

Editorial

Systemare Betrachtungen in der Ökotoxikologie

Klaus Kümmerer

Dr. K. Kümmerer, Institut für Umweltmedizin und Krankenhaushygiene, Universitätsklinikum Freiburg, Hugstetter Straße 55, D-79106 Freiburg

1 Problemstellung

Meist stoßen ökotoxikologische Aussagen schnell an ihre Grenzen, insbesondere im Hinblick auf die Vielfalt von Parametern, die bei der Ergebnisfindung betrachtet werden müßten. Zusätzlich wird die Situation komplex durch die Vielzahl von Organismen und ihrer Wechselwirkungen. Insofern ist es hilfreich, sich von ausschließlich an Details orientierten Betrachtungen zu lösen und ergänzend dazu die Gesamtheit, das Biotop, das Ökosystem in den Blick zu nehmen. Insbesondere Aspekte, die sich auf **funktionale Zusammenhänge** beziehen, werden bei der sektoralen Sichtweise nicht oder nur selten erfaßt.

Systemare Parameter (z.B. Stoff- und Energieströme, Nahrungsnetze oder Systemzeiten) müssen künftig intensiver in die Abschätzung von Risiken einbezogen werden. Neben stofflichen und energetischen Parametern ist die **Bilanzzeit** (der Zeitraum, auf den sich die Risikobetrachtungen beziehen) als wichtige Kenngröße von ökologischen, ökonomischen und sozialen Systemen zu berücksichtigen.

2 Systemare Stoffeigenschaften

Für systemare Betrachtungen sind Untersuchungen an einzelnen Organismen nicht ausreichend. Vielmehr sind zur Beschreibung der stofflichen Wirkungen auf ökologische Systeme die für das betrachtete System relevanten Stoffeigenschaften von Bedeutung („systemare Eigenschaften“). Dies sind Stoffeigenschaften, die dazu geeignet sind, an zentralen Stellen ökologischer Systeme über *funktionale Zusammenhänge* qualitative oder quantitative Änderungen zu bewirken. Es handelt sich um **extraorganismische Wirkungen**. Die zu berücksichtigenden systemaren Eigenschaften ergeben sich aus den **technisch erwünschten Anwendungseigenschaften** der Stoffe und den von der Anwendung betroffenen Umweltkompartimenten. Somit bedingen sich Anwendungsmuster und resultierende Risiken wechselseitig. Die technisch gewünschten funktionalen Eigenschaften sind entscheidend für die ökosystemaren Veränderungen durch die freigesetzten Stoffe. Diese Veränderungen lassen sich über experimentelle Untersuchungen nicht vollständig erfassen. Zwar ist eine Vorhersage der Wechselwirkung möglich, nicht jedoch eine **exakte Quantifizierung**.

2.1 Beispiele systemarer Stoffeigenschaften

Die erwünschten Anwendungseigenschaften der **Fluorchlorkohlenwasserstoffe** (FCKW) und damit ihre anwendungstechnisch weite Verbreitung werden bedingt durch ihre chemische Reaktionsträgheit (geringe Humantoxizität, geringe Brennbarkeit, die unter normalen chemischen Bedingungen Persistenz bedeutet, hohes Fettlösungsvermögen für die Metall- und Platinfettung, hohe Flüchtigkeit für schnelles Abtrocknen des Werkstückes, Einsatz als Treibmittel). Die Eigenschaft „hohe chemische Stabilität“ in Verbindung mit „hoher Flüchtigkeit“ bedeutet, daß FCKW in die Atmosphäre gelangen und dort für längere Zeit verbleiben können. Die Eigenschaft relativ hoher Lebensdauer von fluor- und chlorhaltigen Radikalen bedingt dann den Einfluß auf die atmosphärische Radikalchemie.

