

hintergrund

Bund für
Umwelt und
Naturschutz
Deutschland



Nachhaltige Stoffpolitik zum Schutz von Klima und Biodiversität

Inhalt

Zusammenfassung	3
Abstract	5
1. Einleitung	7
2. Grundlagen der Stoffpolitik	9
3. Stoffproduktion und Rohstoffextraktion fördern den Klimawandel	11
· Herstellen und Verarbeiten von Stoffen	12
· Produktionsprozesse	13
· Transport von Stoffen und Produkten	14
· Ersatz von Primär- durch Sekundärrohstoffe	14
· Alternative Rohstoffbasis für die chemische Industrie	18
4. Auswirkungen des Klimawandels auf Wirkung und Verhalten von Stoffen	21
· Mehr Luftschadstoffe und toxische Belastung	21
· Semiflüchtige Substanzen	22
· Rascherer Abbau	23
· Human- und Ökotoxizität	23
· Hochwasser setzt Schadstoffe frei	24
5. Stoffliche Belastungen führen zu Verlusten der biologischen Vielfalt	25
· Rohstoffgewinnung und -aufbereitung	26
· Emission toxischer Stoffe in die Luft	28
· Toxische Abwässer und Abfälle gefährden die Biosphäre	29
· Plastik bedroht die Biosphäre	30
· Invasive Arten und Welthandel	31
· Anbau nachwachsender Rohstoffe	32
· Pestizide und Düngemittel	33
· Hormonaktive Stoffe und Infochemikalien	34
· Verringerte stoffliche Vielfalt	35
6. Nachhaltige Chemie schützt Klima und biologische Vielfalt	38
· Nachhaltige Chemikalien	36
· Nachhaltige Chemieproduktion	37
· Nachhaltiges Stoffstrommanagement	37
7. Empfehlungen und Schlussfolgerungen	41
Literatur	42
Glossar	48
Impressum	50

Zusammenfassung

Stoffpolitik befasst sich sowohl mit Risiken und Chancen von Chemikalien als auch mit der Menge der Stoffströme von der Rohstoffextraktion bis hin zum Abfall. Wie bei den Politikfeldern Klima und Biodiversität besteht auch bei der Stoffpolitik die Notwendigkeit einer globalen Transformation mit einer deutlich stärkeren Ausrichtung an den Leitprinzipien der Vorsorge und Nachhaltigkeit. Die Grenzen der Belastbarkeit unseres Planeten dürfen nicht länger überschritten werden. Der BUND hat in einem Positionspapier die Herausforderungen einer nachhaltigen Stoffpolitik dargestellt [BUND 2019a].

Stoffliche Belastungen sind mit dem Klimawandel und dem Verlust an biologischer Vielfalt eng verbunden. Ohne unseren Umgang mit Stoffen und damit auch unsere Wirtschaftsweise und Lebensstile spürbar zu verändern, werden die Ziele der internationalen Vereinbarungen zu Klima und Biodiversität nicht erreichbar sein.

Ein gutes Drittel der Emissionen von Treibhausgasen hängt mit der Herstellung von Stoffen, ihrer Verarbeitung und ihrem zunehmenden weltweiten Transport zusammen. Dabei spielt bei einigen wichtigen Prozessen wie der Stahl- und Zementherstellung nicht nur der Energieaufwand bei der Herstellung eine Rolle. Beispielsweise werden beim Hochofenprozess aus der zugesetzten Kohle sehr großen Mengen von Treibhausgasen freigesetzt. Dringlich ist deshalb unter anderem ein rascher Ausbau der Stahlherstellung mit Wasserstoff statt Kohle, die Verwendung von Sekundärrohstoffen anstelle von Primärrohstoffen und die Umstellung der Chemikalienproduktion auf eine erneuerbare stoffliche Grundlage, um Chemikalien nicht mehr aus fossilen Rohstoffen wie Mineralöl herzustellen.

Der Klimawandel verändert auch Verhalten und Wirkung von Stoffen: Erhöhen sich die Temperaturen, steigen ebenso Konzentrationen von Luftschadstoffen in der Atmosphäre. Einige Stoffe verteilen sich verstärkt weiträumig und reichern sich in Polargebieten und

alpinen Regionen an. Die Auswirkungen von Stoffen, die für Mensch und Umwelt giftig sind, nehmen zu, auch weil die veränderten klimatischen Bedingungen oft nicht mehr den Bedürfnissen von Lebewesen entsprechen. Hinzu kommt, dass extreme Wetterereignisse wie Hochwasser vermehrt Schadstoffe mobilisieren können.

Die immer höhere stoffliche Belastung bedroht auch die biologische Vielfalt. Der Bergbau verwüstet Landschaften. Bei der Metallverhüttung, der Herstellung von Chemikalien und Produkten werden giftige Stoffe freigesetzt. Kunststoffe gefährden weltweit die Vielfalt der Lebewesen und Lebensräume. Die intensive Landwirtschaft und die damit verbundene Ausbringung von Pestiziden und Düngemitteln schädigen agrarische Lebensgemeinschaften. Das Zurückdrängen von Naturräumen durch den Anbau nachwachsender Rohstoffe gefährdet immer stärker das Überleben bedrohter Arten. Außerdem fördert der zunehmende Welthandel die Verbreitung invasiver Arten, einer der wichtigsten Treiber für Biodiversitätsverluste.

Eine geringere biologische Vielfalt wiederum führt zum Verlust von Ökosystemleistungen und hat Konsequenzen für uns. Ein Beispiel: Verschwinden Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen, bleiben für Medizin und andere Anwendungen potentiell wichtige Stoffe unentdeckt.

Das Ziel ist daher eine nachhaltige Stoffwirtschaft,

- bei der das Wiederverwenden und -verwerten von Stoffen von Anfang an mitgedacht werden;
- bei der chemische Produkte keine gefährlichen Eigenschaften haben, die Umwelt und Gesundheit belasten;
- bei der die chemische Produktion so gestaltet wird, dass sie keine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt und
- bei der Stoffströme so gemanagt werden, dass sie die planetaren Grenzen nicht überschreiten.

