

## Zusammenfassung

Die von der Europäischen Kommission geförderte Projektreihe 'ExternE' beschäftigt sich mit der Quantifizierung der durch Energiewandlungssysteme verursachten externen Kosten. Dabei wurden Expositionen und daraus folgende Schäden durch Schadstoffe, die in größeren Mengen in die Luft emittiert werden, abgeschätzt und bewertet. Es wird dem sogenannten Wirkungspfadansatz gefolgt, der durch die vorliegende Arbeit um Expositionen erweitert wurde, die über Boden und Wasser stattfinden. Diese Erweiterung wurde in Form eines Softwareprogramms mit Namen WATSON ('integrated WATER and SOil environmental fate, exposure and impact assessment model of Noxious substances') implementiert, das räumlich aufgelöst die Exposition gegenüber Schadstoffen durch Nahrungsaufnahme innerhalb Europas abschätzt.

Der Abschätzung der Exposition liegt eine Kopplung von Chemie-Transport-Modellen für Luft einerseits und Boden und Wasser andererseits zu Grunde. Dabei wurde für die Abschätzung im Bereich Luft auf das bestehende Softwareprogramm EcoSense zurückgegriffen (European Commission, 2003d), während das *environmental fate* im Boden und Wasser mit Hilfe eines neu entwickelten, räumlich aufgelösten Boxmodells abgeschätzt wird, das als Mackay-Modell level III/IV (Mackay, 1991) klassifiziert werden kann. Die beiden Chemie-Transport-Modelle unterscheiden sich nicht nur hinsichtlich der betrachteten Medien, sondern auch bezüglich der räumlichen Auflösung: das Luftmodell basiert auf einem regelmäßigen Gitter, das Boden-Wasser-Modell ist räumlich differenziert gemäß Einzugsgebietsinformationen. Beide *fate* Modelle verwenden Parameterwerte zur Beschreibung der Umwelt, die auf mehrjährigen Mittelwerten beruhen, und können somit als klimatologische Modelle bezeichnet werden. Das Chemie-Transport-Modell für Boden und Wasser weist weitere Besonderheiten auf. Dabei sind die räumliche Differenzierung von Kompartimenten, die pH-Abhängigkeit des Verteilungsverhaltens von Spurenelementen und verbesserte oder neue Prozesse wie bevorzugtes Fließen (*preferential flow*), Ernteentzug, Bodenerosion in Abhängigkeit von der Landnutzung und Unterscheidung von Flüssen und Seen zu

nennen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass diese Besonderheiten einen erheblichen Einfluss auf die menschliche Exposition haben.

Basierend auf den abgeschätzten Konzentrationen in der Umwelt erfolgt die Expositionsabschätzung, die für die Nahrungsaufnahme (Ingestion) komplexer ist als für die Exposition über die Atemwege (Inhalation). Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Mensch eine Vielfalt an unterschiedlichen Lebensmitteln zu sich nimmt, deren landwirtschaftliche oder gewässerbezogene Produktion zudem räumlich verteilt ist. Die Expositionsabschätzung gegenüber Nahrungsmitteln basiert auf einem ortsabhängigen Ansatz zur Risikoabschätzung, der von der US-amerikanischen Umweltschutzbehörde für Sondermüllverbrennungsanlagen empfohlen wird (United States - Environmental Protection Agency, 1998), wobei versucht wird, keine Vorsorge-, sondern repräsentative Werte zu ermitteln. Die Expositionsabschätzung erfolgt auf der Ebene administrativer Einheiten, so dass der Verfügbarkeit von Nahrungs- und Bevölkerungsdaten Rechnung getragen wird. Handel wird als weiterer Bestandteil des *environmental fate* der Schadstoffe betrachtet. Es wird angenommen, dass er zu einer Vergleichmäßigung der Schadstoffkonzentrationen in den jeweiligen kommerziellen Nahrungs- und Futtermitteln innerhalb der geographischen Grenzen des Modells führt, bevor es zur Exposition von Mensch und Nutztier kommt. Als Maß für die aggregierte Exposition gegenüber Schadstoffen wird das Konzept des aufgenommenen Anteils der emittierten Menge einer Substanz genommen ('Intake Fraction', Bennett et al., 2002). Dadurch dass sehr unterschiedliche Zeiträume bei der Exposition über die Atemwege und über die Nahrung relevant sind, insbesondere wenn Pulsemissionsszenarien untersucht werden, wird die *Intake Fraction* getrennt nach Inhalation und Ingestion sowie für unterschiedliche Zeitspannen ausgewiesen. Eine weitere Neuerung besteht darin, dass die *Intake Fraction* nur die Schadstoffspezies berücksichtigt, die auch zur schädlichen Wirkung beitragen, weshalb von einer *effective Intake Fraction* gesprochen wird.