Die erwünschte technische Eigenschaft von **Tensiden** ist die Herabsetzung der Oberflächenspannung von Wasser. Dazu ist ein bipolarer Charakter der Moleküle notwendig, der es nicht mehr erlaubt, Tenside mit klassischen Instrumenten wie dem Oktanol-Wasser-Verteilungskoeffizienten ökotoxikologisch zu beurteilen, da für diesen gerade das Fehlen von bipolaren Eigenschaften die Voraussetzung für ein valides Ergebnis ist. Für die ökologische Beurteilung von Waschmitteln ist neben den stofflichen Parametern *Anreicherungsverhalten*, *Abbaubarkeit*, *Toxizität* gegenüber ausgewählten Wasserorganismen auch der systemare Parameter „Erniedrigung der Oberflächenspannung von Wasser“ zu berücksichtigen, der z.B. bewirkt, daß dem Wasserläufer die Lebensgrundlage entzogen wird. Das System (z.B. Biotop bzw. Biozönose) wird in einer wesentlichen Funktion innerhalb und außerhalb von Organismen gestört. Derartige Effekte werden im Toxizitätstest gegenüber einzelnen Organismen wie Daphnien oder Fischen nicht deutlich. Gleiches gilt für Tenside im Bodenwasser: die Kapillarkräfte und damit das mikroskopische Bodengefüge können sich ändern, und hinzu kommen die Wechselwirkungen mit Zellmembranen von Bodenorganismen, die ebenfalls bipolar aufgebaut sind. Die Störungen auf der systemaren Ebene von Ökosystemen machen sich meist erst langfristig bemerkbar. Eine ökosystemare Studie legt mehr Wert auf Langzeitfolgen und indirekte Folgen als eine an nicht systemaren Eigenschaften oder Einzelorganismen orientierte Betrachtung.

3 Der Kontext der Zeit

Eine wichtige Größe ist die **inhärente Systemzeit**, d.h. *die dem System eigene Zeitskala*, die sich z.B. daraus ergibt, wie lange es dauert

- bis sich das System reproduziert (bei Lebewesen ihre Generationszeit),
- bis das System auf Störungen sichtbar oder meßbar reagiert,
- bis wann es sich wieder seinem Ausgangszustand nähert (Relaxation, Resilienz).

Dadurch ist eine prinzipielle Grenze von zeitnahen Beobachtungs- und Reaktionsmöglichkeiten gegeben: Veränderungen des Systems können nicht unmittelbar nach der Störung bemerkt werden. Störungen, die sich auf Funktionen bzw. Zusammenhänge im System auswirken, sind nicht nur wegen ihrer Komplexität, sondern auch wegen ihres langsamen Ablaufes – in meßtechnischen und menschlichen Zeitskalen betrachtet – schwer zu bemerken. Dies gilt insbesondere für die *Stabilität* bzw. *Elastizität* (Resilienz) und das *(Re)produktionsverhalten* des Systems. So werden Störungen, die bei Pflanzen oder Tieren die Fortpflanzungsmechanismen betreffen, sich auch erst nach einer oder zwei Generationszeiten, d.h. nach Ablauf der inhärenten Systemzeit, manifestieren. Untersuchungs- bzw. Beobachtungszeiten in der Größenordnung von mindestens drei inhärenten Systemzeiten sind deshalb für Schlußfolgerungen notwendig.

Die **Auswahl von Beobachtungszeiträumen** anhand der Systemzeiten der betroffenen Systeme ist eine notwendige Bedingung für realistische Aussagen hinsichtlich zu erwartender ökologischer und ökonomischer Risiken. Daher sollte immer auch die für die Fragestellung *größte relevante Systemzeit* Untersuchungsgrundlage sein. Daran hat sich auch der Produktionsanstieg und ggf. der Produktionsausstieg von in das betroffene Ökosystem eingetragenen Stoffen zu orientieren.