Nachhaltiges Stoffstrommanagement zeichnet sich durch drei Strategien, die sich gegenseitig ergänzen,

aus: Neben der Verbesserung des Verhältnisses von Aufwand und Ertrag (die Effizienz) und der Orientierung an menschlicher Genügsamkeit (die Suffizienz) ist die Konsistenzstrategie besonders wichtig. Sie bettet Technologien und Stoffströme in natürliche Kreisläufe ein. Dazu braucht es eine Trendumkehr nicht nur in der Chemieindustrie, sondern in der gesamten Wirtschaft und der ganzen Gesellschaft.

Kurz gesagt: Es ist notwendig, deutlich weniger Produkte herzustellen. Denn nur durch nachhaltiges Stoffstrommanagement – also eine Verlangsamung und Reduzierung der Stoffströme – sind die Ziele der Klima- und Biodiversitätspolitik erreichbar.

Biodiversität, Klimawandel und Stoffpolitik sind eng miteinander verwoben. Alle drei globalen Herausforderungen müssen gemeinsam angegangen und gelöst werden. Bei Klimawandel und biologischer Vielfalt existieren bereits verbindliche internationale Übereinkommen, – nicht so bei der Stoffpolitik, obwohl sie vergleichbaren Einfluss auf das Schicksal des Planeten hat. Es bedarf deshalb eines verbindlichen globalen Stoffrahmen-Übereinkommens, das die bisherigen fragmentierten Ansätze und nicht bindenden Austauschforen ablöst.

Abstract

Chemicals and materials policy deals with both the risks and the opportunities of chemicals as well as with the volume of material flows from raw material extraction to waste. As with the policy areas of climate and biodiversity, there is a need for a global transformation in chemicals and materials policy with a strong focus on the guiding principles of precaution and sustainability. The boundaries of our planet must no longer be exceeded. BUND has outlined the challenges of a sustainable chemicals and materials policy in a recently published position paper [BUND 2019a].

The impacts of chemicals and materials are closely related to climate change and biodiversity. Without a substantial change in the mode we deal with substances and thus in our economic practices and lifestyles, the goals of the international agreements on climate and biodiversity will not be achieved.

About one third of greenhouse gas emissions are related to the production of substances and materials, their processing and the increasing global transport of goods. In some important processes, such as steel and cement production, it is not only the energy input during manufacture that plays a role. For example, the blast furnace process releases very high greenhouse gas emissions from the added coal. Urgent measures therefore include a rapid expansion of steel production using hydrogen instead of coal, the increased use of secondary instead of primary raw materials, and the conversion of chemical production to a renewable material basis (feedstock) in order to replace mineral oil consumption.

Climate change also has consequences for the behaviour and effects of substances in the environment: higher temperatures lead to increasing concentrations of air pollutants in the atmosphere. Some substances are transported over long distances to a greater extent and can accumulate in polar and alpine regions. Changing climatic conditions often no longer meet the needs of living organisms in their habitats. The impacts of toxicity and ecotoxicity of chemicals are

increasing. In addition, extreme weather events such as floods can lead to the mobilization of pollutants.

The ever increasing chemical and material load also threatens biodiversity. Mining is devastating landscapes. Metal smelting and the manufacture of chemicals and products release toxic substances into the air, water and soil. Plastics endanger the diversity of living organisms and habitats worldwide. Intensive agriculture and the associated application of pesticides and fertilizers are damaging the biocoenosis in agrarian landscapes. The destruction of natural habitats through the cultivation of renewable raw materials is increasingly threatening the survival of endangered species. In addition, the global trade promotes the spread of invasive species, one of the most important drivers of biodiversity loss.

Biodiversity losses, in turn, result in the loss of ecosystem services and has consequences for us. It may also affect the diversity of human-used natural substances. Numerous plants, animals and microorganisms are disappearing and with them undiscovered substances that may be very important for medicine and other uses in future.

The goal is a sustainable management of chemicals and materials,

- in which reuse and recycling are considered from the outset;
- where chemical products do not exhibit hazardous properties that harm environment and human health;
- in which chemical production is designed in such a way that it does not pose a risk to people or the environment;
- where material flows are managed in such a way that they do not exceed planetary boundaries.

Three strategies are crucial to sustainable material flow management, complementing each other. In addition to improving the ratio of input to output (efficiency) and focusing on human frugality (sufficiency),

the strategy of consistency is particularly important. It embeds technologies and material flows in natural cycles. These three strategies require *inter alia* a trend reversal not only in chemical production, but in the entire economy and society as a whole. A significant reduction in production volumes is necessary. It is only by slowing down and reducing material flows that we can manage to achieve the goals of climate and biodiversity policy.

Biodiversity, climate change and chemicals and materials policy are closely intertwined. All three global challenges must be addressed and solved together. Binding international agreements already exist for climate change and biodiversity, but not yet for chemicals and materials policy, although it has a comparable influence on the fate of the planet. Thus, there is a need for a binding global framework agreement on substances aiming to replace the current fragmented approaches and non-binding exchange forums like SAICM.

1. Einleitung

Stoffpolitik geht über die klassische Chemikalienpolitik weit hinaus. Der Begriff „Stoff“ wird in dieser Publikation sehr umfassend verstanden. Er erfasst neben Chemikalien auch Rohstoffe, aus denen Chemikalien isoliert oder hergestellt werden, sowie Produkte und Erzeugnisse, die aus Chemikalien zusammengesetzt sind. Auch Abfälle – Produkte, derer sich der Mensch entledigen will – bestehen aus vielen Chemikalien und sind Stoffe.

In einem Positionspapier hat der BUND die „Herausforderungen für eine nachhaltige Stoffpolitik“ beschrieben [BUND 2019a]. Dieses Hintergrundpapier soll ergänzend zu dem Positionspapier exemplarisch erläutern, welche Bedeutung eine nachhaltige Stoffpolitik für andere umweltpolitische Handlungsfelder, insbesondere für den Klimaschutz und den Erhalt der Biodiversität, hat.

