.bpi.de/internet/</a>
<b>060412</b>	<b>Andere</b>	
	Verwendung von Pflanzenschutzmitteln	Einsatzmenge Wirkstoffe für Pflanzenschutzmittel bei der BBA abfragen
	Entfernung von Farben und Lacken	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar, hat aber schon bei der Anwendung von Farben und Lacken stattgefunden
	Baustoffadditive	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar, Splitting der Baustoffadditive auf die verschiedenen Anwendungen (hier Holzschutzmittel), Emissionsfaktoren; Info über Deutsche Bauchemie e.V., Karlstrasse 21, 60329 Frankfurt;
	Flugzeugenteisung	Eintragen der Daten aus der Produktions- und Außenhandelstatistik in das Inventar,
	Anwendung von Treibgasen	Abfüllstatistik der Industriegemeinschaft Aerosole e.V. (IGA), zu recherchieren unter <a href="http://www.igaerosole.de/">http://www.igaerosole.de/</a>
	Hochschulen	statistisches Jahrbuch, Anzahl der in den angrenzenden Wintersemestern des Bezugjahres eingeschriebenen Studenten
	Wissenschaftliche Laboratorien (F+E, Prüfung, nicht an Hochschulen)	statistisches Jahrbuch, Anzahl der Mitarbeiter in Forschungseinrichtungen

SNAP97	Emittentengruppe	Anleitung zur Fortschreibung
	Kühlschmiermittel	Mineralölwirtschaftsverband e.V., Jahresstatistik, <a href="http://www.mwv.de/">http://www.mwv.de/</a>
	Nichtwasserbasierte Metallbearbeitungsöle	Mineralölwirtschaftsverband e.V., Jahresstatistik, <a href="http://www.mwv.de/">http://www.mwv.de/</a>
	wasserbasierte Metallbearbeitungsöle	Mineralölwirtschaftsverband e.V., Jahresstatistik, <a href="http://www.mwv.de/">http://www.mwv.de/</a>
	Sonstige Schmierstoffe	Mineralölwirtschaftsverband e.V., Jahresstatistik, <a href="http://www.mwv.de/">http://www.mwv.de/</a>

## 5 Anhänge

Anhang I: Kurzfassung

Anhang II: Methoden der Unsicherheitsbetrachtung

UFOPLAN-Vorhaben

„Emissionsdaten für flüchtige organische Verbindungen aus der Lösemittel-  
verwendung – Methodenevaluierung, Datenerhebung und Prognosen“

# VOC–Emissionsinventar

FKZ 201 43 306

*Anhang I: Kurzfassung*

## IMPRESSUM

Kurzfassung des F+E-Vorhabens

Emissionsdaten für flüchtige organische Verbindungen aus der Lösemittelverwendung – Methodenevaluierung, Datenerhebung und Prognosen - FKZ 43 306.

**Auftrag:** Umweltbundesamt

**Laufzeit:** 01.09.2001 bis 30.11.2003.

### **Bearbeitung:**

Ökopol - Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg  
Nernstweg 32 – 34; 22765 Hamburg, Tel. 040/39 100 2-0, Fax.: -33  
Internet: [www.oekopol.de](http://www.oekopol.de), E-Mail: [jepsen@oekopol.de](mailto:jepsen@oekopol.de)

Projektleitung: **Dipl.-Ing. Dirk Jepsen**

Mitarbeit: **Dr. Anne Ipsen, Dipl.-Ing. Stéphanie Zangl**

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)  
Universität Stuttgart, Heßbrühlstr. 49a; 70550 Stuttgart;  
Tel.: 0711/780 61 – 56; Fax.: 0711/780 3953; E-Mail: [jt@ier@uni.stuttgart.de](mailto:jt@ier@uni.stuttgart.de)

Projektleitung: **Dipl.-Chem. Jochen Theloke**

## Inhalt

Inhalt .....	3
Einleitung .....	4
Zielstellung .....	4
Ergebnisse .....	5
Entwicklung der Emissionsinventar-Struktur .....	5
Grundmethodik .....	5
Detaillierungsgrad .....	6
Unsicherheiten & Prognosen .....	8
Fortschreibungsfähigkeit .....	9
Aufbau eines EDV-gestützten Systems zur Datenhaltung und Fortschreibung der Emissionsberechnungen .....	10
Begründung .....	10
Aufbau .....	11
Ermittlung der lösemittelbezogenen VOC-Einsatz- und Emissionsmengen für 2000 und 2001 ..	11
Gesamtüberblick .....	11
Auswertung einzelner Quellgruppen für 2001 .....	13
Fazit .....	18

## Einleitung

NMVOC-Emissionen (Non-Methane Volatile Organic Compounds) stellen eine Stoffgruppe mit vielfältigen Wirkungen dar. Sie tragen zur Bildung erhöhter bodennaher Ozonkonzentrationen im Sommer bei und sind teilweise am Abbau stratosphärischen Ozons sowie an der Verstärkung des Treibhauseffektes beteiligt. Einzelne Komponenten besitzen karzinogene Eigenschaften. Wesentliche anthropogene NMVOC-Quellen sind der Straßenverkehr und die Anwendung von Lösemitteln sowie lösemittelhaltiger Produkte.

Zur Reduktion der Emissionen flüchtiger organischer Verbindungen (VOC) besteht vor dem Hintergrund der drängenden Ozonproblematik ein national und international anerkannter Handlungsbedarf. Langfristiges Ziel ist die dauerhafte Unterschreitung bodennaher Ozonkonzentrationen von  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Um dieses Ziel zu erreichen, wurden verschiedene internationale Vereinbarungen und Regelungen getroffen. Insbesondere sind hier zu nennen:

- Das Protokoll der UN/ECE zur Bekämpfung von Versauerung, Eutrophierung und bodennahem Ozon („Göteborg-Protokoll“) zum Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigungen
- Die EG-Richtlinie über nationale Emissionshöchstgrenzen für bestimmte Luftschadstoffe (EG-NEC Richtlinie)
- Da Ozon ein Treibhausgas ist, werden seine Vorläufersubstanzen darüber hinaus im Kyoto-Prozess als indirekte Treibhausgasemissionen erfasst. Aus den verschiedenen internationalen Übereinkünften resultieren zum einen - gestuft über die nächsten Jahre - deutliche Minderungsziele für NMVOC-Emissionen, und andererseits umfangreiche Monitoring- und Berichtspflichten der Vertragsstaaten. Hier sind insbesondere die Anforderungen der Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) zu benennen, die auch den Bereich der NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelanwendung adressieren.

Der relative Anteil der Emissionen aus der Lösemittelanwendung nimmt zu und hat derzeit bereits ca. 66 % der gesamten anthropogenen NMVOC-Emissionen in Deutschland erreicht [NEC-Bericht]. Dies liegt darin begründet, dass die Emissionen aus der Lösemittelanwendung über die letzten 10 Jahre weitgehend konstant blieben, während es insbesondere im Bereich der Emissionen aus dem Straßenverkehr in den vergangenen Jahren durch verschärfte Abgasvorschriften auf EU-Ebene zu relevanten Emissionsminderungen gekommen ist. Für die notwendigen weiteren Minderungen der NMVOC-Emissionen rückt somit der Bereich der Lösemittelanwendung zunehmend in den Fokus der Diskussion.

## Zielstellung

Vor dem skizzierten Hintergrund war es Ziel des vorliegenden Vorhabens, das bereits im Auftrag des UBA erstellte VOC-Emissionsinventar<sup>1</sup> (im folgenden „IER-Methodik“) für die Bezugsjahre 1994 und 1996 gezielt zu einer fortschreibungsfähigen Basis für die periodische Berichterstattung und das Monitoring der Entwicklungen im Bereich der NMVOC-Emissionen aus Lösemittelanwendungen weiterzuentwickeln und dabei insbesondere auch den aktuellen Berichtsanforderungen an Systematik, Transparenz und Vollständigkeit Rechnung zu tragen.

Im Rahmen dieser übergreifenden Zielstellung wurden von der Gutachter-Kooperation Ökopol-IER, in enger Abstimmung mit den Fachbetreuern aus dem Fachgebiet III 1.4 des Umweltbundesamtes als Auftraggeber eine Reihe von Teilaufgaben bearbeitet, die sich den drei folgenden Bereichen zuordnen lassen:

1. (Weiter-)Entwicklung der Emissionsinventar-Struktur, die in ihrer Grundmethodik, ihrem Detaillierungsgrad sowie bezüglich Unsicherheitsbetrachtungen und Prognosen den Anforderungen der internationalen Berichtspflichten entspricht und vom UBA selbst jährlich fortschreibbar ist.

---

<sup>1</sup> basiert auf dem UFOPLAN Vorhaben 295 42 628 „Ermittlung der Lösemittellemissionen in Deutschland und Methodik zur Fortschreibung

2. Aufbau eines EDV-gestützten Systems zur Datenhaltung und Fortschreibung der Emissionsberechnung für die in Frage stehenden Emissionsbereiche.
3. Ermittlung der lösemittelbezogenen VOC-Einsatz- und Emissionsmengen in der Bundesrepublik Deutschland für die Bezugsjahre 2000 und 2001 einschließlich der Erstellung von Emissionsprognosen für die Jahre 2005 und 2010 in Abstimmung mit Branchenvertretern und Fachexperten.

## Ergebnisse

Im Folgenden werden entlang dieser Aufgabenstellungen die wesentlichen Untersuchungsergebnisse dargestellt.

## Entwicklung der Emissionsinventar-Struktur

### GRUNDMETHODIK

Bei der vorliegenden IER-Methodik handelt es sich um einen verwendungsorientierten Ansatz der Emissionsberechnung. Dabei werden die NMVOC-Mengen, die über lösemittelhaltige Produkte<sup>2</sup> in die zu betrachtenden Quellbereiche eingetragen werden, ermittelt und über jeweils speziell angepasste Emissionsfaktoren die Emissionsmengen ermittelt.

Die folgende Abbildung zeigt diese Methodik schematisch.

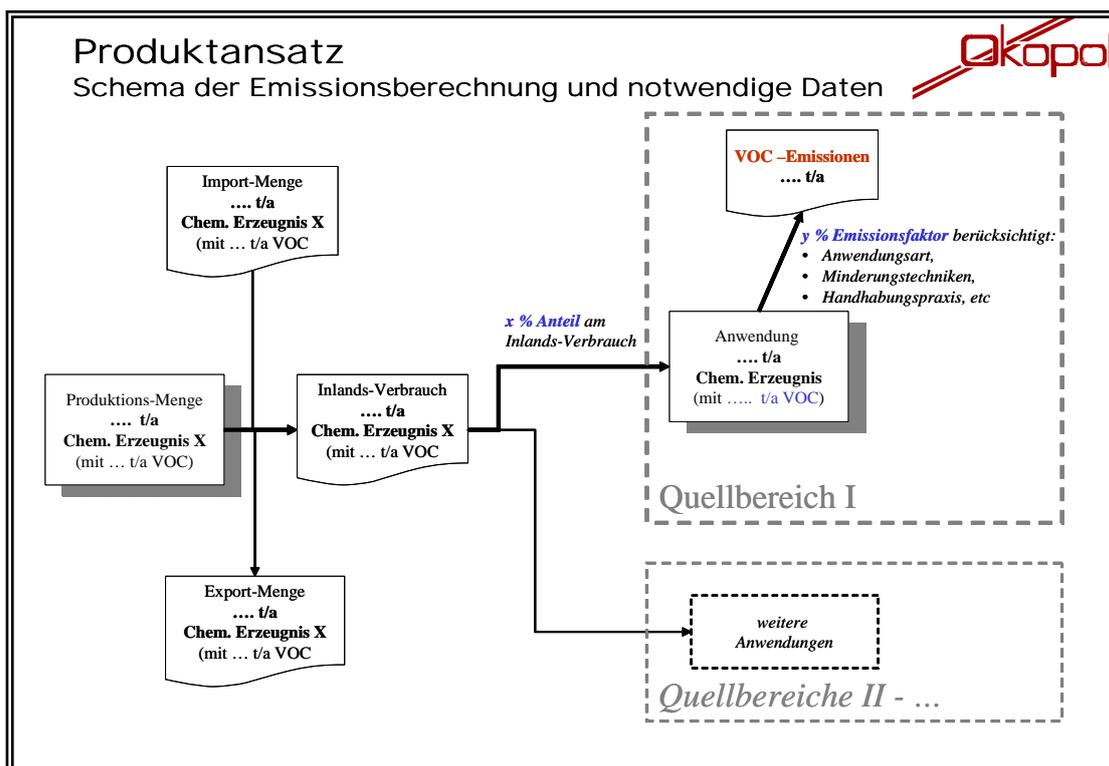


Abb. 1: Schematische Darstellung der Emissionsberechnung auf Basis des Verwendungsansatzes

<sup>2</sup> Das IER spricht aus diesem Grunde auch von einem „Produktansatz“ in Unterscheidung zum prinzipiell auch möglichen „Lösemittelansatz“, bei dem direkt die Lösemittelverwendung betrachtet wird.

Die Emissionsberechnung auf Basis des Verwendungsansatzes wird in den IPCC Guidelines<sup>3</sup> unter der Bezeichnung „consumption-based emissions estimating“ explizit als eine von zwei üblicherweise für die Emissionsberechnung der Kategorie 3 anzuwendenden Methoden angeführt.<sup>4</sup> Vor diesem Hintergrund und nach kritischer Prüfung möglicher alternativer Berechnungsansätze wurde die Grundmethodik im Rahmen der Weiterentwicklung des Emissionsmodells bewusst beibehalten.

Die Methodik erfordert für jeden der betrachteten Quellbereiche die Kenntnis über:

- die im jeweiligen Berichtsjahr eingesetzte Menge an VOC-haltigen (Vor-)Produkten und Hilfsstoffen;
- die VOC-Gehalte dieser Produkte und Stoffe;
- die konkreten Anwendungs- und damit Emissionsbedingungen.

In Hinblick auf die Emissionsbedingungen sind dabei insbesondere die VOC-Mengenanteile, die über Produkte oder Abfälle „gefasst“ ausgetragen werden, zu bestimmen. Bei der verbleibenden und damit im Regelfall verdunstenden Menge ist zu betrachten, welcher Anteil von ihnen durch abluftseitige „Sekundärmaßnahmen“ erfasst und zerstört (bzw. zurück gewonnen) wird.

#### DETAILLIERUNGSGRAD

Eine detaillierte Analyse der Vielzahl verschiedener Berichtspflichten gegenüber der EU und anderen internationalen Gremien zeigte folgende Ergebnisse:

- Zwischen den auf (Einzel-)Anlagen bezogenen Berichtspflichten (VOC-Richtlinie & EPER) und den gesamtstaatlichen (auf höheren Ebenen aggregierten) Berichtspflichten bestehen praktisch keine Überschneidungen.
- Alle gesamtstaatlichen Berichtsanforderungen besitzen einen direkten Bezug zu den Berichtsanforderungen unter UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) und CLRTAP (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution-UN/ECE).