4 Irreversibilität

Ein wichtiges Kriterium in der Ökotoxikologie ist das der „Irreversibilität“ von Veränderungen an Organismen oder Ökosystemen. Damit Veränderungen überhaupt als solche feststellbar sind, müssen verschiedene Zustände, in denen sich das Ökosystem zu verschiedenen Zeitpunkten befindet, verglichen werden. Es wird also ein **Bezugs-** bzw. **Vergleichszustand** benötigt. Welche Änderung als reversibel bzw. irreversibel einzustufen ist, hängt von den betrachteten Zeiträumen und den jeweils betrachteten Systemen und deren Beschreibung ab. Die Schwierigkeit liegt in der *Definition* dieses Bezugszustandes. Da natürliche Systeme sich in ihrer Entwicklung laufend ändern, gibt es keinen absoluten und eindeutigen Bezugspunkt. Damit stellt sich die Frage, welcher Entwicklungszustand bzw. welche Zeitpunkte Grundlage des Vergleichs sein sollen. Die Frage nach den Kriterien für Irreversibilität wird falsch gestellt. Anstatt zu fra-

gen: „Wann *ist* eine Veränderung (in) der Natur irreversibel?“, müßte die Frage lauten: „Wann *wird* eine Veränderung irreversibel?“ Änderungen von bzw. in Ökosystemen sind natürlich. Die Frage ist allerdings, innerhalb welcher Zeiträume, mit welcher Geschwindigkeit die Veränderungen vor sich gehen, denen sich die betroffenen Organismen bzw. Ökosysteme anpassen müssen, um fortbestehen zu können. Immer dann, wenn die Geschwindigkeit der Veränderung der Rahmenbedingungen mit der inhärenten Systemzeit und damit der möglichen maximalen Anpassungsgeschwindigkeit nicht übereinstimmt, kommt es zu weitreichenden Störungen. Eine an sich natürliche Änderung kann allein aufgrund der Unverträglichkeit der Zeitskalen der beteiligten Systeme „irreversibel“ werden, die Elastizität des Systems wurde überfordert, es kommt quasi zum „Bruch“. Ursache der Unverträglichkeit ist häufig, daß eine Zeitskala durch den Menschen verändert wurde, die inhärente Systemzeit der Organismen bzw. der Ökosysteme aber nicht verändert werden kann.

5 Kreisläufe

Natürliche Systeme stellen in ihrer Entwicklung keinen Kreislauf dar, sondern eine teils sogar elliptische **Schraubenlinie**, die nur in einer bestimmten Projektion wie ein Kreis bzw. eine Ellipse aussieht. Die natürlichen Zusammenhänge entwickeln sich in der Zeit weiter: So entwickelt ein Baum in jedem Frühjahr wieder neue Blätter, er ist jedoch seit dem vorhergehenden Frühjahr gewachsen, hat einen Jahresring mehr und ist ein anderer als ein Jahr zuvor. Technische Stoff- und Energieströme haben wie natürliche eine Richtung in der Zeit. Der Kreislaufbegriff ist bisher aber in historischem, naturwissenschaftlichem oder gar philosophischem Sinne nicht einmal ansatzweise definiert bzw. hinterfragt worden. Kreisläufe zu schließen, ist nicht zuletzt aus thermodynamischen, praktischen Gründen unmöglich; Kreisläufe weisen nicht nur einen qualitativen Charakter – den der Geschlossenheit – auf, sondern auch einen quantitativen Charakter, den des Stoff- und Energiestromes auf. Deshalb wird auch von offenen (!) Kreisläufen der Natur gesprochen. Aber was ist ein offener Kreislauf?

Es handelt sich beim Bild vom Kreislauf um eine eigenartige Mischung von *statischen Vorstellungen* (Kreis-) mit *dynamischen Komponenten* (-lauf): „Die ewige Wiederkehr des immer gleichen.“ Das Bild vom Kreislauf schließt ein zeitliches Denken im Sinn von Veränderungen bzw. Entwicklungen aus: Nach jedem Durchlauf wird vermeintlich wieder der gleiche Ausgangszustand erreicht. Dies trifft jedoch nur auf rein technisch-mechanische Bewegungsabläufe zu: Sie sind trotz Bewegung statischer Natur, denn die Zeit „fließt“ nicht. Dies gilt aber weder für technische noch für natürliche Stoff- und Energieströme. In diesen Fällen haben sich die Rahmenbedingungen, und damit z.T. auch die Ströme selbst, nach jedem Durchlauf verändert (z.B. infolge Energieverbrauchs und damit verbundenen Emissionen oder infolge Durchmischung von Stoffen während des Durchlaufs).