Stoffpolitik muss sich an den Leitbildern Vorsorge und Nachhaltigkeit orientieren. Nach dem Vorsorgeprinzip muss gehandelt werden, wenn triftige Gründe zur Besorgnis vorliegen, wobei es noch keines schlüssigen Beweises eines ursächlichen Zusammenhangs bedarf [OSPAR 1992]. Dies wurde nicht immer rechtzeitig beachtet, wie beispielsweise die Publikationen „Late Lessons from Early Warnings“ [EEA 2001 und 2013] der Europäischen Umweltagentur zeigen. Nachhaltigkeit bedeutet, die Bedürfnisse der heutigen Generation zu befriedigen, ohne die Bedürfnisse künftiger Generationen zu beeinträchtigen [UNCTAD 1992]. Dies schließt auch eine Verteilungsgerechtigkeit zwischen Nord und Süd sowie innerhalb europäischer Gesellschaften ein.

Die Vollversammlung der Vereinten Nationen beschloss 2015 zudem siebzehn Ziele für eine nachhaltige Entwicklung, die bis 2030 erreicht werden sollen [UNO 2015]. Zu diesen „Sustainable Development Goals“ (SDG) zählen etliche umwelt- und gesundheitsbezogene Ziele wie sauberes Trinkwasser für alle Menschen, der Schutz von Land- und Meeresökosystemen und auch der Erhalt der Gesundheit und Umwelt durch

weniger gefährliche Chemikalien und eine geringere Verschmutzung von Wasser, Boden und Luft. Einige dieser Ziele nehmen ausdrücklich Bezug auf stoffliche Belastungen. Insbesondere das Ziel einer nachhaltigen Produktion und eines nachhaltigen Konsums (SDG 12) erfordert stoffpolitisches Handeln.

Klimawandel und Biodiversitätsverluste sind anerkannte globale Herausforderungen für eine internationale Umweltpolitik. In internationalen Übereinkommen wie dem Paris-Übereinkommen 2015 und der Konvention über die biologische Vielfalt 1992 haben sich die Staaten verpflichtet, ihre Politik an konkreten Zielen auszurichten: Maximale Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur um deutlich weniger als 2,0 °C, möglichst nur um 1,5 °C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau sowie die 20 Aichi-Biodiversitätsziele bis 2020 [Universität Regensburg 2020]. Damit soll eine deutliche Wende der bisherigen Entwicklung erreicht und die diesbezüglichen planetaren Leitplanken wieder unterschritten werden (siehe Kapitel 2).

Klimawandel und Biodiversität stehen dabei in einem engen Zusammenhang. Drei Beispiele: Erhöhte Wassertemperaturen und die Versauerung der Meere infolge höherer CO₂-Gehalte in der Atmosphäre führen zum Ausbleichen und Absterben von Korallenriffen. Das Abschmelzen der Polkappen und die Verschiebung der Vegetationszonen Richtung Pole gefährdet den Lebensraum bedrohter Arten. Der verstärkte Anbau von Energiepflanzen zum Ersatz fossiler Brennstoffe steigert die Flächenkonkurrenz und vernichtet insbesondere in den Ländern des Südens natürliche Lebensräume.

Stoffliche Belastungen stellen eine vergleichbare, globale Herausforderung dar, sind jedoch bisher nur durch Übereinkommen geregelt, die einzelne Aspekte regeln, und nicht durch eine umfassende und rechtsverbindliche internationale Konvention. Wichtige internationale Übereinkommen zum Schutz von Klima, Natur und Umwelt sind in Kasten 1 dargestellt.

Kasten 1

Wichtige internationale Übereinkommen zum Schutz von Klima, Natur und Umwelt

Das **Übereinkommen von Paris** (Paris Agreement) von 2015, <https://unfccc.int/>, sieht die Begrenzung der menschengemachten globalen Erwärmung auf deutlich unter 2 °C gegenüber vorindustriellen Werten vor. Darüber hinaus sollen die Staaten befähigt werden, mit den Folgen des Klimawandels umzugehen.

Das **Übereinkommen über die biologische Vielfalt** (Convention on Biodiversity, CBD) von 1992, <https://cbd.int/>, hat den Schutz der Biodiversität, die nachhaltige Nutzung ihrer Bestandteile sowie Zugang und Ausgleich bei der Nutzung genetischer Ressourcen (access and benefit sharing) zum Ziel. Die biologische Vielfalt gliedert sich dabei in die Artenvielfalt, die genetische Vielfalt und die Vielfalt der Ökosysteme.

Das **Nagoya-Protokoll** von 2010, <https://cbd.int/nagoya>, ein Teil der Biodiversitäts-Konvention, setzt einen völkerrechtlichen Rahmen für den Zugang zu genetischen Ressourcen und gerechtem Vorteilsausgleich. Die Biopiraterie soll damit eingedämmt werden.

Das **Basel-Übereinkommen** von 1989, <http://www.basel.int>, regelt die Kontrolle der grenzüberschreitenden Verbringung gefährlicher Abfälle und ihre Entsorgung.

Das **Stockholm-Übereinkommen** von 2001, <https://www.pops.int/> verbietet oder beschränkt Produktion und Einsatz einiger persistenter organischer Schadstoffe (POPs) und minimiert zudem die unbeabsichtigte Bildung von POPs (wie polychlorierte Dibenzodioxine und -furan, PCCD/F) als Nebenprodukte in technischen und thermischen Prozessen. Laufend werden weitere Stoffe als POPs identifiziert und aufgenommen; derzeit sind 30 Stoffe reguliert.

Das **Minamata-Übereinkommen** von 2013, <http://www.mercuryconvention.org/>, hat zum Ziel, Quecksilbereinträge – seien sie durch Verwendung von Quecksilber in Produkten und Prozessen oder durch Verbrennung von Kohle entstanden – weltweit zu senken.