Die Anforderungen aus den letztgenannten internationalen Vereinbarungen wurden deshalb als Basis für das deutsche Emissionsinventar erwählt.

Zu Erfüllung der Berichtspflichten sind jeweils detaillierte Richtlinien erarbeitet worden<sup>5</sup>. In den IPCC-Guidelines wird innerhalb der nationalen Emissions-Inventare für die NMVOC-Emissionen aus dem Bereich „solvent and other product use“ jeweils eine eigene Kategorie vorgesehen – die Kategorie 3. Die Kategorie 3 ist nach dem Common Reporting Format (CRF) untergliedert in die Sub-Kategorien 3A („Paint Application“), 3B („Degreasing & Dry Cleaning“), 3C („Chemical Products, Manufacture & Processing“) und 3D („Other“).

<sup>3</sup> Hier das Reference Manual, Chapter 3, revised 1996

<sup>4</sup> Als zweite Methode wird dort das „production-based emissions estimating“ aufgeführt. Dabei handelt es sich um eine Indexwert-hochrechnung von Basisaktivitäten, also z.B. die Berechnung der NMVOC-Emissionen der Automobilfertigung über Emissionsfaktoren pro Fahrzeug.

<sup>5</sup> Im Fall des UNFCCC handelt es sich hierbei um die Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) -Guidelines sowie um die Good Practice And Uncertainty Management (GPGAUM) -Guidelines. Bei CLRTAP sind es die European Monitoring Emission Program (EMEP) -Guidelines und das Atmospheric Emission Inventory Guidebook (AEIG).

Es ergibt sich somit das folgende Berichtsschema.

Tab.1: Grundschemata für NMVOC Emissionen aus der Lösemittelanwendung nach den IPCC-Guidelines

Kategorie & Sub-Kategorien	NMVOC-Emissionen [t/a]	Unsicherheit	Prognose 2005	Prognose 2010
3 Lösemittelanwendung	Gesamt-Summe 3 A – 3 D			
3A Anwendung von Farben und Lacken	Summe der NMVOC-Emissionen			
3B Entfettung, Chemische Reinigung und Elektronik	Summe der NMVOC-Emissionen			
3C Herstellung und Verarbeitung von chem. Produkten	Summe der NMVOC-Emissionen			
3D Andere Anwendungen von Lösemitteln und ähnl. Aktivitäten	Summe der NMVOC-Emissionen			

Da die Qualitätsanforderungen aus den Guidelines eine transparente Unterlegung dieser Ergebniswerte nahe legen und das Umweltbundesamt für das realitätsnahe Monitoring von Maßnahmen zur Emissionsminderung eine differenziertere Datenbasis benötigt, wurde zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer eine weitere Untergliederung der Quellbereiche abgestimmt. Dafür wird auf die SNAP-Gruppen aus der CORINAIR-Systematik<sup>6</sup> zurückgegriffen.

Den vier IPCC Sub-Kategorien von 3A bis 3D entsprechen dort auf dem so genannten „Level 2“ die Quellgruppenbereiche 601 bis 604, ausgenommen ist dabei der Bereich 605, der der IPCC Kategorie 2 zuzuordnen ist<sup>7</sup>. Auf der Ebene des „Level 3“ sind die vier Quellgruppenbereiche wiederum in insgesamt 39 einzelne Quellgruppen untergliedert. Um keine „künstlichen“ Trennungen sachlich eng verknüpfter Emissionsbereiche zu erzwingen, wurden im abschließend erarbeiteten Konzept der Gutachter mehrere SNAP's zu Quellgruppen zusammengeführt<sup>8</sup>. Die so abgeleitete Inventarstruktur ist der Tab.1 zu entnehmen.

In diesen Quellgruppen werden alle flüchtige organische Verbindungen betrachtet, die bei 293,15 K einen Dampfdruck von mindestens 0,01 kPa oder unter den entsprechenden Gebrauchsbedingungen eine entsprechende Flüchtigkeit haben.<sup>9</sup>

Neben Lösemitteln im engeren Sinne werden auch flüchtige organische Treib-, Extraktions- oder Kältemittel (z.B. auch FCKW und Halone) sowie Weichmacher (Phthalate) erfasst. Produkte, die als chemische Reaktionskomponente eingesetzt werden, fallen dagegen nicht in die hier betrachtete Emissionskategorie.

<sup>6</sup> Basierend auf den Selected Nomenclature for Air Pollution for CORINAIR Inventory 97

<sup>7</sup> Dies wird u.a. im Abschnitt "Correspondence between 1996 IPCC source categories and SNAP 97" der Erläuterungen zur SNAP 97 Systematik Version 1.0 ausgeführt.

<sup>8</sup> Es handelt sich um die SNAPs für Metallentfettung, Fertigung elektronischer Komponenten, Oberflächenreinigung in der Feinoptik, Optoelektronik und Spezialreinigung (SNAP 60201, 60203, 60204 und 60209) sowie um die SNAPs für Kunststoffverarbeitung (SNAP 60301-04).

<sup>9</sup> Dies entspricht den Definitionen der EG-Lösemittelrichtlinie (1999/13/EG)

## UNSICHERHEITEN & PROGNOSEN

Im Rahmen der internationalen Berichtspflichten sind sowohl Anforderungen an die Betrachtung von Unsicherheiten als auch für die Erstellung von Projektionen festgelegt.

Bezüglich der Unsicherheiten ist es Teil der Berichtspflicht, die Qualität der gemeldeten Daten mitzuteilen, die gemeldeten Emissionen mit den getroffenen Annahmen zu unterlegen sowie die Methode zur Ermittlung der Unsicherheiten transparent zu beschreiben. Nach den Reporting Instructions of IPCC-Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories ist dabei die Qualität der abgeschätzten Daten für die verschiedenen Kategorien in der folgenden Abstufung anzugeben:

H: High Confidence Level

M: Medium Confidence Level

L: Low Confidence Level

Zur Unterlegung dieser Klassierung werden in den entsprechenden Management-Guidelines einerseits die Methodik der Fehlerfortpflanzung und andererseits die Monte-Carlo-Simulation vorgeschlagen. Aus rein wissenschaftlicher Perspektive wäre der Monte-Carlo-Simulation der Vorzug zu geben. Sie erfordert allerdings einen deutlichen höheren Aufwand bei Datenversorgung und Durchführung.

Um zu prüfen, wie eine möglichst aufwandseffiziente Inventarfortschreibung realisiert werden kann, wurde deshalb für ausgewählte Quellbereiche die tatsächlichen Abweichungen zwischen diesen statistischen Methoden geprüft. Es zeigte sich, dass wie zu erwarten die Fehlerintervalle bei der Monte-Carlo-Simulation nominell kleiner sind. Die Relation der Fehlerintervalle der verschiedenen Emissionsgrößen sind aber bei beiden Methoden weitestgehend gleich. Damit verändern sich die Ausgangsinformationen für eine qualitative Klassierung entsprechend den Berichtsanforderungen nicht.

Für die Fortschreibung des NMVOC-Emissionsinventars schlagen die Gutachter eine routinemäßige Unsicherheitsbetrachtung nach der Fehlerfortpflanzungsmethodik vor. So können mit vergleichsweise geringem Fortschreibungsaufwand den internationalen Anforderungen voll genügende Berichte erstellt werden.

Um die Datenversorgung für die Fehler-Fortschreibung zu ermöglichen, wurden von den Gutachtern im EDV-gestützten Inventarsystem für alle Eingangsgrößen zusätzlich Standardabweichungen (95 % Konfidenzintervalle) in Form von (+ x % / - y %) eingefügt. Als Basiseinstellung werden dabei die folgenden Standardabweichungen verwendet:

- **+/- 10 %:** Für einfache Größen, die auf einer strukturierten Basis ermittelt werden, wie z.B. die Mengendaten der Produktions- und Handelsstatistiken.
- **+/- 15 %:** Für komplexe Größen, die bereits inhärent eine Mittelwertabschätzung vornehmen, wie z.B. die Angaben zu Lösemittelgehalten oder Emissionsfaktoren in Emissionsbereichen, in denen eine gute Detailkenntnis über die üblicherweise vorzufindenden Einzelwerte gegeben ist.
- **+/- 20 %:** Für komplexe Größen – siehe vorstehend, in Emissionsbereichen, in denen nur stichpunktartig Einzelerkenntnisse vorliegen.

Wo in einzelnen Bereichen von Experten für einzelne Quellbereiche andere Einschätzungen vorgenommen wurden oder wo zusätzliche Erkenntnisse über die Belastbarkeit der verfügbaren Eingangsgrößen vorliegen, wurde dies mit entsprechenden Kommentaren gesondert deutlich gemacht. Auf diese Art und Weise kann im Dialog mit den Akteuren der verschiedenen Quellbereiche auch im Verlauf der Fortschreibung des Inventars jederzeit eine transparente Herkunft der Fehlerabschätzung gewährleistet werden.

Auf Basis dieser Informationen wird vom EDV-gestützten Inventarsystem jeweils mittels Fehlerfortpflanzung die Gesamtstandardabweichung (95 % Konfidenzintervall) der Subkategorien (3A – 3D) und der Gesamtkategorie (3) berechnet.

Sollte zu einem späteren Zeitpunkt, z.B. im Rahmen veränderter Berichtsanforderungen, ein entsprechender Bedarf entstehen, kann jederzeit mit frei erwerblichen EDV-Tools auf die erstellte Datenbasis aufgesetzt und eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden.

Bezüglich der Prognosen sollen die berichtspflichtigen Parteien jeweils eine 5 Jahres- und eine 10 Jahres-Projektion erstellen. Dabei sind die voraussichtlichen Entwicklungen:

- 1) unter Berücksichtigung gesetzlicher Maßnahmen
- 2) unter Berücksichtigung zusätzlicher Maßnahmen
- 3) ohne Berücksichtigung von derartigen Maßnahmen

darzustellen. Optional können Sensitivitätsanalysen für die einzelnen Projektionen durchgeführt werden. Allerdings sollte die Zahl der Szenarien ein überschaubares Maß nicht überschreiten.

Um die skizzierten Anforderungen bedienen zu können, werden in dem vorgelegten Konzept drei Projektions-Faktoren berücksichtigt:

1. Sozioökonomische Entwicklungen,  
die die (Basis-)Aktivitäten in den verschiedenen Quellbereichen verändern.  
Hier finden Index-Faktoren Anwendung, die von der PROGNO AG im Rahmen des Deutschland Report (Deutschland bis zum Jahr 2020) für eine Reihe von Wirtschaftssektoren in Deutschland erstellt wurden. Die verschiedenen Quellbereiche des Inventarsystems werden mit diesen Sektorentwicklungen verknüpft. Dabei treten einerseits Zuordnungsprobleme auf - die Sektoren sind naturgemäß deutlich breiter als die Quellbereiche des Inventarsystems - und andererseits handelt es sich bei den Index-Faktoren von PROGNO um Wert-Angaben, die nur bedingt mit der Entwicklung der Materialströme korrelieren.  
Aus diesem Grund wurden nach Möglichkeit auch detailliertere Prognosen einzelner Wirtschaftsbereiche mit berücksichtigt. Belastbare mengenbezogene Entwicklungsprognosen sind allerdings auch innerhalb von Wirtschaftsbranchen meist nicht oder nur für sehr eingegrenzte Teilmärkte verfügbar.
2. Gesetzlich induzierte Entwicklungen,  
die zu einer Verringerung der Emissionen führen. Hier sind insbesondere die zu erwartenden Auswirkungen der Umsetzung der EG-Lösemittelrichtlinie (31. BImSchV) sowie der Umsetzung der EG-Decopaint-Richtlinie (Lösemittelhaltige Farben- und Lack-Verordnung) einschlägig. Die Umsetzungsfristen der Decopaint-Richtlinie liegen derzeit noch eher außerhalb des Prognosehorizontes<sup>10</sup>. Um die Minderungswirkungen der 31. BImSchV realitätsnah zu berücksichtigen, wird zunächst die Minderungsanforderung in den verschiedenen Tätigkeitsbereichen ermittelt<sup>11</sup> und dann eine Abschätzung vorgenommen, wie viel Prozent der VOC-Mengen in Anlagen eingesetzt werden, die unter die 31. BImSchV fallen.
3. Weitere eigenständige Entwicklungen,  
die zu einer Verringerung der Emissionen führen, wie z.B. einen technologischen Wandel, in dessen Zuge emissionsrelevante Arbeitsschritte wie z.B. die umweltoffene Handreinigung von Maschinenteilen o. Ä. zunehmend entfallen.

## FORTSCHREIBUNGSFÄHIGKEIT

Da es sich bei der Bedienung der Berichtspflichten zukünftig um jährlich wiederkehrende Routineaufgaben der zuständigen Fachabteilungen im Umweltbundesamt handelt, ist der Aspekt der Fortschreibungs-fähigkeit des Inventars von herausgehobener Bedeutung.

Bei der kritischen Evaluation des bislang verfügbaren Inventarsystems wurde deutlich, dass eine solche Fortschreibbarkeit auf der Basis von periodisch aktualisierten und dem UBA direkt verfügbaren Quellen nur in Teilen des Inventars gegeben war. Als problematisch erwiesen sich insbesondere Bezüge zu einmaligen Detailuntersuchungen, die nicht fortgeschrieben werden.

Aus diesem Grund wurde bei Weiterentwicklung der Methodik gezielt versucht, in allen Quellbereichen eine direkte Verbindung zu den Produkt- bzw. Warengruppen der Produktions- und

<sup>10</sup> Wobei sicherlich in einzelnen Produktgruppen vorauslaufende Adaptionen erfolgen werden, die aber in Relation zu den in Frage stehenden Gesamtemissionen vernachlässigbar sein dürften.

<sup>11</sup> Relation zwischen den derzeitigen Emissionsfaktoren und den nach 31. BImSchV zulässigen Emissionsfaktoren

Handelstatistik herzustellen. In Bereichen, in denen diese Basis-Statistiken aufgrund mangelnder Trennschärfe (in Bezug auf die Quellgruppenzuordnung oder die Trennung in lösemittelhaltige und -freie Produkte) nicht ausreichen, wurden Fachstatistiken integriert, nachdem mit den zuständigen Fach- oder Branchenverbänden die Verfügbarkeit dieser Daten geklärt wurde.

### **Kategorie 3A: Anwendung von Farben und Lacken**

Während die Mengen der verschiedenen Lackarten direkt aus den Basisstatistiken ermittelt werden, dient ein differenzierter Zuordnungsschlüssel vom Verband der Lackindustrie dazu, die Lackarten den verschiedenen Lackanwendungen zuzuordnen. Für dieses wesentliche Inventar-Element konnte die Zusage des VDL erreicht werden, sie in periodischem Rhythmus (z. B. alle 3 Jahre) überarbeitet verfügbar zu machen.