Zur vollständigen Verfolgung der Wirkungspfadanalyse mangelt es insbesondere an Informationen über Effekte durch die Nahrungsexposition, die anhand epidemiologischer Studien abgeleitet wurden. Daher erfolgt die Schadensabschätzung mit Hilfe des  $\beta_{ED10}$  slope factor-Ansatzes (Crettaz, 2000), der mit dem *Disability Adjusted Life Years* (DALYs)-Konzept kombiniert wird, das auch von der Weltgesundheitsorganisation (WHO) in Gesundheitsstatistiken verwendet wird. Da die DALYs Gesundheitsschäden durch Erkrankungen und vorzeitige Todesfälle in Äquivalenten von verlorenen Lebensjahren ('Years Of Life Lost', YOLLs) ausdrücken und aggregieren, kann eine monetäre Bewertung gemäß dem Standardansatz der ExternE-Projekte erfolgen. Als Schwachpunkt der publizierten und hier verwendeten DALY-Werte werden insbesondere die Gewichte für Gesundheitsbeeinträchtigungen gesehen, die Krankheitszeiten in Äquivalente an verlorenen Lebensjahren umwandeln.

Im Einklang mit der politischen Schwerpunktsetzung bezüglich Schadstoffüberwachung und -regulierung fokussiert sich die vorgestellte Analyse auf persistente Schadstoffe und insbesondere auf Schwermetalle. Im Einzelnen werden die Spurenelemente Arsen, Cadmium, Chrom und Blei untersucht. Das entwickelte Modell ist momentan beschränkt bezüglich der potenziell zu analysierenden Schadstoffe. Entsprechend können nur Schadstoffe untersucht werden, die praktisch nicht volatil, d. h. aufgrund ihres Dampfdrucks nicht flüchtig sind. Zudem treten Schwermetalle (oder besser Spurenelemente) in verschiedenen Bindungsformen auf, die in unterschiedlichem Maße bioverfügbar und toxisch sind. Dem wird insofern Rechnung getragen, als das Verteilungsverhalten in Abhängigkeit vom pH-Wert modelliert und das Expositionsmaß effektiv ermittelt wird (*'effective Intake Fraction'*, siehe oben). Ein Vergleich mit gemessenen Werten für Boden, Wasser und Nahrungsmittel hat ergeben, dass die in dieser Studie abgeschätzten Konzentrationen innerhalb der Erwartungswerte liegen.

Szenarioberechnungen wurden für Luft-Emissionen sowohl einzelner Kohlekraftwerke als auch auf gesamt-europäischer Ebene durchgeführt. In allen Fällen zeigte es sich, dass die menschliche Exposition über den Nahrungsweg gegenüber Ein-Jahres-Puls-Emissionen nicht nur langsam mit der Zeit ansteigt, sondern auch eine Verschiebung in der Bedeutung der Nahrungsmittel im Zeitverlauf stattfindet. Im Fall von Arsen war kurzfristig eine Mischung aus Getreide und Milchprodukten zu etwa 70 % für die Nahrungsmittlexposition verantwortlich, während langfristig die Milchprodukte allein 80 % ausmachten. Die Beitrag der Exposition über die Atemwege ist gegenüber der der Nahrungsaufnahme marginal und bestätigt Ergebnisse für Cadmium und Arsen (European Commission, 2000b). Der Vergleich der Kraftwerksstandorte ergab, dass die Variabilität der Exposition und der Schäden über den Nahrungspfad ähnlich groß ist wie über die Atemwege trotz des vergleichmäßigen Effekts des Handels auf die Schadstoffkonzentrationen in den Nahrungsmitteln. Dieser Effekt des Handels lässt demnach die Standortunterschiede nicht in dem Maße verschwinden, wie es speziell von Spadaro und Rabl (2004) postuliert worden ist.