Stoffliche Belastungen stehen in einem engen Zusammenhang zu Klimawandel und Biodiversitätsverlusten (Abb. 1). In diesem Papier wird dies dargestellt und Schlussfolgerungen daraus gezogen. Dabei werden Stoffe auf ihrem ganzen Lebensweg von der Gewinnung der Rohstoffe bis zur Beseitigung als Abfall (oder Wiederverwertung als Produkt) betrachtet. Kapitel 2 stellt die Grundzüge einer nachhaltigen Stoffpolitik dar. In Kapitel 3 werden die Einflüsse stofflicher Belastungen auf den Klimawandel erörtert. In Kapitel 4 wird ergänzt, welche Folgen der Klimawandel auf Wirkung und Verhalten von Stoffen hat. Wie sich Stoffe wiederum auf die Biodiversität auswirken, wird in Kapitel 5 gezeigt. Kapitel 6 verdeutlicht den Beitrag nachhaltiger Chemie zum Schutz von Klima und Biodiversität, bevor im abschließenden Kapitel 7 Empfehlungen und Schlussfolgerungen aufgeführt werden.

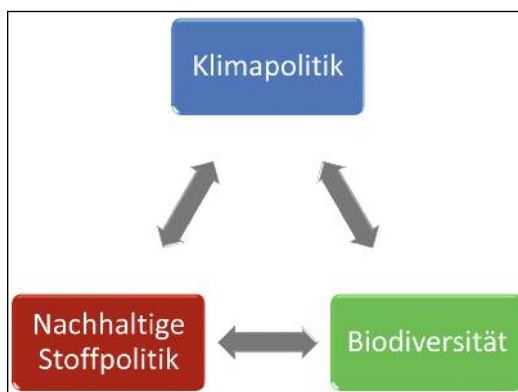


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Stoffpolitik, Klimapolitik und Biodiversität

2. Grundlagen der Stoffpolitik

Kein Zweifel: Es ist weiterhin wichtig, gefährliche Chemikalien möglichst selten und sparsam einzusetzen und ihre spezifischen Risiken für Mensch und Umwelt zu mindern. Die Produkte der chemischen Industrie befinden sich in zahlreichen Erzeugnissen und nicht zuletzt auch in Abfällen. Nahezu alle Lebensbereiche wie Mobilität, Bauen, Energie, Kleidung und Nahrung sind von „Chemie“ betroffen.

Doch es geht nicht nur um die gefährlichen Eigenschaften einzelner Stoffe und Stoffgemische (Qualität), sondern auch um die Menge (Quantität) der Stoffumsätze. Dies betrifft auch „ungefährliche“ Stoffe. So gelten Stoffe wie Kohlenstoffdioxid, Pflanzennährstoffe wie Nitrat und Phosphat oder Sand und Kies als toxiologisch eher harmlos. Dies galt lange Zeit ebenso für Kunststoffe und andere langlebige (persistente) Produkte der synthetischen Chemie.

Es ist somit im Sinne der Vorsorge und Nachhaltigkeit wichtig, auch bei Stoffen, die derzeit (noch) als unproblematisch gelten, die in die Umwelt eingetragenen Stoffmengen zu verringern. In besonderem Maße sind persistente (langlebige) Stoffe problematisch, die – einmal in die Umwelt eingetragen –, wenn überhaupt, nur sehr langsam aus dieser wieder verschwinden und sich anreichern können. Unvorhergesehene Folgen für Gesundheit und Ökosysteme sind nicht auszuschließen und könnten irreparabel sein. Auch hormonaktive Stoffe (endokrine Disruptoren), die oft in sehr geringen Konzentrationen wirken, verdienen besondere Beachtung (siehe Abschnitt 5).

Die gestiegene Umsatzmenge solcher Stoffe offenbart immer stärker ihre problematischen Wirkungen in Bezug auf Klimawandel, Überdüngung, Umwelthygiene und Vermüllung sowie Biotopzerstörung. Die weltweite Zunahme der Chemikalienproduktion und der Stoffströme sowie die wachsende Ausbeutung der Ressourcen unseres Planeten erfordern, dass Stoffpolitik umfassender gedacht und umgesetzt werden muss. Sie ist damit das Dach und die strategische Verbindung verschiedener Politikfelder, außer der Chemikalienpolitik unter anderem der Ressourcen-, Produkt- und Abfallpolitik.

Stoffpolitik ist auch eine internationale Herausforderung. Außer den einzelnen, in Kapitel 1 genannten Konventionen, die bestimmte Aspekte regeln, ist der „Strategische Ansatz für ein Internationales Chemikalienmanagement“ (SAICM) eine wesentliche Initiative für einen sicheren Umgang mit Chemikalien und Abfällen und soll ein gemeinsames Verständnis zu den globalen Auswirkungen von Chemikalien erzielen [SAICM 2020].

In Kasten 2 wird ein wissenschaftlicher Ansatz zur Beschreibung der globalen Belastungsgrenzen vorgestellt.

Kasten 2

Wissenschaftlicher Ansatz zur Beschreibung der Belastungsgrenzen der Erde

Beim Konzept der planetaren Leitplanken von Rockström und Steffen [Rockström 2009, Steffen et al. 2015a] werden neun Bereiche definiert, in denen menschliches Handeln das Erdsystem gefährdet, darunter auch „Neue Substanzen“ (novel entities¹) (siehe Abb. 2). Unter anderem wegen der Vielfalt der chemischen Substanzen ist es bisher nicht gelungen, diese Leitplanke zu quantifizieren. Viele Indizien weisen allerdings darauf hin, dass die Belastungsgrenze unseres Planeten auch in diesem Bereich erreicht, wenn nicht gar überschritten ist. Die stoffliche Belastung unseres Planeten beeinflusst auch andere Leitplanken wie atmosphärische Aerosole, die biogeochemischen Stoffflüsse (Stickstoff, Phosphor) sowie den Klimawandel, der direkt mit der anhaltend hohen Freisetzung von CO₂ und anderen Treibhausgasen verbunden ist. Die rasante Zunahme der Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen [UNEP 2019a] und der stofflichen Belastungen beispielsweise durch Abfälle [UNEP 2015] zeigen einen deutlichen internationalen Handlungsbedarf. Die „große Beschleunigung“ zahlreicher ökologischer und sozioökonomischer Parameter durch menschliche Aktivitäten [Steffen et al. 2015b] ist daher eng mit stofflichen Einflüssen verknüpft.