### **Kategorie 3B: Entfettung, Chemische Reinigung und Elektronik**

Dieser Bereich des Inventars ist auch nach der Überarbeitung nur mit erhöhter Unsicherheit fortschreibbar. Sehr wenige Produktgruppen der Basis-Statistiken müssen hier auf vergleichsweise viele, emissionsseitig deutlich unterschiedlich zu bewertende Quellbereiche verteilt werden. Mangels quellgruppenspezifischer Fachverbände oder einheitlicher Zulieferstrukturen konnten trotz intensiven Bemühens keine geeigneten Datenquellen für die periodische Fortschreibung dieser differenzierten Zuordnung ermittelt werden. Die strukturelle Zuordnung basiert damit weiterhin auf einer im Rahmen eines UFOPLAN-Vorhabens<sup>12</sup> durchgeführten Zeitpunktanalyse aus der Mitte der 90er Jahre. Eine Qualitätssteigerung der Emissionsaussagen für diese Subkategorie würde eine Aktualisierung dieser Untersuchung erfordern.

### **Kategorie 3C: Herstellung und Verarbeitung von chemischen Produkten**

Für diesen Bereich bestehen überwiegend recht eindeutige Zuordnungen zu den Basis-Statistiken, so dass hier eine gute Fortschreibbarkeit gegeben ist.

### **Kategorie 3D: Andere Anwendungen von Lösemitteln**

Die Quellbereiche der Sub-Kategorie 3D sind in Bezug auf die eingesetzten lösemittelhaltigen Produkte, die Anwendungsbedingungen sowie die Akteursstrukturen extrem heterogen.

Dennoch konnte auch hier überwiegend ein direkter Bezug zu den Basis-Statistiken hergestellt werden sowie andere periodisch verfügbare Informationsquellen identifiziert werden, die die Fortschreibbarkeit gewährleisten.

Für den Bereich der Druckindustrie wird allerdings vorrangig auf eine Branchen-Statistik des Verbandes der Druckfarbenindustrie zugegriffen, da diese eine erheblich größere Trennschärfe in Bezug auf die Ermittlung der Einsatzmengen lösemittelhaltiger Produkte aufweist. Eine grundsätzliche Bereitschaft, diese Daten für das Umweltbundesamt zugänglich zu machen, besteht.

## Aufbau eines EDV-gestützten Systems zur Datenhaltung und Fortschreibung der Emissionsberechnungen

### **BEGRÜNDUNG**

Bereits in einer frühen Projektphase wurde gemeinsam mit dem Auftraggeber die Entscheidung getroffen, zur Datenhaltung und für die vielfältigen Verknüpfungs- und Rechenoperationen zur differenzierten NMVOC-Emissionsermittlung ein EXCEL-basiertes Inventarsystem zu programmieren.

Diese Entscheidung erfolgte mit zwei Zielsetzungen:

- Zum einen konnte so projektbegleitend ein „Werkzeug“ erarbeitet werden, welches den Fachmitarbeitern des Umweltbundesamtes auch zukünftig bei der Ermittlung und Fortschreibung der NMVOC-Emissionen zur Verfügung steht.

<sup>12</sup> vgl. Schwarz, W., Leisewitz, A., Stand der Technik und Potentiale zur Senkung der VOC-Emissionen aus Anlagen zur Reinigung von Oberflächen, Ökorecherche, Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Frankfurt/Main, 1999-Forschungsbericht 204 04 906/02 im Auftrag des Umweltbundesamtes.

- Zum anderen lassen sich die Algorithmen der mehrstufigen Verknüpfungen von Produkt- und Lösemittelmengen sowie ihre Verteilung auf unterschiedlichste Anwendungsbereiche und dergleichen mehr auf diese Art und Weise sehr viel besser nachvollziehbar dokumentieren.

## AUFBAU

Vom Grundkonzept her handelt es sich bei dem entwickelten Inventarsystem um eine EXCEL-Arbeitsmappe, die 12 verknüpfte Arbeitsblätter sowie 2 weitere Arbeitsblätter mit ergänzenden Informationen umfasst.

Die Arbeitsmappe enthält das komplette Emissions-Inventar für ein konkretes Berichtsjahr sowie zwei Prognosejahre. Entsprechend den zu bedienenden Berichtspflichten ist das Inventarsystem im Kern, entlang der vier Subkategorien sowie darunter, nach den einzelnen SNAP-Codes gegliedert. Neben dem Berichtsjahr werden parallel jeweils auch eine 5 Jahres- und eine 10 Jahres-Prognose berechnet. Die entsprechenden Prognosefaktoren sind in einem zusätzlichen Arbeitsblatt hinterlegt.

Über Farbkennungen sowie zusätzliche Kommentarfelder sind die verschiedenen statistischen Datenquellen sowie die Herkunft zusätzlicher Faktorwerte transparent nachvollziehbar.

## Ermittlung der lösemittelbezogenen VOC-Einsatz- und Emissionsmengen für 2000 und 2001

### GESAMTÜBERBLICK

In Tabelle 2 sind die ermittelten Lösemittlemissionen für 2000 und 2001, disaggregiert nach den verschiedenen Quellbereichen (SNAP-CODES) sowie die Emissionsprognose für 2010 unter Berücksichtigung der Umsetzung der 31.BImSchV dargestellt.

Tabelle 2: Lösemittlemissionen in den Jahren 2000, 2001 und 2010 in Deutschland

SNAP-CODE	Bezeichnung des Sektors entsprechend CORINAIR 97	Emissionen 2000 [t]	Emissionen 2001 [t]	Emissionen 2010 [t]
<b>60100</b>	<b>Anwendung von Farben und Lacken</b>	<b>284 109</b>	<b>291 286</b>	<b>262 694</b>
60101	Herstellung von Fahrzeugen	19 733	20 646	27 872
60102	Reparatur von Fahrzeugen	13 260	11 700	6 409
60103	Konstruktionen und Gebäude	55 055	54 853	46 454
60104	Häusliche Anwendungen von Farben und Lacken	29 184	30 171	24 160
60105	Bandbeschichtung	389	408	429
60106	Schiffsbau	8 310	8 634	10 279
60107	Holz	43 258	44 323	34 893
60108	Andere industrielle Verarbeitung	93 206	98 058	89 479
60109	Andere nicht-industrielle Verarbeitung	21 714	22 494	22 718
<b>60200</b>	<b>Entfettung, chemische Reinigung und Elektronik</b>	<b>35 467</b>	<b>42 687</b>	<b>35 741</b>
60201	Metallentfettung	17 549	20 832	23 750

SNAP-CODE	Bezeichnung des Sektors entsprechend CORINAIR 97	Emissionen 2000 [t]	Emissionen 2001 [t]	Emissionen 2010 [t]
60202	Chemische Reinigung	1 152	1 036	541
60203	Herstellung von Elektronikkomponenten	653	813	916
60204	Andere industrielle Reinigung	16 113	20 006	10 533
<b>60300</b>	<b>Herstellung und Verarbeitung von chemischen Produkten</b>	<b>35 908</b>	<b>39 532</b>	<b>41 104</b>
60301	Verarbeitung von Polyester	189	160	199
60302	Verarbeitung von Polyvinylchlorid	213	259	323
60303	Verarbeitung von Polyurethan	3 863	4 713	5 869
60304	Verarbeitung von Polystyrolschaum	5 884	7 012	8 732
60305	Gummiverarbeitung	3 826	3 887	3 607
60306	Herstellung von pharmazeutischen Produkten	7 961	8 215	8 736
60307	Herstellung von Farben und Lacken	9 470	9 684	9 044
60308	Herstellung von Druckfarben und Tinten	1 214	2 389	2 231
60309	Herstellung von Klebstoffen	592	591	612
60310	Bitumen blasen	201	196	239
60311	Herstellung von Haftmaterialien, Magnetbändern, Filmen und Fotografien	559	535	596
60312	Produktion und Verarbeitung von Textilien (Textilveredlung)	1 936	1 891	916
<b>60400</b>	<b>Andere Anwendungen von Lösemitteln und ähnliche Aktivitäten</b>	<b>377 321</b>	<b>381 986</b>	<b>397 567</b>
60401/02	Behandlung von Glas- und Mineralwolle	1 172	983	1 041
60403	Druckindustrie und andere Druckfarbenanwendungen	90 786	98 968	92 582
60404	Extraktion von Ölen und Fetten	4 900	4 900	5 388
60405	Anwendung von Klebstoffen und Haftmaterialien	23 388	20 794	18 694
60406	Anwendung von Holzschutzmitteln	31 496	34 241	25 273
60407	Anwendung von Unterbodenschutz und Konservierung von Fahrzeugen	12 178	12 355	12 552
60408	Häusliche Verwendung von Lösemitteln	103 973	94 083	114 191
60409	Entwachsen von Fahrzeugen	1 311	1 630	1 736
60411	Häusliche Verwendung von pharmazeutischen Produkten	3 295	3 493	4 469
60412	Sonstiges	104 822	110 538	121 640
	<b>Gesamt</b>	<b>732 805</b>	<b>755 492</b>	<b>737 106</b>

2001 wurden nach diesen Berechnungen in Deutschland fast 760 kt NMVOCs bei der Anwendung von Lösungsmitteln und lösemittelhaltigen Erzeugnissen emittiert.

**AUSWERTUNG EINZELNER QUELLGRUPPEN FÜR 2001**

**Signifikante Quellgruppen**

Abbildung 2 zeigt die Verteilung der Lösemittlemissionen auf die verschiedenen mengenrelevanten Quellgruppen. Man sieht, dass knapp 65 % (ca. 484 kt) aller Lösemittlemissionen den drei Quellgruppen "Anwendung von Farben und Lacken", "Häusliche Verwendung von Lösemitteln" (ohne Anwendung von Farben und Lacken) sowie den „Druckanwendungen“ entstammen. Alle weiteren Quellgruppen sind von jeweils deutlich geringerer Signifikanz ( $\leq 7\%$  der Gesamtemissionen).

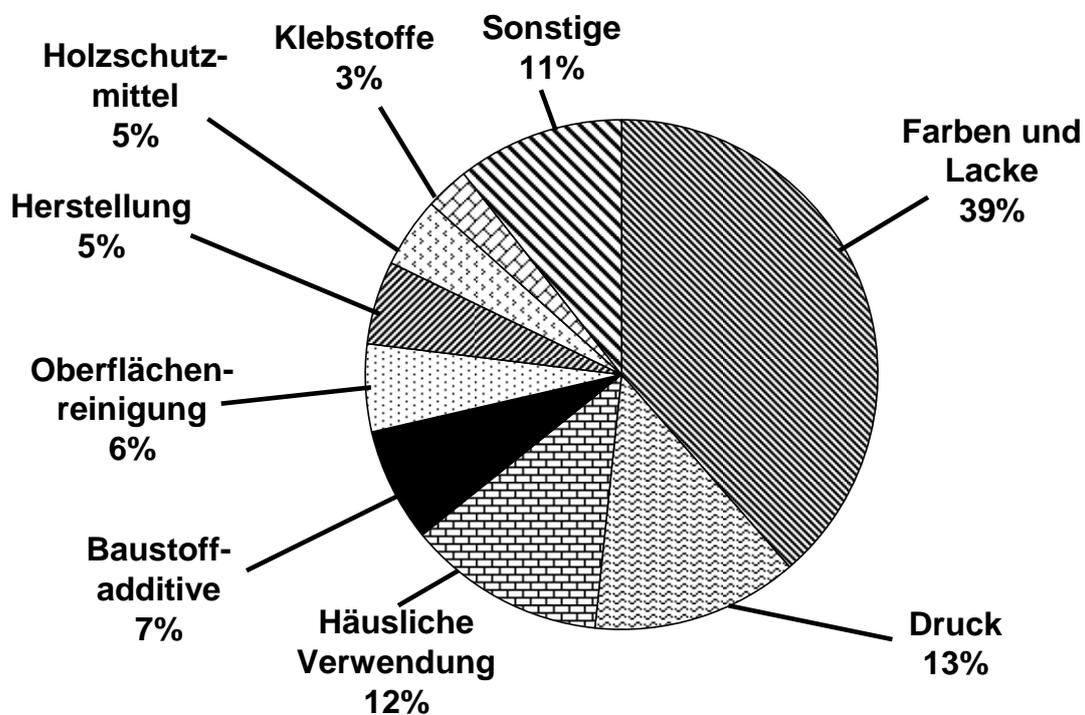


Abb. 2: NMVOC-Emissionen aus Lösemittelanwendungen in Deutschland 2001

### Anwendung von Farben und Lacken

Ungefähr 39 % (ca. 292 kt) der Lösemittlemissionen wurden 2001 durch die Anwendung von Farben und Lacken verursacht. Sie verteilen sich wie in der folgenden Grafik ersichtlich auf die verschiedenen Anwendungsbereiche.

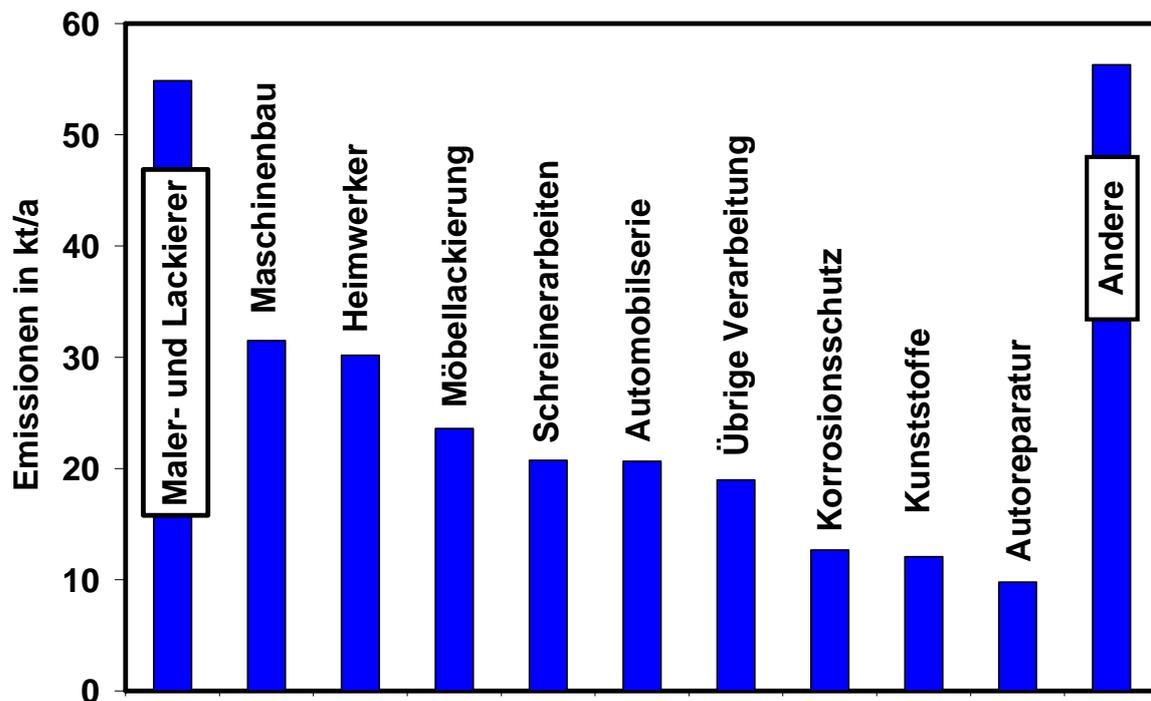


Abb. 3: NMVOC-Emissionen aus der Anwendung von Farben und Lacken

Durch die Umsetzung der 31.BImSchV sowie durch Veränderungen der Rezepturen u.a. im Vorfeld der Umsetzung der europäischen Decopaint Richtlinie kommt es im Bereich der Anwendung von Farben und Lacken zu deutlichen spezifischen Emissionsminderungen, die durch die prognostizierten Marktzuwächse allerdings vielfach fast wieder kompensiert werden, so dass nur vergleichsweise geringe Gesamtminderungen (von ca. 8 %) bis 2010 modelliert werden. Wie bereits ausgeführt fehlen bislang allerdings anwendungsbezogene Aussagen darüber, ob es sich in den nächsten Jahren um ein quantitatives oder um ein eher qualitatives Wachstum handeln wird. In letzterem Fall würden die Produktvolumina und damit auch die VOC-Durchsätze deutlich weniger stark steigen als in dem bestehenden Modell.