Die für die untersuchten Spurenelemente ermittelten Schadensfaktoren wurden mit denen für die klassischen Luftschadstoffe verglichen. Der Vergleich für Expositionen über die Atemwege ergab, dass die quantifizierbaren externen Kosten durch die gesamt-europäischen Emissionen der Spurenelemente in die Luft im Jahr 1990 vernachlässigbar klein gegenüber den durch  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$ , Primärpartikeln und NMVOCs verursachten Schäden sind. Der Unterschied beträgt vier Größenordnungen. Anders sieht es bei Expositionen gegenüber den Spurenelementen über die Nahrungswege aus. Diese können bis zu mehr als 10 % der durch die klassischen Luftschadstoffe verursachten gesamten quantifizierbaren externen Kosten ausmachen, wenn mit 0 % diskontiert wird. Diesbezüglich

tragen vor allem die nicht-krebsbezogenen Effekte durch Blei bei, die zu einer Erhöhung des Blutdrucks führen. Allerdings hängt dieser Beitrag sehr stark von der Wahl der Diskontrate ab. Für den Fall, dass eine positive Diskontrate angenommen wird, werden die Schadensfaktoren für die Nahrungsaufnahme beträchtlich kleiner. Dies ist insbesondere auf die Persistenz der betrachteten Schadstoffe zurückzuführen (vgl. Hellweg, 2000; van den Bergh et al., 2000; Huijbregts et al., 2001; de Vries et al., 2004) gepaart mit ihrem vergleichsweise langsamen Ausbreitungsverhalten. Im Falle der Spurenelemente mit langsamer Dynamik, d. h. Arsen und Chrom, gelangen innerhalb der ersten 100 Jahre nach einer Ein-Jahres-Puls-Emission weniger als 2 % der potenziell zur Exposition beitragenden Menge über die Nahrung zum Menschen gemäß den hier vorgenommenen Abschätzungen. Somit sind die menschlichen Expositionen über Boden und Wasser generell dann besonders bedeutsam, wenn mittel- bis langfristige Zeiträume betrachtet werden. Diese Expositionen sind daher im besonderen Maße relevant bezüglich einer nachhaltigen Entwicklung und dabei insbesondere hinsichtlich der intergenerationellen Gerechtigkeit.

Der abgeschätzte geringe Beitrag der durch Spurenelemente verursachten quantifizierbaren externen Kosten zu den insgesamt quantifizierten externen Kosten durch die klassischen Luftschadstoffe konnte zuvor auch für Expositionen über die Nahrungsaufnahme von Dioxinen und Substanzen mit ähnlicher Wirkung (v. a. PCBs) für einzelne Länder gezeigt werden (Droste-Franke et al., 2003). Allerdings ist dabei zu berücksichtigen, dass die Anzahl der durch die vorliegende Arbeit zusätzlich bewertbaren Schadstoffe klein ist im Vergleich zu denen, die potenziell noch in Betracht zu ziehen sind. Ihr Beitrag zu den quantifizierbaren externen Kosten könnte erheblich sein. Dabei wird als hauptsächlich limitierender Faktor die Verfügbarkeit von Dosis-Wirkungsbeziehungen gesehen. Um zusätzlich noch solche Substanzen methodisch zu erfassen, für die Dosis-Wirkungsbeziehungen bekannt sind (wie etwa Quecksilber und Dioxine), bedarf es einer Weiterentwicklung des dargestellten methodischen Ansatzes. Zu nennen sind vor allem der betrachtete geographische Raum, der zumindest auf die Nordhemisphäre, wenn nicht sogar auf die ganze Erde erweitert werden müsste, und die vollständige Integration der Medien Luft, Boden und Wasser in einem Chemie-Transport-Modell.

Der verfolgte Ansatz stellt einen Mittelweg dar zwischen dem ambitionierten Ziel, Spurenelementkontaminationen räumlich aufgelöst auf europäischer Ebene zu erfassen, einerseits und der Modellierung dieser Substanzen gemäß dem aktuellen Kenntnisstand auf kleinerer Ebene andererseits. Die vorliegende Arbeit leistet einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Wissensbasis hinsichtlich der Größenordnung der (durch den Menschen verursachten) Gesundheitsschäden und externen Kosten, da bisher insbesondere hinsichtlich der externen Kosten

keine Informationen über andere Expositionspfade als die Inhalation vorhanden waren.