¹ Der Begriff ‚novel entities‘ umfasst nicht nur chemische Stoffe sondern auch biologische Produkte wie genetisch veränderte Organismen.

Dabei gilt es zu beachten, dass die Länder des globalen Südens von den Folgen einer verfehlten Stoffpolitik stärker betroffen sind als die Industrieländer. Rohstoffe und Ressourcen werden zur Befriedigung der Bedürfnisse der Länder des Nordens in steigendem Maße aus dem Süden importiert, ohne dass diese hinreichend dafür entschädigt werden. Dieser Ressourcentransfer führt auch zu Biodiversitätsverlusten und ökologischen Schäden im Süden sowie zu einer ungleichen Verteilung der stofflichen Belastungen. Die globalen Stoffströme mit Rohstoffen, Chemikalien, Fertigprodukten und Abfällen haben sich in den vergangenen 20 Jahren vervielfacht.

Die Chemieindustrie verlagert häufig ihre Produktion in Entwicklungs- und Schwellenländer mit dem Ziel, regionale Märkte besser zu bedienen, aber auch, um von niedrigeren Löhnen und gesetzlichen Anforderungen zu profitieren. Dies führt zu einem Export der Risiken. Umwelt- und Arbeitssicherheitsstandards sind in den Ländern des Südens und Ostens oftmals niedriger als in den Ländern des Nordens. Auch dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer globalen Stoffpolitik.

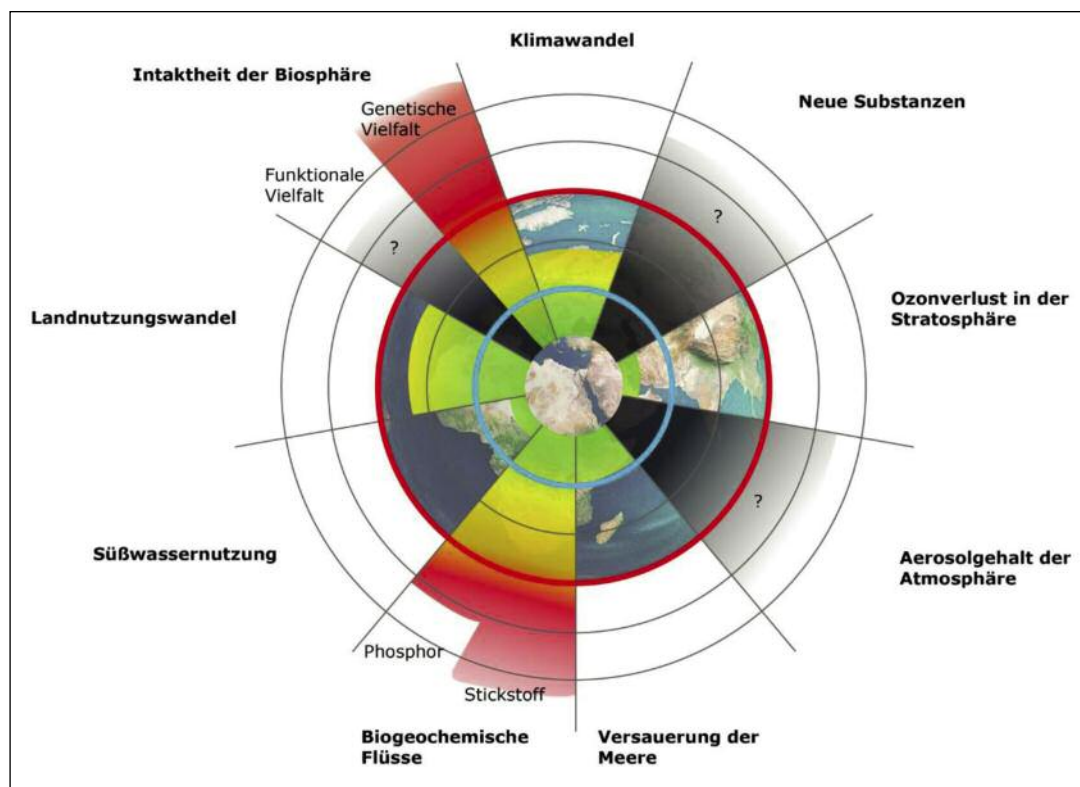


Abbildung 2: Planetare Belastungsgrenzen nach Rockström und Steffen

3. Stoffproduktion und Rohstoffextraktion fördern den Klimawandel

Klimaschutz ist zurzeit das beherrschende Thema der Umweltpolitik. Die dramatischen Folgen einer Erderwärmung sind weltweit spürbar. Um die globale Erderwärmung auf 1,5 °C gegenüber vorindustrieller Zeit zu begrenzen, haben sich die Staaten 2015 im Paris-Übereinkommen verpflichtet, ihre Emissionen an Treibhausgasen (THG) entsprechend zu senken. Maßgeblich für die Klimaerwärmung sind insbesondere die Emissionen von Kohlenstoffdioxid (CO₂) und Methan (CH₄).

Auch die Emissionen synthetischer Gase wie fluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW) und Schwefelhexafluorid (SF₆) sowie von Lachgas (N₂O), insbesondere infolge des Einsatzes von Düngemitteln in der Landwirtschaft, spielen eine Rolle. Abb. 3 zeigt, dass 2010 rund 34% der globalen Treibhausgasemissionen von 49,4 Gt CO₂-Äquivalenten der Produktion von Stoffen² und dem Transportsektor zuzuordnen waren [Ellen MacArthur 2019].