### Entfettung, chemische Reinigung und Elektronik

Ca. 43 kt NMVOC bzw. ca. 6 % der Gesamtemissionen wurden bei Oberflächenreinigungsprozessen bzw. der chemischen Reinigung emittiert. Die Zusammensetzung dieser Emissionen nach Quellgruppen zeigt Abbildung 4. Der größte Teil der Emissionen (49 %) wird hier durch die Metallentfettung (ca. 21 kt) verursacht.

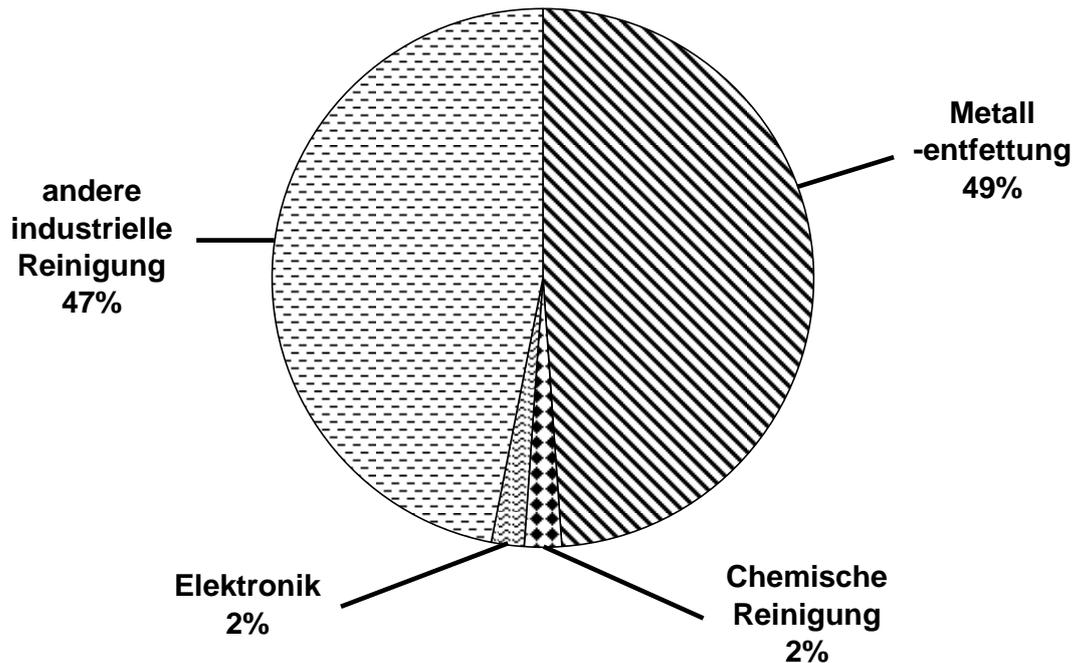


Abb. 4: Lösemittlemissionen aus Entfettung, chemischer Reinigung und anderer industrieller Reinigung (Gesamtemission: ca 43 kt)

Für diese Sub-Kategorie weist das Prognosemodell relevante Minderungswirkungen (ca. 16 %) insbesondere durch die 31. BImSchV aus.

### Herstellung und Verarbeitung von chemischen Produkten

Bei der Herstellung und Verarbeitung von Kunststoffen und anderen Produkten wurden 2001 ca. 39 kt NMVOC bzw. ca. 5 % der Gesamtemissionen emittiert. Die Aufschlüsselung in Abbildung 5 zeigt die einzelnen Quellgruppen sortiert nach der Höhe der NMVOC-Emissionen.

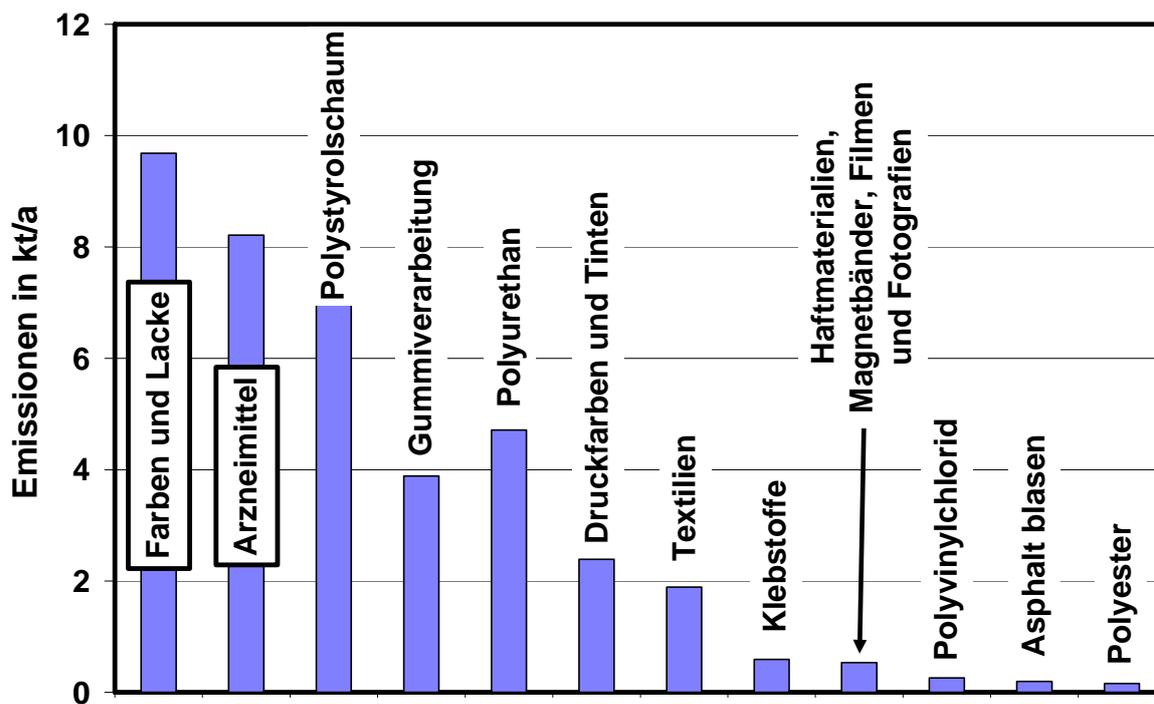


Abb. 5: NMVOC-Emissionen aus der Herstellung und Produktion von chem. Produkten

In den Quellbereichen dieser Sub-Kategorie werden die durchaus gegebenen Minderungseffekte der 31. BImSchV durch die prognostizierten Wachstumseffekte weitgehend kompensiert, so dass sich bis 2010 ein in etwa gleich bleibendes Emissionsniveau ergibt.

### Andere Anwendung von Lösemitteln und ähnlichen Aktivitäten

Ungefähr 51 % (ca. 382 kt) der NMVOC-Emissionen aus Lösemittelanwendungen entstammten den so genannten anderen Anwendungen. Bereits in Abbildung 2 wurde die mengenrelevanten Quellgruppen dieser Sub-Kategorie mit ihren entsprechenden Prozentanteilen an den Gesamt-Lösemittel-Emissionen dargestellt. Es handelt sich um die Quellgruppen:

- Häusliche Verwendung von lösemittelhaltigen Produkten
- Schmierstoffe
- Druckindustrie und andere Druckfarbenanwendungen
- Betonzusatzmittel
- Holzimprägnierung

Weitere Details der Emissionsmengen sind in Abbildung 6 dargestellt:

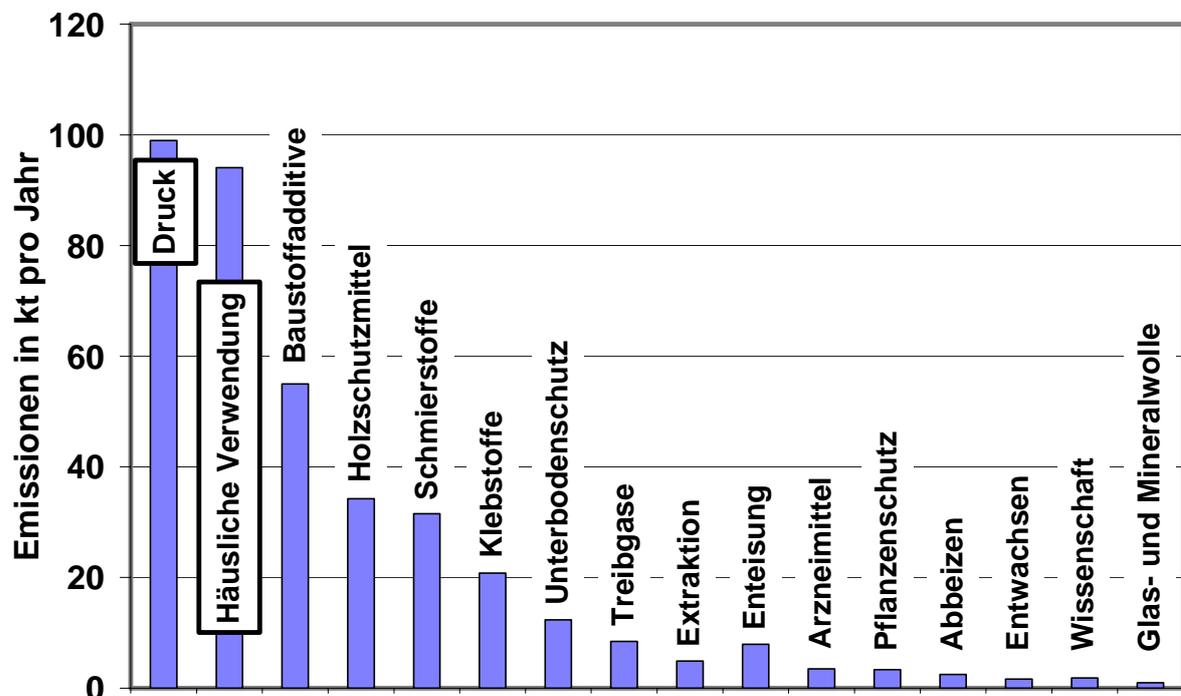


Abb. 6: NMVOC-Emissionen aus anderen Lösemittelanwendungen

Auch wenn in Teilbereichen, wie z.B. bei der Anwendung von Klebstoffen oder Holzschutzmitteln, durchaus signifikante Emissionsminderungen zu erwarten sind, werden die Gesamtemissionen aus dieser Sub-Kategorie bis 2010 eher ansteigen (um ca. 2 %). Dies liegt insbesondere darin begründet, dass die anlagenbezogenen Maßnahmen zur Emissionsbegrenzung in diesen sehr kleinteiligen Quellgruppen weitgehend ins Leere laufen und sie zudem durch die Wachstumseffekte deutlich überkompensiert werden.

## Fazit

Im Rahmen des durchgeführten Vorhabens konnte durch die gezielte Optimierung der bestehenden Basismethode und die Fachdiskussion mit einer Vielzahl von Anwenderbranchen ein Modell zur Berechnung der NMVOC-Emissionen aus der Lösemittelanwendung entwickelt werden, welches mit vertretbarem Aufwand fortschreibungsfähig ist und den gestiegenen Qualitätsanforderungen der internationalen Berichtspflichten in vollem Umfang genügt.

Durch die Umsetzung des Modells in ein EDV-gestütztes System konnte darüber hinaus für die zuständigen Mitarbeiter des Umweltbundesamtes ein praxistaugliches Werkzeug entwickelt werden. Dieses Werkzeug gewährleistet auf der einen Seite die fehlertolerante Fortschreibung der komplexen rechnerischen Zusammenhänge in den sehr heterogenen Quellgruppenbereichen und macht auf der anderen Seite die relevanten Eingangsgrößen in das Emissionsmodell für die Fachdiskussionen transparent.

Nach Auffassung der Gutachter könnte eine deutliche Aufwandsminderung und eine signifikante Steigerung der Aussagequalität der periodischen Emissionsberichtserstattung insbesondere durch eine Restrukturierung der amtlichen Basis-Statistiken (Produktions- und Aussenhandelsstatistik) erreicht werden. Sie müsste sicherstellen, dass lösemittelhaltige Produktgruppen zielgerichteter extrahierbar und eine trennschärfere Zuordnung zu verschiedenen Anwendungsbereichen gegeben wären. In weiten Bereichen der Basis-Statistiken könnten diese Verbesserungen bereits mit vergleichsweise geringen Eingriffen in die bestehen Produkt-/(Waren-)gruppen Strukturen umgesetzt werden.

Bei der Ermittlung der Emissionsdaten für die Bezugsjahre 2000 und 2001 zeigte sich, dass Datenunschärfen insbesondere in dem weder in den Basis-Statistiken noch in der deutschen Verbandslandschaft ausreichend homogen erfassten Bereich der Oberflächenentfettung (Kategorie 3B) sowie in den sehr kleinteiligen aber mengenrelevanten Quellgruppen der Kategorie 3D bestehen.

Offene Fragen bestehen auch bei der Anwendung der verfügbaren Wachstumsprognosen für die relevanten Teilmärkte, die für diesen spezifischen Anwendungsfall zu wenig zwischen quantitativem und qualitativem Wachstum unterscheiden. Hier sehen die Gutachter relevanten weiteren Gesprächsbedarf zwischen dem Umweltbundesamt und einzelnen Fachverbänden, wie ggf. sachgerechtere Prognosefaktoren gewonnen und periodisch in die Emissionsberichterstattung eingespeist werden können.



UFOPLAN-Vorhaben

„Emissionsdaten für flüchtige organische Verbindungen aus der Lösemittel-  
verwendung – Methodenevaluierung, Datenerhebung und Prognosen“

# VOC-Emissionsinventar

FKZ 201 43 306

*Anhang II: Methoden der  
Unsicherheitsbetrachtung*

Ökopol/IER, Hamburg 2004

## IMPRESSUM

F+E-Vorhaben

Emissionsdaten für flüchtige organische Verbindungen aus der Lösemittelverwendung – Methodeevaluierung, Datenerhebung und Prognosen - FKZ 43 306.