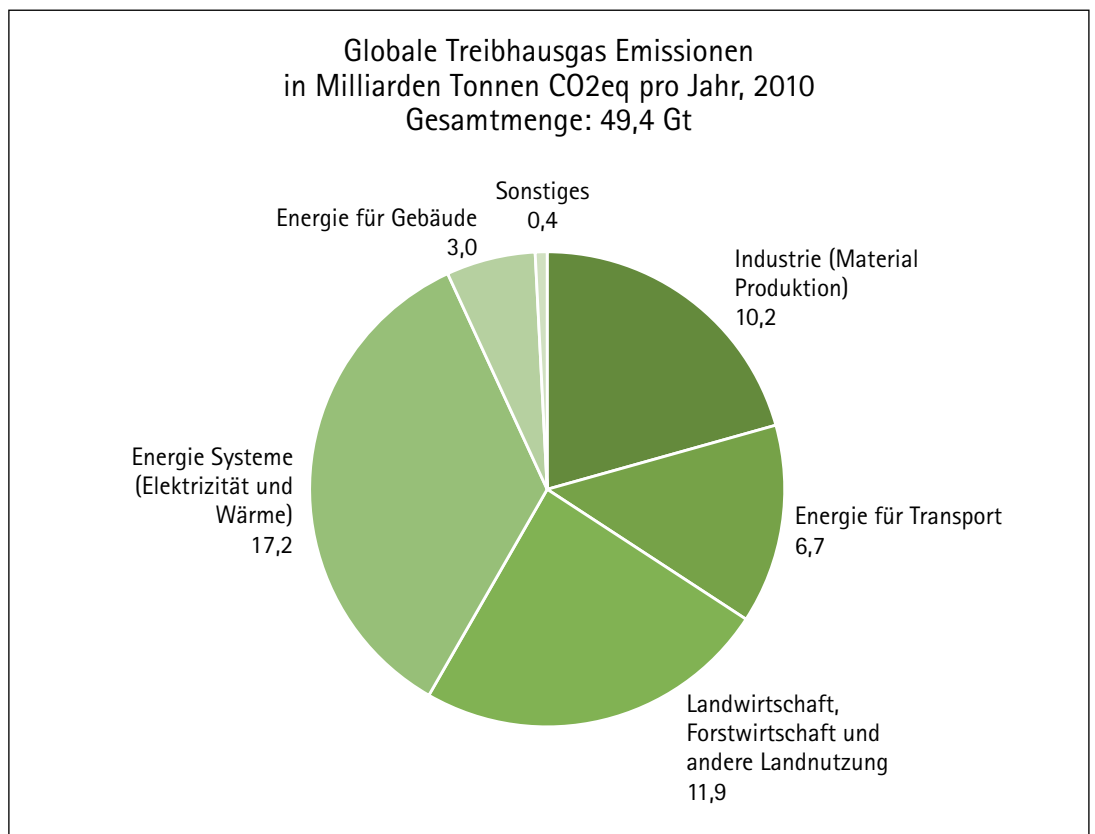


Abbildung 3: Zuordnung der globalen Treibhausgasemissionen (in Gt) zu Sektoren (nach Ellen MacArthur 2019)

² Die THG-Emissionen für die Industrie umfassen auch Emissionen für die Energieerzeugung im produzierenden und verarbeitenden Gewerbe.

Herstellen und Verarbeiten von Stoffen

Die Herstellung von Stoffen, beginnend mit der Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen bis zur Synthese von Chemikalien und der Verarbeitung zu Produkten, kostet Energie. Weltweit wird Energie überwiegend durch Verbrennung fossiler Rohstoffe wie Kohle, Erdöl und Erdgas gewonnen. Eine Energiewende weg von fossilen Brennstoffen würde somit auch dazu beitragen, die Treibhausgasemissionen durch Stoffproduktion zu senken.

Stoffe und Produkte unterscheiden sich in dem spezifischen Energieaufwand, den sie zu ihrer Herstellung benötigen. Herstellungswege und Ausstattung der Produktionsanlagen führen zu unterschiedlich hohen Treibhausgasemissionen. Der kumulierte Energieaufwand (KEA) [VDI 2012], der den ganzen Lebensweg eines Stoffes erfasst, und die Summe der damit verbundenen Treibhausgasemissionen sind Indikatoren für die Klimaauswirkungen der jeweiligen Produkte.

Durch die Steigerung der Energieeffizienz ist es zwar in den vergangenen drei Jahrzehnten gelungen, den Energieverbrauch von der Steigerung des Bruttoinlandsprodukts zu entkoppeln (Abb. 4). Allerdings sinkt der absolute Energieverbrauch dadurch nicht, sondern bleibt in Deutschland konstant hoch [UBA 2020a] und steigt weltweit sogar weiterhin an [IEA 2018a]. Der Grund ist der so genannte Rebound-Effekt, d. h. dass die spezifischen Einsparungen durch das Wirtschaftswachstum und Veränderungen bei der Nutzung mehr als ausgeglichen werden.

Deshalb gilt: Will man den Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Stoffen wirklich senken, bedarf es auch einer Vermeidung, Verringerung und Verlangsamung der Stoffströme. Die Langlebigkeit und die Reparaturfähigkeit von Produkten zu erhöhen, ist eine Forderung, die sich sowohl an Hersteller, an die Politik als auch an Konsumenten richtet.