**Auftrag:** Umweltbundesamt

**Laufzeit:** 01.09.2001 bis 30.11.2003.

### **Bearbeitung:**

Ökopol - Institut für Ökologie und Politik GmbH, Hamburg  
Nernstweg 32 – 34; 22765 Hamburg, Tel. 040/39 100 2-0, Fax.: -33  
Internet: [www.oekopol.de](http://www.oekopol.de), E-Mail: [jepsen@oekopol.de](mailto:jepsen@oekopol.de)

Projektleitung: **Dipl.-Ing. Dirk Jepsen**

Mitarbeit: **Dr. Anne Ipsen, Dipl.-Ing. Stéphanie Zangl**

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)  
Universität Stuttgart, Heßbrühlstr. 49a; 70550 Stuttgart;  
Tel.: 0711/780 61 – 56; Fax.: 0711/780 3953; E-Mail: [jt@ier@uni.stuttgart.de](mailto:jt@ier@uni.stuttgart.de)

Projektleitung: **Dipl.-Chem. Jochen Theloke**

## Inhalt

1	Einleitung .....	4
2	Methoden zur Unsicherheitenanalyse .....	4
2.1	Qualitative Methoden .....	4
2.2	Semiquantitativer Ansatz.....	5
2.3	Semiquantitativer Ansatz zur Ermittlung der Unsicherheiten von Lösemittlemissionsberechnungen .....	6
2.4	Quantitative Ansätze zur Ermittlung der Unsicherheiten .....	10
2.4.1	Methode der Fehlerfortpflanzung .....	10
2.4.2	Monte-Carlo-Simulation .....	11
2.4.3	Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation .....	11
3	Verifikationsmethoden.....	12
3.1	Plausibilitätsprüfungen .....	12
3.1.1	Gesamteinschätzung der Unsicherheiten berechneter Jahres- emissionen aus Lösemittelanwendungen in Deutschland und Westeuropa .....	12
3.2	Evaluierungsexperimente .....	13
3.3	CMB-Inverse Modelling .....	13
4	Problemstellung und Zielsetzung .....	13
5	Statistische Methoden der Fehlerermittlung.....	15
5.1	Fehlerarten.....	17
5.2	Fehler der Eingangsgrößen.....	18
5.2.1	Streuungsmaße.....	18
5.2.2	Stichprobentechnik und Schätzverfahren.....	19
5.3	Ermittlung des Gesamtfehlers .....	23
6	Literatur.....	25

# Vergleich unterschiedlicher Methoden zur Bewertung und Berechnung der Unsicherheiten der NMVOC–Emissionen aus der Lösemittelverwendung.

## 1 Einleitung

Welche Methoden stehen zur Bewertung und Berechnung von Unsicherheiten der Lösemittlemissionen zur Verfügung?

Zunächst ist in Methoden zur Unsicherheitsanalyse und zur Verifikation der berechneten Emissionen zu unterscheiden. Zur Unsicherheitsanalyse stehen qualitative, sowie deren quantitative Bewertung und Quantitative Ansätze zur Verfügung. Als quantitative Ansätze stehen die Methode der Fehlerfortpflanzung und die Methode der Monte-Carlo-Simulation zur Verfügung. Zur Verifikation der berechneten Emissionen sind Plausibilitätsprüfungen und Evaluierungsexperimente geeignet. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Ansätze kurz beschrieben und in Bezug auf ihre Eignung zur Ermittlung der Unsicherheiten soweit möglich bewertet.

## 2 Methoden zur Unsicherheitsanalyse

### 2.1 Qualitative Methoden

Einfachere Ansätze zur Bewertung der Unsicherheiten berechneter Emissionen basieren auf einer eher qualitativen bzw. vergleichenden Bewertung. So wird in [EEA 1996] eine 5-stufige Bewertungsskala von Emissionsfaktoren mit folgenden Merkmalen ausgewiesen:

Stufe A	Wert basiert auf einer großen Zahl an Messungen an zahlreichen Anlagen, welche die Quellgruppe voll repräsentieren
Stufe B	Wert basiert auf einer großen Zahl an Messungen an zahlreichen Anlagen, welche einen großen Teil der Quellgruppe repräsentieren
Stufe C	Wert basiert auf einer Anzahl an Messungen an wenigen repräsentativen Anlagen, oder auf einer Experteneinschätzung auf der Grundlage verschiedener relevanter Fakten
Stufe D	Wert basiert auf einer einzelnen Messung oder auf einer Experteneinschätzung auf der Grundlage verschiedener relevanter Fakten und einiger Annahmen
Stufe E	Wert basiert auf einer Experteneinschätzung auf der Grundlage von Annahmen

Ähnliche Bewertungen werden auch den Daten zur Beschreibung des Umfangs emissionsrelevanter Aktivitäten (z. B. Produktionsdaten) zugeordnet. Die „mittlere Qualitätsstufe C“ wird dabei vergeben, wenn es sich z. B. um offizielle Statistiken handelt. Andere Bewertungen werden dann relativ zu „C“

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

vorgenommen, wobei präziser ermittelte Aktivitätsdaten entsprechend mit „A“ oder „B“ bewertet werden, während Aktivitätsdaten, die aus anderen Werten bzw. Ersatzindikatoren abgeleitet wurden, nach „D“ oder „E“ zugeordnet werden. Die Gesamtbewertung der aus Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten ermittelten Emissionen erfolgt dann nach dem in Tabelle 26 dargestellten Schema.

Dieses Schema zielt zwar ursprünglich eher auf die Bewertung berechneter jährlicher Gesamtemissionen für eine Quellengruppe bzw. einen emissionsrelevanten Prozess ab, ließe sich sinngemäß aber auch auf die weiteren Arbeitsschritte zur Ermittlung zeitlich, räumlich und stofflich hoch aufgelöster Emissionen übertragen. Eine quantitative Einordnung von Unsicherheiten ist damit jedoch nicht verbunden.

Tab. 1: Gesamtbewertung berechneter Emissionen aus Kombinationen der Bewertungen von Emissionsfaktoren und Aktivitätsdaten

Kombination	Endfaktor	Kombination	Endfaktor	Kombination	Endfaktor
A - A	A	D - A	C	E - B	D
B - A	A	C - C	C	D - D	D
B - B	B	D - B	C	E - C	D
C - A	B	D - C	C	E - D	D
C - B	B	E - A	C	E - E	E

## 2.2 Quantitative Einordnung der qualitativen Bewertungen

Eine quantitative Einordnung der qualitativ eingeordneten Unsicherheiten von Aktivitätsdaten, Emissionsfaktoren sowie daraus ermittelter Emissionen wird in [RIVM 1997] vorgenommen, und zwar mit folgender Skalierung:

- geringe Unsicherheiten (±10%)
- mittlere Unsicherheiten (±50%)
- hohe Unsicherheiten (±100%)
- sehr hohe Unsicherheiten (>100%)

Auf globaler bzw. regionaler Ebene wird hierbei den Aktivitätsdaten, Emissionsfaktoren und Emissionsdaten im Lösemittelbereich eine mittlere Unsicherheit zugeordnet. Im Vergleich dazu wird im Bereich der Verbrennung fossiler Energieträger den Aktivitätszahlen eine „geringe“ Unsicherheit

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

zugewiesen, den Emissionsfaktoren und damit auch den berechneten Emissionen jedoch auch eine „mittlere“ Unsicherheit. Ergänzend wird in [RIVM 1997] aber auch darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse der Schätzungen von Unsicherheiten berechneter Emissionsdaten maßgeblich davon abhängen, welche Querschnitte hinsichtlich Raumbezug und Quellenbezug angesetzt werden.

### 2.3 Quantitative Einordnung der qualitativ eingeordneten Unsicherheiten von Lösemittlemissionsberechnungen

Die Ermittlung von Emissionen aus Lösemittelanwendungen beruht vorrangig auf so genannten Top-down-Ansätzen. Bei den hierbei verwendeten Eingangsdaten handelt es sich vielfach um einzelne Werte, wie z. B. die Produktions- oder Außenhandelsmenge einer bestimmten Lackart, Emissionsangaben für eine immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlage, die monatlichen Nettoproduktionswerte eines Wirtschaftszweiges etc. Statistische Streuungsmaße lassen sich hierfür jedoch nur bestimmen, wenn das zur Ermittlung solcher Gesamt- oder Durchschnittswerte verwendete Zahlenmaterial oder zumindest damit vergleichbare Daten zur Verfügung stehen. Dies ist aber im Fall der Lösemittelanwendungen sehr häufig nicht gegeben. Damit sind hier die Möglichkeiten zur expliziten Quantifizierung von Unsicherheiten weitaus stärker limitiert als im zuvor diskutierten Quellsektor Straßenverkehr. Die Bestimmung statistischer Streuungsmaße muss sich hier auf die exemplarische Untersuchung einzelner Aspekte der Emissionsberechnung beschränken. Dies wird in den nachfolgenden Ausführungen zu einzelnen Verursacherbereichen von Lösemittel-Emissionen ausführlicher diskutiert.

Um trotz dieser Einschränkungen zumindest orientierende Aussagen über die Unsicherheiten berechneter Lösemittel-Emissionen treffen zu können, ist eine eher qualitativ ausgerichtete Betrachtungsweise zu entwickeln und anzuwenden. Das vorrangige Ziel ist dabei, zumindest eine relative Bewertung von Unsicherheiten im Lösemittelsektor zu ermöglichen. Um eine solche Bewertung transparent bzw. nachvollziehbar und – über die verschiedenen Quellgruppen hinweg - vergleichbar gestalten zu können, muss sie auf einem Bewertungsschema mit definierten Kriterien aufbauen. Anhand der im Folgenden aufgestellten Kriterien lassen sich Charakteristika der betrachteten Quellgruppen sowie die jeweiligen Eingangsdaten und deren methodische Verknüpfungen vergleichend bewerten:

- sektorale bzw. stoffliche Abgrenzbarkeit der betrachteten Quellgruppe
- Homogenität der betrachteten Quellgruppe
- Charakterisierung der Datengrundlage zur Emissionsberechnung:
- Verfügbarkeit von Detailuntersuchungen
- Eignung und Unschärfen von Eingangsdaten zur Beschreibung emissionsbestimmender Parameter
- Umfang und Eignung einzubeziehender Ersatzindikatoren
- Umfang und Plausibilität notwendiger Annahmen zur Vervollständigung der Datenbasis
- Bedeutung immissionsschutzrechtlich genehmigungspflichtiger Anlagen innerhalb der betrachteten Quellgruppe

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

Angelehnt an Vorschläge der U.S. Environmental Protection Agency [EPA 1999], die sinngemäß unter anderem auch von der Europäischen Umweltagentur übernommen werden [EEA 1999], wird zur eigentlichen Bewertung eine 5-stufige Skala definiert. Exemplarische Beschreibungen der einzelnen Stufen sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Tab. 2: Bewertungsskala und exemplarische Beschreibungen zur Einordnung der Unsicherheiten hoch aufgelöster Emissionsberechnungen

Stufe	exemplarische Beschreibungen
1	<p>Quellgruppen-Abgrenzung: <i>keine Einschränkungen hinsichtlich sektoraler und stofflicher Abgrenzung</i></p> <p>Quellgruppen-Homogenität: Quellgruppe sehr homogen strukturiert</p> <p>Datengrundlage: keine Einschränkungen hinsichtlich Umfang, Qualität und Repräsentativität der Eingangsdaten, ggf. liegen umfangreiche Detailuntersuchungen vor</p> <p>Anlagen-/betriebsbezogene Daten: <i>ggf. sind Emissionen weitestgehend aus anlagen-/betriebsbezogenen Daten ermittelbar</i></p>
2	<p>Quellgruppen-Abgrenzung: <i>keine wesentlichen Einschränkungen hinsichtlich sektoraler und/oder stofflicher Abgrenzung</i></p> <p>Quellgruppen-Homogenität: Quellgruppe im wesentlichen homogen strukturiert</p> <p>Datengrundlage: kaum Einschränkungen hinsichtlich Umfang, Qualität und Repräsentativität der Eingangsdaten, ggf. liegen Detailuntersuchungen vor</p> <p>Anlagen-/betriebsbezogene Daten: <i>ggf. sind Emissionen zumindest in signifikantem Umfang aus anlagen-/betriebsbezogenen Daten ermittelbar</i></p>
3	<p>Quellgruppen-Abgrenzung: <i>Einschränkungen hinsichtlich sektoraler und/oder stofflicher Abgrenzung</i></p> <p>Quellgruppen-Homogenität: Quellgruppe näherungsweise als homogen strukturiert anzusehen</p> <p>Datengrundlage: Umfang, Qualität und Repräsentativität der Eingangsdaten sind eingeschränkt, Detailuntersuchungen nicht verfügbar, Ersatzindikatoren sind einzubeziehen</p> <p>Anlagen-/betriebsbezogene Daten: <i>ggf. sind Emissionen nur in geringerem Umfang aus anlagen-/betriebsbezogenen Daten ermittelbar</i></p>
4	<p>Quellgruppen-Abgrenzung: <i>sektorale und/oder stoffliche Abgrenzung nur näherungsweise möglich</i></p> <p>Quellgruppen-Homogenität: Quellgruppe insgesamt sehr inhomogen strukturiert</p> <p>Datengrundlage: Datengrundlage weist signifikante Unzulänglichkeiten auf, die durch Ersatzindikatoren bzw. Annahmen nur bedingt zu beheben sind</p> <p>Anlagen-/betriebsbezogene Daten: <i>ggf. sind Emissionen kaum aus anlagen-/betriebsbezogenen Daten ermittelbar</i></p>

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung



Stufe	exemplarische Beschreibungen
5	Quellgruppen-Abgrenzung: <i>sektorale und/oder stoffliche Abgrenzung stützt sich auf grobe Annahmen</i> Quellgruppen-Homogenität: Quellgruppe äußerst inhomogen strukturiert Datengrundlage: Datengrundlage weist gravierende Lücken und Unschärfen auf bzw. basiert weitestgehend auf Annahmen Anlagen-/betriebsbezogene Daten: <i>Emissionen nicht aus anlagen-/betriebsbezogenen Daten ermittelbar</i>

Die Reihenfolge der zuvor genannten Kriterien ist hier nicht als Rangordnung der Bedeutung zu verstehen. Für die Gesamteinschätzung der Unsicherheiten eines Rechenschrittes für eine bestimmte Quellgruppe ist nicht nur von Bedeutung, ob die Mehrzahl o.g. Kriterien eher im positiven Sinne (geringe Unsicherheiten) oder negativen Sinne (hohe Unsicherheiten) zu bewerten ist. Entscheidender kann vielmehr sein, ob bestimmte Kriterien in besonders ausgeprägtem Maße positiv bzw. negativ zu bewerten sind.

In Tabelle 3 sind die 5 wichtigsten Quellgruppen, die zusammen einen Anteil von mehr als 75 % der gesamten Lösemittel-Emissionen verursachen sowie die übrigen Emittentenbereiche in zusammenfassender Form nochmals ausgewiesen.

Die Datenbasis zur Ermittlung zeitlich, räumlich und stofflich hoch aufgelöster Emissionsdaten stellt sich für die Anwendung von Druckfarben und Druckhilfsmitteln als die belastbarste dar. Es folgen die Anstrichmittel und Verdünnungen sowie die Konsumgüter für den Haushaltsbereich. Letztgenannter Bereich weist dabei insbesondere Defizite in der zeitlichen Auflösung auf, während im Gegensatz dazu die Ortsauflösung und die Spezifizierung von VOC-Komponenten mit relativ geringen Unsicherheiten verbunden sind. Auch die unter „sonstige Emittentenbereiche“ zusammengefassten Quellen weisen insgesamt noch eine zufrieden stellende Eingangsdatenbasis auf. Die höchsten Unsicherheiten liegen hier in der Spezifizierung der VOC-Komponenten begründet. An letzter Stelle dieser Rangliste stehen die Kunststoffverarbeitung sowie die Oberflächenbehandlung mit überdurchschnittlichen Unsicherheiten in nahezu allen Schritten der Emissionsberechnung.

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

Fasst man alle unter dem Begriff „Anwendung von Lösemitteln und lösemittelhaltigen Erzeugnissen“ subsumierten Emittentenbereiche zusammen, und zwar gewichtet nach ihren jeweiligen Emissionsanteilen, so ergeben sich insgesamt Unsicherheiten, die als durchschnittlich einzuordnen sind. Dies trifft auf die Datengrundlage zur Ermittlung von Jahreswerten der Emission zu, auf die Ortsauflösung sowie auch die zur Verfügung stehenden Daten zur Aufschlüsselung von NMVOC nach Stoffgruppen. Überdurchschnittliche Fehlerbandbreiten sind dagegen in der zeitlichen Disaggregation jährlicher Emissionen zu konstatieren. Zur Schließung vorhandener Daten- und Informationslücken sind hier verstärkt Annahmen über Jahres-, Wochen- und Tagesgänge der emissionsverursachenden Aktivitäten bzw. der Emissionen erforderlich.

Eine Überführung der im Lösemittelsektor vorgenommenen qualitativen Bewertungen der Unsicherheiten von Emissionsberechnungen in quantitative Bewertungen, wie dies z. B. in [RIVM 1997] vorgenommen wurde, kann lediglich einen orientierenden Charakter haben. Eine Vergleichbarkeit mit weitaus detaillierteren und belastbareren Ergebnissen für den Sektor Straßenverkehr ist dabei kaum bzw. nur sehr eingeschränkt gegeben. Jedoch kann zumindest ein Eindruck über die Größenordnung der zu erwartenden Unsicherheiten vermittelt werden.

Angelehnt an die in [RIVM 1997] vorgeschlagene Skalierung sowie unter Abwägung der in Expertengesprächen zusammengetragenen groben Einschätzungen der Unsicherheiten verschiedener Eingangsdaten, werden der gebildeten 5-stufigen qualitativen Bewertungsskala näherungsweise die in Tabelle 4 angegebenen Unsicherheitsbandbreiten zugeordnet.

Tab. 3: Zuordnung geschätzter Standardabweichungen (95 % Konfidenzintervall) zu den im Lösemittelsektor verwendeten qualitativen Bewertungsstufen

Bewertungsstufe	geschätzte Bandbreite der 95% - Konfidenzintervalle
1	bis $\pm 15$ %
2	$\pm 15$ % bis $\pm 30$ %
3	$\pm 30$ % bis $\pm 50$ %
4	$\pm 50$ % bis $\pm 100$ %
5	über 100 %

Diese Zuordnung beinhaltet somit eine nicht-lineare Abstufung der Bewertungsskala. In den bisher durchgeführten Gesamtbewertungen für die Bereiche Lackanwendung, Oberflächenbehandlung, sonstige Lösemittelanwendungen sowie in der zusammenfassenden Bewertung des gesamten Lösemittelsektors ist eine solche Nicht-Linearität – d.h. eine überproportionale Zunahme der Unsicherheitsbandbreiten in Richtung auf das untere Ende der Bewertungsskala - nicht berücksichtigt. Dies erscheint auch gerechtfertigt, da z. B. die Unsicherheiten der Gesamtemissionen aus der Anwendung

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

von Anstrichmitteln und Verdünnungen tendenziell niedriger liegen, als die Unsicherheiten der nach Anwendungsbereichen disaggregierten Emissionen. Da die Emission nicht kleiner Null werden kann, kann auch die untere Grenze der Unsicherheitsbandbreite einen relativen Wert von -100 % nicht unterschreiten. Das bedeutet, in Bewertungsstufe 5 liegt in jedem Fall eine linkssteile Verteilung vor.

Gemäß Tabelle 3 ergibt sich damit für die Unsicherheit der berechneten NMVOC-Jahresemission aus der Anwendung von Lösemitteln und lösemittelhaltigen Erzeugnissen eine Bandbreite des 95% - Konfidenzintervalls zwischen  $\pm 30 \%$  und  $\pm 50 \%$ . Beim gegenwärtigen Kenntnisstand erscheint diese Bandbreite realistisch, zudem deckt sie sich mit der Einschätzung in [RIVM 1997].

Zusammenfassend kann damit die Feststellung getroffen werden, dass sektoral hoch aufgelöste Daten über die NMVOC-Emissionen aus der Anwendung von Lösemitteln und lösemittelhaltigen Erzeugnissen mit etwas höheren Unsicherheiten behaftet sind als z. B. die für den Straßenverkehr ermittelten Unsicherheiten. Gleichsam ist festzuhalten, dass nicht nur die Höhe der Emissionen eine hohe Variabilität aufweist, sondern auch die den hoch aufgelösten Emissionsdaten zuzuordnenden Unsicherheiten.

## 2.4 Quantitative Ansätze zur Ermittlung der Unsicherheiten

### 2.4.1 Methode der Fehlerfortpflanzung

Die Berechnung der Emissionen von Luftschadstoffen erfolgt üblicherweise durch eine einfache Multiplikation eines Emissionsfaktors mit einer statistischen Bezugszahl (Aktivität). Auch die teilweise Verwendung komplexerer Modelle lässt sich meist auf dieses einfache Grundschema zurückführen. Soll nun die Unsicherheit der Emission festgestellt werden, kann dies nach Ermittlung des Fehlers der Eingangsgrößen kann diese mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetz quantifiziert werden. Streng gilt für die Durchführung der Fehlerfortpflanzung, dass die Eingangsgrößen folgende Voraussetzungen erfüllen:

Sie müssen einer Gauß-Verteilung unterliegen, deren Standardabweichung 30 % nicht übersteigt.

Voraussetzung für die Anwendbarkeit ist auch die statistische Unabhängigkeit der verwendeten Daten, d.h. sie müssen auf unterschiedlichen Annahmen beruhen, aus unterschiedlichen Mess-Serien stammen, die etwa unterschiedliche Methodik verwendeten etc.

Bei der Anwendung der Fehlerfortpflanzung auf Lösemittlemissionsberechnungen ergeben sich somit folgende Nachteile:

- Erstens unterliegen die Eingangsgrößen häufig anderen Verteilungen als Gauß Verteilungen
- Zweitens sind die Fehler der Eingangsgrößen häufig größer als 30 %
- Drittens sind die Eingangsgrößen häufig nicht voneinander unabhängig

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung



Daraus kann geschlossen werden, dass die Fehlerfortpflanzung keine geeignete Methode zur Quantifizierung von Unsicherheiten der Lösemittlemissionen ist.

### 2.4.2 Monte-Carlo-Simulation

Anderen Verteilungen als Gauß-Verteilungen kann mit dem Fehlerfortpflanzungsgesetz nicht adäquat entsprochen werden. Stattdessen ist es aber möglich, durch zufällige Variation der Eingangsdaten im Bereich und mit Gewichtung der jeweiligen Verteilung ein mit Unsicherheit behaftetes Ergebnis zu erhalten. Bei einer Vielzahl von derartigen Rechenläufen erhält man eine Verteilung des Ergebnisses in Abhängigkeit der Verteilung der Eingangsdaten. Dieses

—Monte-Carlo-Verfahren kann jede beliebige Verteilung berücksichtigen und ist auch in der Lage Korrelationen zu berücksichtigen, benötigt aber einen größeren Rechenaufwand. Da die in der Praxis verwendeten Verteilungen insofern ähnlich einer Gauß-Verteilung sind, als die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Wertes in der Nähe des modalen Wertes für größer angesehen wird als im Bereich der Maxima und Minima, ist die Auswirkung auf das Ergebnis (Verringerung des relativen Fehlers bei Addition vieler Einzelparameter) auch ähnlich. Insbesondere Fehler, die über 30% hinausgehen, und korrelierende Eingangsgrößen können wesentlich besser behandelt werden.

### 2.4.3 Durchführung einer Monte-Carlo-Simulation

Als Methode zur quantitativen Ermittlung der Unsicherheiten von Lösemittlemissionen ist das Monte-Carlo Verfahren eine recht geeignete Methode. Dazu wurde die kommerzielle Software @RISK von PALISADE Co., ein Add-on zu MS-Excel, verwendet. Wie bereits erwähnt, beruht das Monte-Carlo Verfahren auf der zufälligen und unabhängigen Variation aller Eingangsparameter in jenem Bereich und mit jener Gewichtung, die mit der jeweiligen Verteilung vorgegeben sind. Zur Ermittlung der erforderlichen Anzahl an Iterationen muss ein Konvergenzkriterium zu Hilfe genommen werden, dass bei 10 000 erreicht sein müsste. Als Ergebnis der Monte-Carlo Simulation werden in jedem der 10000 Einzelläufe für jede Ergebnisgröße Einzelergebnisse berechnet. Daraus konnten Verteilungen und statistische Parameter (Mittelwert, Standardabweichung) ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Methode ist stark von der Qualität der Input-Verteilungen abhängig. Dazu sind Expertenbefragungen notwendig. Die Methode wurde vom IER am Farben-Lack-Modell des Lösemittelinventars angewendet. Die Grundannahme war zunächst mal eine Quasi-Normalverteilung für die meisten Eingangsgrößen. Zusätzlich wurde festgelegt, dass Produktions-, Außenhandels- und Verbrauchsmengen nicht kleiner als Null sind. Für Produktions- und Außenhandelsmengen wurde eine Standardabweichung (67-% Konfidenzintervall) von 5 % angenommen. Für die Lackverbrauchsmengen, die der VDL für 1995 angegeben hat wurde eine Standardabweichung von 30 % angenommen. Für die Emissionsfaktoren wurde auch weitgehend eine Normalverteilung mit einer Standardabweichung von 30 % angenommen. Hier wurde zusätzlich angenommen, dass sie nicht kleiner Null sind und 100 % nicht übersteigen. Außerdem wurde für die Emissionsfaktoren angenommen, dass sie zwischen 80 % und

100 % liegen. In manchen Fällen können auch andere Verteilungen gewählt werden. Es kommen dabei im wesentlichen Lognormal-, Uniform-, und Triangular – Verteilungen als Alternative in Frage.

## 3 Verifikationsmethoden

### 3.1 Plausibilitätsprüfungen

Als Plausibilitätsprüfung ist insbesondere der Abgleich der über den produktbezogenen Ansatz ermittelten nach Stoffklassen disaggregierten Lösemittelverbrauchsmengen mit den über einen so genannten Lösemittelbezogenen Ansatz erhaltenen Lösemittelverbrauchsmengen. Hierzu müssen die sektoral ermittelten Lösemittelverbräuche soweit möglich stofflich aufgelöst werden, zu Stoffklassen aggregiert werden und über alle Sektoren addiert werden. Die erhaltenen Mengen könnten dann mit ESIG-Daten abgeglichen werden. In Abschnitt 2.1.1 ist eine ältere Plausibilitätsbetrachtung aus einem früheren Projektbericht des IER beschrieben

#### **3.1.1 Gesamteinschätzung der Unsicherheiten berechneter Jahresemissionen aus Lösemittelanwendungen in Deutschland und Westeuropa**

Wie bereits erwähnt, stellt die Anwendung von organischen Lösemitteln und lösemittelhaltigen Erzeugnissen eine Quellgruppe dar, die hinsichtlich ihrer stofflichen sowie prozess- und anwendungstechnischen Vielfalt weder mit dem zuvor diskutierten Straßenverkehr noch mit anderen Quellgruppen vergleichbar ist. In Anbetracht dessen stellt sich zunächst die vordringliche Frage, inwieweit der gesamte Verbrauch und daraus die Gesamtemissionen an flüchtigen organischen Lösemitteln auf Basis der heutigen Erkenntnis überhaupt vollständig abgeschätzt werden kann, d.h. ob gegebenenfalls weitere Anwendungsbereiche von Lösemitteln bislang gar nicht als solche erkannt sind.

Entsprechend der verfügbaren Datenlage kann dieser Frage zunächst am Beispiel Westeuropas nachgegangen werden. Die abgesetzte Frischwarenmenge an organischen Lösemitteln wird hier vom Zusammenschluss der europäischen Lösemittelhersteller (ESIG) für das Jahr 1993 mit 4,3 Mio. t angegeben. Die Frischwarenmenge ist näherungsweise gleichzusetzen der Summe aller Stoffausträge, d.h. in erster Linie der Emission in die Atmosphäre, ggf. auch den Einträgen in Wasser und Boden, sowie der Entsorgung (z. B. thermische Verwertung, Wiederaufbereitung und Export in Drittländer). Im Vergleich dazu werden die entsprechenden Lösemittel-Emissionen im Jahr 1994 gemäß der Emissionsdatenbasis CORINAIR auf insgesamt 3,6 Mio. t beziffert [EEA 1996]. Damit würden sich die angegebenen Emissionen in die Atmosphäre auf rund 84 % des angegebenen Frischwarenabsatzes belaufen. Unter Berücksichtigung der anderweitigen Stoffaustragspfade deutet dies auf eine plausible Übereinstimmung hin.

Aufgrund bislang nicht verfügbarer Angaben zum Frischwarenabsatz in Deutschland ist ein solcher Vergleich mit eigenen Berechnungen der Lösemittel-Emissionen auf nationaler Ebene nicht möglich. Es kann jedoch ein indirekter Vergleich gezogen werden, wobei die Lösemittel-Emissionen in

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

Deutschland gemäß der CORINAIR-Datenbasis knapp 1,1 Mio. t im Jahr betragen, und aktuelle eigene Berechnungen – die auch sämtliche, in CORINAIR berücksichtigten Emittentenbereiche mit beinhalten – eine Gesamtemission von ca. 900 kt für 1994 ergeben. Für Baden-Württemberg weisen die CORINAIR-Daten eine Lösemittel-Emission von rund 150 kt/a aus, während sich eigene Berechnungen auf ca. 140 kt/a belaufen. Die jeweiligen Abweichungen bewegen sich damit in einem Bereich von  $\pm 20$  %. Damit liegen zumindest Hinweise dafür vor, dass die den jährlichen Gesamtemissionen an Lösemitteln zuzuordnenden Unsicherheiten in ähnlicher Größenordnung liegen dürften wie die Unsicherheiten der Emissionsdaten für den Verkehrssektor.