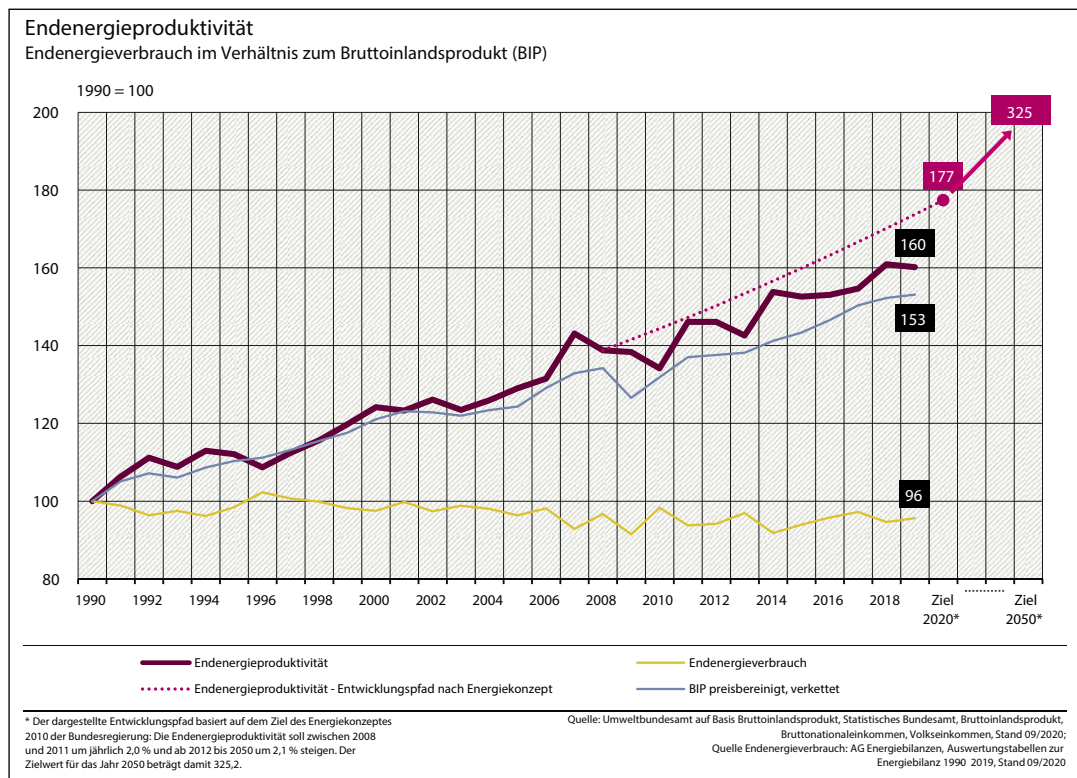


Abbildung 4: Entwicklung des Endenergieverbrauchs und der Endenergieproduktivität in Deutschland in den Jahren 1990–2018 (Quelle: Umweltbundesamt)

Besonders groß ist der Primärenergiebedarf für die Herstellung von chemischen Produkten wie Ammoniak (Kasten 3), Mineralölerzeugnissen, Eisen, Stahl, Bunt-, Funktions- und Edelmetallen, sowie Zement, Beton und Keramik [UBA 2020b].

Kasten 3

Beispiel Ammoniaksynthese

Besonders energieintensiv ist der Haber-Bosch Prozess zur Herstellung von Ammoniak (NH_3) aus Stickstoff und Wasserstoff. Weltweit werden jährlich 150 Mt Ammoniak vor allem für Düngezwecke hergestellt. Dies geht einher mit der Emission von ca. 300 Mt CO_2eq^3 [Deutscher Bundestag 2018]. Die Menge des auf diese Weise produzierten Ammoniaks ist im Übrigen der wesentliche Grund für die vielfache Überschreitung der planetaren Grenzen für reaktiven Stickstoff⁴.

Produktionsprozesse

Bei einigen wichtigen Produktionsprozessen wie Zement und Stahl werden Treibhausgase nicht nur durch Erzeugung der dafür benötigten Energie emittiert. Die THG-Emissionen aus der Herstellung und Verarbeitung industrieller Produkte lagen in der EU 2017 bei 7,82 % der gesamten THG-Emissionen [EP 2018].

- Bei der Herstellung von Zement wird Kohlenstoffdioxid durch die Zersetzung des Rohstoffs Calciumcarbonat zu Calciumoxid, auch Branntkalk genannt, emittiert. Diese prozessbedingte Freisetzung ist für etwa zwei Drittel der Kohlenstoffdioxid-Emissionen der Zementherstellung verantwortlich, die nach Angaben der Internationalen Energieagentur (IEA) einen Anteil von 6,9% am weltweiten CO_2 -Ausstoß hat [Deutsche Wirtschaftsnachrichten 2020]. Dies ist kein Einzelfall: Auch die Herstellung von Calciumcarbid zur Herstellung von Acetylen und Kalkstickstoff sowie Decarboxylierungen organischer Säuren führen zur Freisetzung von CO_2 durch chemische Reaktion.

- In der Metallindustrie wird Kohle bei der Verhüttung vieler Erze als Reduktionsmittel eingesetzt. Besonders der Hochofenprozess zur Herstellung von Roheisen ist ein großer Emittent von CO_2 . Kohle wird üblicherweise im Hochofen (Abb. 5) zur Reduktion von Eisenerz zu Roheisen, dem Vorprodukt von Stahl, eingesetzt. Dieses Verfahren ist weltweit für rund 9 % der THG-Emissionen verantwortlich. Etwa die Hälfte der Stahlproduktion findet derzeit in China statt, welches seine Produktion in den letzten zwei Dekaden massiv ausgebaut hat.



³ CO_2 -Äquivalente, d. h. Summe der Treibhausgase unter Berücksichtigung der spezifischen Potenz im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid

⁴ Als reaktiven Stickstoff bezeichnet man alle anorganischen Stickstoffverbindungen außer elementarem Stickstoff. Quelle: Reaktiver Stickstoff in der Umwelt | Umweltbundesamt

Abbildung 5: Der Hochofenprozess führt zu hohen THG-Emissionen © iStock.com/maki_shmaki



Abbildung 6: Zunahme des Güterverkehrs: Containerschiff beim Löschen im Hafen
© pixabay.com/Karsten Bergmann

Roheisen lässt sich nicht nur mit Kohle als Reduktionsmittel herstellen. Zunehmend wird diskutiert, hierfür Wasserstoff anstelle von Kohle einzusetzen und damit diesen Prozess potenziell weitgehend treibhausgasneutral zu gestalten [BDEW 2020]. In Schweden wird eine Pilotanlage zur Stahlherstellung mit Wasserstoff errichtet [Arens & Vogl 2019]. In Deutschland erproben die Stahlhersteller, im Hochofen einen Teil der Kohle durch Wasserstoff zu ersetzen, was allerdings nur begrenzt möglich ist. Noch wird die Hauptmenge des Wasserstoffs aus Erdgas gewonnen, ist also mit THG-Emissionen verbunden („grauer“ Wasserstoff). Die Produktion von regenerativem „grünem“ Wasserstoff, also von Wasserstoff, der elektrolytisch aus Wasser mit erneuerbarem Strom hergestellt wird, läuft gerade erst an. Eine komplette Umstellung auf „grünen“ Wasserstoff wird wegen der dazu erforderlichen hohen Mengen an regenerativen Energien nur möglich sein, wenn gleichzeitig die Produktionsmengen von Eisen durch konsequentes Recycling und Suffizienzstrategien (siehe Kapitel 6) reduziert werden.