### 3.2 Evaluierungsexperimente

Bei Evaluierungsexperimenten werden berechnete Immissionen von Einzelstoffen mit gemessenen Immissionen verglichen. Sie dienen dazu zu überprüfen wie stark das Modell von der Realität abweicht. Zurzeit sind uns Ergebnisse aus Augsburg und Paris bekannt.

### 3.3 CMB-Inverse Modelling

Ein weiterer Ansatz zur Validierung von Emissionsmodellen ist der so genannte Chemical Mass Balance Ansatz (CMB). Hier werden mittels inverser Modellierung gemessene Immissionen anhand charakteristischer Stoff- und Konzentrationsprofile zur Quelle zurückberechnet. Die so berechneten Emissionen werden dann mit den berechneten Emissionen verglichen.

## 4 Problemstellung und Zielsetzung

Emissionsdaten in Form von Emissionsinventaren dienen als Eingangsdaten zur Modellierung von atmosphärischen Transport-, Umwandlungs- und Depositionsprozessen und sind somit u.a. unabdingbare Voraussetzung für die numerische Simulation der Konzentrationen und Depositionsraten primärer und sekundärer Luftschadstoffe und Ausgangspunkt zur Entwicklung von Luftreinhaltestrategien. Über die Zuverlässigkeit und Fehlerbandbreite der erhobenen Emissionsdaten lagen bislang jedoch nur unzureichende Kenntnisse vor.

Erste Ansätze beinhalteten pauschale Fehlerschätzungen, die sich auf die Jahresemissionen eines Schadstoffes bzw. einer ganzen Stoffklasse bezogen [Bultjes 1987]. In späteren Untersuchungen wurde eine genauere quellgruppenbezogene Aufgliederung von Fehlerschätzungen angestrebt, und zwar - wie z. B. in [Baars 1993] - vorrangig für den Bereich der Kraftfahrzeugabgase. In der präzisen Identifizierung der Ursachen von Unsicherheiten und einer möglichst weitgehenden, ursachenbezogenen Quantifizierung von Unsicherheitsbandbreiten in sämtlichen Teilschritten hoch aufgelöster Emissionsberechnungen bestehen aber nach wie vor erhebliche Kenntnislücken [McInnes 1996].

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung



Um möglichst präzise Aussagen über die Qualität der modellierten Emissionsdaten treffen zu können, ist es erforderlich, durch geeignete Methoden statistische Fehlerbandbreiten der Eingangsdaten zu ermitteln und diese über Sensitivitätsuntersuchungen und statistische Fehlerrechnung zu einem Gesamtfehler zu verknüpfen, der als Maß für die Güte der berechneten Emissionsdaten angegeben werden kann. Sofern Art und Umfang der Eingangsdaten eine konkrete Quantifizierung von Fehlerbandbreiten nicht ermöglichen, sind zumindest qualitative Bewertungen anhand definierter Kriterien anzustreben.

Aus den Ergebnissen der Unsicherheitsberechnungen können diejenigen Eingangsdaten ermittelt werden, deren Fehler am stärksten zum Fehler der Gesamtemissionen beitragen und deren Genauigkeit im Rahmen einer Modifizierung des Berechnungsmodells vorrangig verbessert werden sollte. Umgekehrt kann möglicherweise der Aufwand bei der Ermittlung von wenig sensitiven Eingangsdaten bei annähernd gleich bleibender Qualität der berechneten Emissionen reduziert werden.

Grundlage der hier durchgeführten Fehlerbetrachtungen sind bereits entwickelte Modelle, wie sie zur Erstellung von Emissionsinventaren verwendet werden. Als Eingangsdaten dienen verfügbare, bereits in anderem Zusammenhang erhobene Daten über aktivitäts- und emissionsbezogene Eingangsgrößen. Zusätzliche Erhebungen bzw. Messungen zur Vergrößerung der Eingangsdatenbasis und somit zur Präzisierung der Ergebnisse der Emissionsmodellierung werden nicht durchgeführt. Die durchgeführten Fehlerabschätzungen konzentrieren sich auf die beiden wesentlichen Quellgruppen für  $\text{NO}_x$ - und NMHC-Emissionen, d.h. den Straßenverkehr und die Anwendung von Lösemitteln und lösemittelhaltigen Erzeugnissen.

## 5 Statistische Methoden der Fehlerermittlung

Mit Hilfe der statistischen Fehlerrechnung können physikalische Messgrößen bzw. aus Messwerten abgeleitete physikalische Größen auf ihre Genauigkeit hin überprüft werden. Durch Berechnung von Fehlerbandbreiten bzw. Vertrauensbereichen können Schlüsse über die Qualität der ermittelten physikalischen Größe gezogen werden.

Das Beobachtungsmaterial bei der Ermittlung physikalischer Größen wird allgemein in direkte und vermittelnde Messungen gegliedert, wobei unter vermittelnden Beobachtungen Messungen verstanden werden, die nicht unmittelbar die gesuchte Größe ergeben, sondern die erst über einen funktionalen Zusammenhang der gemessenen Größen zur gesuchten Größe führen.

Großräumige Emissionen aus Punkt-, Linien- oder Flächenquellen können nur unter großem Aufwand messtechnisch erfasst werden, so dass diese i.d.R. durch Modellrechnungen ermittelt werden müssen. Jedes Rechenmodell basiert auf einer Beziehung in der Form von Gleichung 1, mit der sich die Emission  $E$  einer luftverunreinigenden Substanz als Funktion eines Satzes von Eingangsdaten (Basisdaten)  $x_1, x_2, \dots, x_n$  darstellen lässt. Ein Element  $x_i$  dieses Satzes kann z. B. einen aktivitätsbezogenen Parameter oder einen Emissionsfaktor repräsentieren.

$$E = E(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Der Gesamtfehler des ermittelten Emissionswertes ( $\Delta E$ ) ist dabei auf zwei wesentliche Fehlerursachen zurückzuführen:

- Modellfehler:
- unberücksichtigte Teilbereiche (unvollständiges Modell)
  - falsche oder ungenaue funktionale Zusammenhänge der Eingangsdaten
  - Verwendung von Hilfsgrößen bei unbekanntem Eingangsdaten

Fehler der Eingangsdaten  $x_i$

Modellfehler resultieren entweder aus der Nichtberücksichtigung spezieller Emissionsteilbereiche (z. B. aus Unkenntnis oder wegen unzureichender Datenlage), falschen Modellvorstellungen oder aus dem Fehlen geeigneter Eingangsdaten.

Durch nicht berücksichtigte Emissionsteilbereiche bzw. Einflussfaktoren verursachte Modellfehler sind in der Regel nur schwer abzuschätzen, da sie aufgrund fehlender wissenschaftlicher Ergebnisse nicht erkannt werden bzw. keine zur Fehlerquantifizierung geeigneten Daten vorliegen. Werden alle bekannten Teilbereiche und Einflussfaktoren in einem Modell berücksichtigt, so ist zunächst davon auszugehen, dass das Modell vollständig ist. Dies schließt nicht aus, dass das Modell aufgrund neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse zukünftig ergänzt und fortgeschrieben werden muss, was u. U. zu einer Vergrößerung der ermittelten Gesamtfehlerbreiten führen kann.

Modellfehler durch falsche oder ungenaue funktionale Zusammenhänge der Eingangsdaten können bei Modellen zur Emissionsberechnung in der Regel ausgeschlossen werden, da die Eingangsdaten per Definition schon aufeinander abgestimmt sind. Die eigentliche Emissionsmodellierung besteht im

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

Prinzip aus einer einfachen Multiplikation von Aktivitätsparametern mit entsprechenden Emissionsfaktoren.

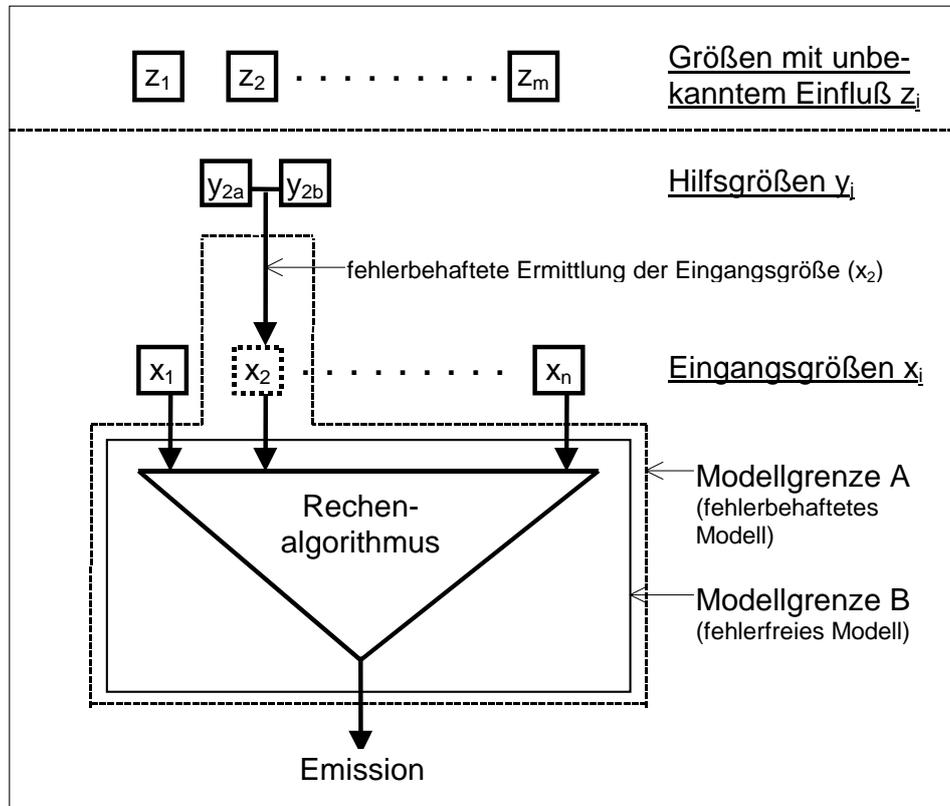


Abb. 1: Definition der Modellgrenzen

Liegen benötigte Eingangsdaten nicht vor, so ist man häufig auf die hilfswise Verwendung von Daten angewiesen, aus denen die eigentlich benötigten Eingangsdaten abgeleitet werden können. Neben den Fehlerbandbreiten der Daten dieser Hilfsgrößen entstehen durch die Übertragung auf die benötigte Eingangsgröße zusätzliche modellbedingte Fehler. Sind Korrelation zwischen Hilfs- und Eingangsgrößen und die Fehlerbandbreiten der Hilfsdaten bekannt, so lassen sich daraus die benötigten Eingangsdaten und deren Fehlerbereiche berechnen.

In Abb. 1 sind der Einfluss des Übertragungsfehlers von Hilfsgrößen auf die eigentlichen Eingangsgrößen und die sich daraus ergebenden möglichen Modelldefinitionen schematisch dargestellt. Fasst man die Grenzen des Modells so eng, dass das Modell selbst als fehlerfrei angesehen werden kann (Modellgrenze B), so ist der Gesamtfehler der Emission unmittelbar und ausschließlich abhängig von den Fehlerbandbreiten der Eingangsdaten ( $\Delta x_i$ ). Die Auswirkungen dieser Fehler auf den Emissionswert können dann prinzipiell mit Methoden der Fehleranalyse (Sensitivitätsuntersuchungen) quantifiziert und zu einem Gesamtfehler  $\Delta E$  nach dem Prinzip der Fehlerfortpflanzung verknüpft werden.

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

### 5.1 Fehlerarten

Bei der Betrachtung der Fehlerbandbreiten der Eingangsdaten sind die beiden grundsätzlichen Fehlerarten zufällige und systematische Fehler zu unterscheiden.

Zufällige Fehler werden durch die statistische Streuung von Einzelwerten um den arithmetischen Mittelwert beschrieben und stehen somit für die Präzision des Modells oder Messsystems. Ein Fehler heißt zufälliger Fehler, wenn

- a) ein positiver und ein gleich großer negativer Fehler gleich wahrscheinlich sind,
- b) ein kleiner Fehler wahrscheinlicher begangen wird als ein großer,
- c) für die fehlerfreie Beobachtung die größte Wahrscheinlichkeit auftritt, und
- d) die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines beliebigen Fehlers unabhängig vom Vorhandensein anderer Fehler ist [HÄNSEL 1967].

Unter der Voraussetzung, dass die Einzelwerte bekannt sind, können die zufälligen Fehler durch statistische Fehlerrechnungsmethoden quantifiziert werden. Bei der Emissionsmodellierung stehen diese Einzelwerte jedoch nicht bei allen Eingangsdaten in ausreichender Quantität und Qualität zur Verfügung, so dass eine eindeutige statistische Beschreibung der Streuungsmaße nicht in allen Fällen möglich ist. Insbesondere im Quellsektor Lösemittel liegen benötigte Eingangsdaten häufig nur als grobe Mittelwerte vor, wodurch eine Fehlerermittlung nach statistischen Methoden erschwert wird. Auch im Quellsektor Straßenverkehr ist die Datensituation in einigen Teilbereichen nach wie vor unzureichend. In solchen Fällen und in den Fällen, bei denen aufgrund der physikalischen Komplexität der Eingangsgröße die Streuung nicht durch statistische Methoden quantifiziert werden kann, ist man auf plausible Schätzungen der Fehlerbandbreiten angewiesen.

Systematische Fehler einer Größe sind innerhalb des vorgegebenen Systems konstant bzw. nach bestimmbar Gesetzmäßigkeiten veränderlich und stehen somit für die Genauigkeit des Modells oder Messsystems. Sie können innerhalb des Systems nicht mit Hilfe statistischer Methoden quantifiziert werden. Vielmehr müssen zur Quantifizierung grundsätzlich die das gleiche Messobjekt beschreibenden Ergebnisse mehrerer voneinander unabhängiger Systeme miteinander verglichen werden. Im Idealfall steht ein objektives (fehlerfreies oder mit bekanntem systematischem Fehler), unabhängiges (Mess-) System zur Verfügung, das durch Vergleich mit dem ursprünglichen System unmittelbar die Quantifizierung des systematischen Fehlers erlaubt. Steht ein solches objektives (Mess-) System nicht zur Verfügung, müssen die Ergebnisse aus zusätzlichen unabhängigen Systemen herangezogen werden. Der systematische Fehler eines Systems wird damit auf höherer Ebene zu einem zufälligen Fehler, indem er durch den Vergleich der Mittelwerte der Messungen der unabhängigen Systeme durch statistische Methoden abgeschätzt wird. Die Bestimmung dieser statistischen Streuungsmaße erfordert somit die Auswertung umfangreichen, zusätzlichen Datenmaterials, das im Bereich der Emissionsmodellierung nicht bei allen Eingangsgrößen zur Verfügung steht.

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

Der Aufwand und die Anforderungen an das benötigte Datenmaterial bei der Quantifizierung systematischer Fehler ist somit im Vergleich zu den zufälligen Fehlern deutlich größer. Ist ein systematischer Fehler jedoch einmal quantifiziert, können alle mit dem entsprechenden (Mess-) System ermittelten Werte korrigiert werden, was einer Eliminierung des systematischen Fehlers gleichkommt.

## 5.2 Fehler der Eingangsgrößen

### 5.2.1 Streuungsmaße

Die Bandbreiten von zufälligen Fehlern bei der messtechnischen Ermittlung einfacher physikalischer Größen können bei Kenntnis der einzelnen Messwerte nach den elementaren statistischen Methoden als Standardabweichung  $s$  (Gleichung 3) (mittlerer Fehler der Einzelwerte) bzw. als Standardabweichung des arithmetischen Mittelwerts  $s_{\bar{x}}$  (Gleichung 4) berechnet und angegeben werden. Während eine Zunahme der Anzahl der Einzelmesswerte  $n$  auf die Standardabweichung  $s$  keinen Einfluss hat (statistische Schwankungen bei kleinen  $n$  ausgenommen), nimmt die Standardabweichung des Mittelwerts  $s_{\bar{x}}$  mit zunehmendem  $n$  ab. Dies bedeutet, dass sich mit zunehmendem  $n$  der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$ , der sich nach Gleichung 2 aus den  $n$  Einzelmesswerten ergibt, dem wahren Wert (bzw. dem Mittelwert der Grundgesamtheit) annähert.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

$$s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n - 1)}} \quad (4)$$

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

In der Praxis der Emissionsmodellierung ist eine Berechnung der Fehlerbandbreiten der Eingangsgrößen in Form von Standardabweichungen und die Ermittlung systematischer Fehler nicht in allen Fällen möglich. Die wesentlichen Gründe dafür sind, dass die Fehler der Eingangsgröße (und z.T. die Eingangsgröße selbst) aufgrund ihrer komplexen physikalischen Struktur nicht nach den einfachen statistischen Prinzipien quantifizierbar sind (z. B. Kfz-Flottenzusammensetzung), für Teile der Datenbasis weder die Einzelmesswerte zugänglich noch Standardabweichungen bekannt sind und zusätzliche unabhängige Beschreibungen des Messobjekts zu Vergleichszwecken fehlen.

In diesen Fällen sind plausible Annahmen über die Schwankungsbreiten der Eingangsgrößen zu treffen. Stehen zusätzliche unabhängige Messreihen nicht zur Verfügung, ist die Ermittlung möglicher systematischer Fehler nicht möglich.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die Auswirkungen einiger Einflussgrößen auf die Schadstoffemissionen der verschiedenen Quellsektoren noch nicht näher untersucht worden sind und in den gängigen Berechnungsmodellen derzeit lediglich als einheitliche Mittelwerte oder gar nicht berücksichtigt werden. Somit können die durch diese Größen verursachten Schwankungsbreiten derzeit noch nicht ermittelt werden.

### 5.2.2 Stichprobentechnik und Schätzverfahren

In der Regel beruhen die aus der Literatur bekannten für die Emissionsmodellierung notwendigen Eingangsdaten (z. B. Emissionsfaktoren, Geschwindigkeitsverteilungen auf Autobahnen, usw.) nicht auf einer vollständigen messtechnischen Erfassung aller Elemente der jeweiligen statistischen Masse (der sog. Grundgesamtheit), sondern aus Praktikabilitätsgründen auf der Erfassung und Auswertung von Daten einer begrenzten Stichprobe (Teilerhebung). Die Auswahl der Stichprobenelemente aus der Grundgesamtheit erfolgt idealerweise nach dem Zufallsprinzip. Das bedeutet, dass die ermittelten Lage- und Streuungsparameter aus der Stichprobe nicht mit den entsprechenden Parametern der Grundgesamtheit übereinstimmen müssen. Um die Güte der Stichprobenergebnisse zu bewerten sind daher quantitative Aussagen über die Übertragbarkeit auf die entsprechenden Werte der Grundgesamtheit zu treffen [SACHS 1997].

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung



$$\bar{x}_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{j,i}}{n} \quad (5)$$

$$s_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{j,i} - \bar{x}_j)^2}{n-1}} \quad (6)$$

Für die Bestimmung der Standardabweichung als Streuungsmaß für eine Eigenschaft von Elementen einer Stichprobenauswahl aus einer Grundgesamtheit findet Gleichung 6 Anwendung.  $n$  steht für die Anzahl der Elemente der Stichprobe  $j$ . Die Standardabweichung der Elemente einer Stichprobe  $j$  wird mit  $s_j$  bezeichnet.

Der arithmetische Mittelwert der Elemente der Stichprobe  $\bar{x}_j$  (Gleichung 5) gilt als Schätzwert für den arithmetischen Mittelwert der Grundgesamtheit  $\mu$ . Als Maß für die Güte eines Stichprobenmittelwertes gilt die Standardabweichung der Mittelwerte sämtlicher möglichen Stichproben aus der Grundgesamtheit mit dem Umfang  $n$ , die mit  $\sigma_{\bar{x}}$  bezeichnet wird:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^z (\bar{x}_j - \bar{x})^2}{z}} \quad (7)$$

mit:

$\bar{x}$ : Mittelwert aller möglichen Stichprobenmittelwerte

$z$ : Anzahl aller möglichen unterschiedlichen Stichproben mit dem Umfang  $n$

$$z = \binom{N}{n} = \frac{N!}{n!(N-n)!} \quad (8)$$

Die Standardabweichung der Stichprobenmittelwerte kann unter der Voraussetzung, dass die Standardabweichung der Stichprobe mit der Standardabweichung der Grundgesamtheit übereinstimmt

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

(d.h. für nicht zu kleine  $n$ ), aus der Standardabweichung der Stichprobenelemente abgeschätzt werden:

$$\sigma_{\bar{x}} = s_j \sqrt{\frac{(N-n)}{n(N-1)}} \quad (9)$$

mit:

$s_j$ : Standardabweichung der Elemente der Stichprobe  $j$  aus der Grundgesamtheit (Schätzwert)

$n$ : Umfang der Stichprobe  $i$

$N$ : Umfang der Grundgesamtheit

Für kleine Stichproben aus einer großen Grundgesamtheit ( $N \gg n$ ) geht Gleichung 9 über in:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{s_j}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Wenn  $\bar{x}_j$  als Stichprobenmittelwert zur Schätzung von  $\mu$  herangezogen wird, so gelten hinsichtlich des Vertrauensbereiches (Genauigkeit) des Schätzwertes folgende Feststellungen:

Die Stichprobenmittelwerte unterliegen einer Normalverteilung, wobei der Mittelwert der Grundgesamtheit  $\mu$  dem Mittelwert dieser Normalverteilung entspricht. Für die Größe des Vertrauensbereiches VB um den Mittelwert der Grundgesamtheit, in dem der Mittelwert einer beliebigen Stichprobe  $\bar{x}_j$  mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit liegt, gilt:

$$VB = \mu \pm t \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad (11)$$

Der Ausdruck  $t \cdot \sigma_{\bar{x}}$  stellt somit ein Maß für die Breite des Vertrauensbereiches dar.  $\sigma_{\bar{x}}$  kann als Fehlerbandbreite von  $\bar{x}_j$  interpretiert werden (Genauigkeitsgrad). Mit zunehmender Breite des Vertrauensbereiches nimmt die Wahrscheinlichkeit, dass der Stichprobenmittelwert innerhalb des Vertrauensbereiches liegt, zu. Der Student-Faktor  $t$  bestimmt somit den Sicherheitsgrad der Aussage.

Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über den Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsgrad (Student-Faktor  $t$ ) und der Lagewahrscheinlichkeit für normalverteilte Stichproben mit großem Stichprobenumfang.

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

Tab. 4: Zusammenhang zwischen t-Faktor und Lagewahrscheinlichkeit für große Stichprobenumfänge

Faktor t	Wahrscheinlichkeit, dass $\bar{x}_j$ innerhalb VB liegt
1,00	68,3 %
1,96	95,0 %
2,00	95,5 %
2,58	99,0 %
3,00	99,7 %
3,29	99,9 %

Umgekehrt lässt sich der notwendige Stichprobenumfang  $n$  bei vorgegebenen Genauigkeits- und Sicherheitsgrad ermitteln. Aus Gleichung 9 ergibt sich durch umformen:

$$n = \frac{N \cdot s_j^2}{s_j^2 + (N - 1) \cdot \sigma_{\bar{x}}^2} \quad (12)$$

Und für große  $N$ :

$$n = \frac{s_j^2}{\sigma_{\bar{x}}^2} \quad (13)$$

Definiert man den zulässigen absoluten Fehler  $e$  als Grenze des Vertrauensbereiches nach Gleichung 14 als Differenz zwischen den Mittelwerten aus Grundgesamtheit und Stichprobe, so folgt unter der eingangs gemachten Näherung, dass die Standardabweichung der Stichprobe  $s_j$  der Standardabweichung der Grundgesamtheit  $s$  entspricht, für den Mindeststichprobenumfang  $n$  nach Gleichung 15.

$$e = |\mu - \bar{x}_i| = t \cdot \sigma_{\bar{x}} \quad (14)$$

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{e^2} \quad (15)$$

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung

Die Ermittlung des notwendigen Stichprobenumfangs erfordert also neben den frei wählbaren Angaben zu Genauigkeit und Sicherheit auch Kenntnisse über die Streubreite der Grundgesamtheit.

### 5.3 Ermittlung des Gesamtfehlers

Durch Variation einer einzelnen Eingangsgröße  $x_i$  im Berechnungsmodell lässt sich anhand der partiellen Ableitung der Emission nach der jeweiligen Eingangsgröße die Empfindlichkeit oder Sensitivität  $\partial E/\partial x_i$  ermitteln. Durch Multiplikation mit dem errechneten bzw. abgeschätzten absoluten Fehler  $dx_i$  bzw.  $\Delta x_i$  resultiert der absolute Fehler der Emission bezogen auf den Fehler der Eingangsgröße  $x_i$ .

Der differentielle, maximale Fehler der Gesamtemission folgt aus dem totalen oder vollständigen Differential [Hartwig 1967] aus Gleichung 16.

$$dE = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial E}{\partial x_i} dx_i \right| \quad (16)$$

Aus Gleichung 16 ergibt sich für kleine  $\Delta x_i$  näherungsweise der maximale Gesamtfehler (Größtfehler)  $\Delta E$  aus der Summe der Einzelfehler:

$$\Delta E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial E}{\partial x_i} \Delta x_i \right| = \sum_{i=1}^n |\Delta E_i| \quad (17)$$

mit:

$\Delta E$ : maximaler Gesamtfehler

$\partial E/\partial x_i$ : Sensitivität der berechneten Gesamtemission E bezogen auf die Eingangsgröße  $x_i$

$x_i$ : Fehler (z. B. Standardabweichung) der Eingangsgröße  $x_i$

$E_i$ : Einzelfehler der berechneten Gesamtemission E bezogen auf  $x_i$

In der Regel stimmt jedoch der maximale Gesamtfehler nicht mit dem tatsächlichen Gesamtfehler überein, da die Einzelfehler unterschiedliche Vorzeichen aufweisen und sich somit gegenseitig kompensieren können.

Mit Hilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes lässt sich unter den Voraussetzungen, dass die Fehlerabschätzungen der Eingangsgrößen richtig sind, die Eingangsgrößen statistisch voneinander unabhängig sind und deren Fehler sich gegenseitig kompensieren können und die Fehler der Eingangsgrößen  $\Delta x_i$  klein gegenüber  $x_i$  sind, der mittlere Gesamtfehler  $\overline{\Delta E}$  für die Emission E er rechnen:

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung



$$\overline{\Delta E} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial E}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta E_i)^2} \quad (18)$$

Bezogen auf die errechnete Emission E folgt für den relativen mittleren Gesamtfehler  $\overline{\Delta E}_{rel}$  :

$$\overline{\Delta E}_{rel} = \frac{\overline{\Delta E}}{E} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial E}{E} \frac{\Delta x_i}{\partial x_i} \right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta E_i}{E} \right)^2} \quad (19)$$

Aus den allgemeinen Berechnungsformeln nach Gleichung 18 und Gleichung 19 lassen sich für bekannte funktionale Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen die jeweiligen Gesamtfehler aus den Fehlern der Eingangsgrößen  $\Delta x_i$  ermitteln:

a) Linearkombinationen:

$$E = \sum_{i=1}^n c_i \cdot x_i \quad (20)$$

$$\Rightarrow \overline{\Delta E} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_i \cdot \Delta x_i)^2} \quad (21)$$

b) (Potenz-) Produkte:

$$E = \prod_{i=1}^n x_i^{c_i} \quad (22)$$

$$\Rightarrow \frac{\overline{\Delta E}}{E} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( c_i \frac{\Delta x_i}{x_i} \right)^2} \quad (23)$$

## Anhang II: Methoden der Fehlerbetrachtung



Die Aussagen, die aus dem berechneten mittleren Gesamtfehler gezogen werden können, sind abhängig von der Art der Fehler der Eingangsgrößen  $x_i$ . Fließen beispielsweise für alle Eingangsgrößen die einfachen Standardabweichungen in den Algorithmus der Fehlerfortpflanzung ein, so bezieht sich auch der berechnete Gesamtfehler auf die einfache Standardabweichung. Das bedeutet, dass unter der Voraussetzung, dass sämtliche Fehler der Eingangsgrößen zumindest näherungsweise einer Normalverteilung unterliegen, die tatsächliche Gesamtemission mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,3 % innerhalb des errechneten Fehlerbereiches liegt. Entsprechende Aussagen können bei anders gearteten Fehlern der Eingangsgrößen (z. B. doppelte oder dreifache Standardabweichung - siehe dazu Tabelle 1) getroffen werden. Auf jeden Fall ist zu beachten, dass die Fehler aller Eingangsgrößen der gleichen Art entsprechen müssen und nicht verschiedene Fehlerarten (z. B. einfache Standardabweichungen und Maximalfehler) durch die Fehlerfortpflanzung miteinander kombiniert werden, da sonst der ermittelte Gesamtfehler nicht mehr zu interpretieren ist.

## 6 Literatur

**RIVM (1997)** RIVM (ed.): General Information on the Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) – Version 2.0 (<ftp://info.rivm.nl/pub/lae/EDGARV20>), Stand: April 1999

**EEA (1996)** European Environmental Agency (ed.): Atmospheric Emission Inventory Guidebook-Emission summary tables. EEA, Copenhagen, 1996

**BUILTJES (1987):** Builtjes, P.J.H.: Introduction to Emission Needs in Long Range Transport Modelling: Episodic Models. - Int. Workshop on Methodologies for Air Pollutant Emission Inventories. Paris, Juni/Juli 1987.

**BAARS (1993):** Baars, H.P.; Builtjes, P.J.H.; Pulles, M.P.J.; Veldt, Chr.: TNO/EURASAP Workshop on the Reliability of VOC Emission Data Bases. - Delft, Niederlande, 9.-10. Juni 1993.

**MCINNES (1996):** McInnes, G.: Atmospheric Emission Inventory Handbook. - European Environmental Agency. Kopenhagen, 1996.

**HÄNSEL (1967):** Hänsel, H.: Grundzüge der Fehlerrechnung. - VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1967.