Transport von Stoffen und Produkten

Die Zunahme der Stoffströme und die wachsende Vernetzung des Welthandels führen zu einer rasanten

Zunahme des Güterverkehrs (Abb. 6). Sowohl der Transport auf Straße und Schiene als auch die Seeschifffahrt sind große Emittenten von Treibhausgasen, die noch kaum reguliert sind. Die Treibhausgasemissionen aus diesem Bereich steigen stark an. Prognosen zufolge könnten die Emissionen des weltweiten Güterverkehrs von 3,1 Gt im Jahr 2015 auf 5,7 Gt CO₂eq im Jahr 2050 steigen [ITF 2017]. Über die Seeschifffahrt werden derzeit mehr als 80% des globalen Handelsvolumens abgewickelt. Zu den weltweiten CO₂-Emissionen trägt die Seeschifffahrt etwa 2% bei [UNCTAD 2019].

Ersatz von Primär- durch Sekundärrohstoffe

Ohne eine Transformation zur Kreislaufwirtschaft werden wir die Ziele von Paris und der Konvention über die biologische Vielfalt (CBD) nicht erreichen und die Ressourcen des Planeten in immer größerer Geschwindigkeit ausbeuten. In ihrem Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft zeigt die Europäische Kommission deshalb Wege und Maßnahmen auf, das aktuelle System der „Durchlaufwirtschaft“ mit steigenden Abfallmengen hin zu einem System zu verwandeln, in dem das Wiederverwenden von Produkten und das Wiederverwerten von Werkstoffen im Vordergrund stehen [EU-Kommission 2020b].



Abbildung 6: Zunahme des Güterverkehrs: LKW-Stau auf der Autobahn
© pixabay.com/Erich Westendarp

Der Ersatz von primären Rohstoffen durch solche, die schon einmal oder mehrfach genutzt worden sind (sekundäre Rohstoffe) kann neben dem Effekt der Ressourcenschonung auch zu deutlich geringerem Gesamtenergieverbrauch bei der Herstellung von Produkten führen. In einer ersten Näherung zeigt dies ein Vergleich des kumulierten Energieaufwands (KEA) [VDI 2012] zur Herstellung des Primärrohstoffs mit dem KEA für seine Rückgewinnung aus Produkten. Ersterer lässt sich für viele wichtige Primärrohstoffe aus Studien entnehmen [UBA 2012]; letzterer hängt entscheidend von dem Produkt ab, aus dem er zurückgewonnen werden soll: Die Verwertung von Produktionsabfällen ist einfacher und erfordert weniger Energie als die Aussortierung und Rückführung von Wertstoffen aus gebrauchten Produkten. Hier spielt der Entropie-Faktor eine entscheidende Rolle: Das heißt, je stärker die „Verdünnung“ des gesuchten Rohstoffs in einem Abfall ist, desto mehr Energieaufwand (und Kosten) sind nötig, um ihn wieder in einigermaßen reiner Form zu gewinnen. Ebenso steigt der Energieaufwand, je weiter man an das insbesondere bei Konsumabfällen kaum erreichbare Ziel von 100% Recycling herankommen will. Der Energie- und Materialbedarf für das Rückgewinnen wird mit Annäherung

an eine Recyclingquote von 100% immer größer (siehe Abb. 7) [Bunge 2016].

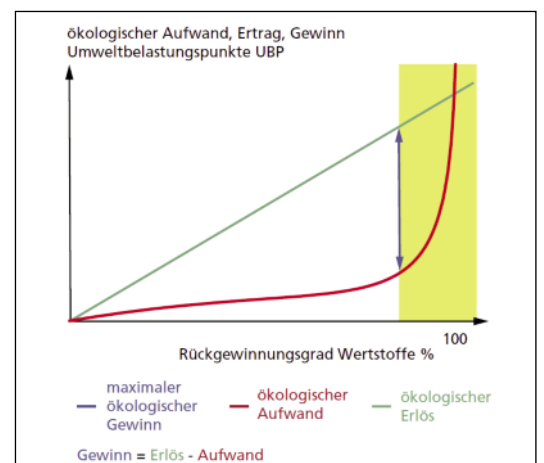


Abbildung 7: Ökologischer Aufwand und Ertrag beim Recycling nach [Bunge 2016]: Gegenüber der Herstellung von Primärrohstoff (z. B. der Herstellung von Metall aus Erz) steigt der ökologische Ertrag beim Recycling (grüne Kurve) linear mit dem Rückgewinnungsgrad an. Hingegen steigt der ökologische Aufwand (rote Kurve) mit zunehmender Annäherung an einen vollständigen Rückgewinnungsgrad exponentiell an. Der ökologische Gewinn als Differenz zwischen Betrag und Aufwand durchläuft ein Maximum. Oberhalb dieses Rückgewinnungsgrades bestehen keine ökologischen Vorteile mehr (gelber Bereich) (Darstellung in Umweltbelastungspunkten nach [BUWAL 1990]).

Aber nicht nur der Energieaufwand setzt dem Recycling Grenzen. Auch der kumulierte Ressourcenaufwand (KRA) [VDI 2018] spielt eine Rolle: Damit bezeichnet man die Menge an Material, die erforderlich ist, um eine spezifische Menge des jeweiligen Rohstoffs herzustellen (Dimension: t Material/t Rohstoff). Sekundärrohstoffe haben den Vorteil, dass bei ihnen der ökologische Rucksack, etwa die Menge an nicht verwertbarem Abraum, meist geringer ist als bei Primärprodukten.

Ein wesentliches Hindernis für ein hochwertiges Recycling ist auch mangelnde Transparenz über die stoffliche Zusammensetzung vieler Produkte. Zudem enthalten Produkte manchmal gefährliche Stoffe, die einem Recycling entgegenstehen [Friegle et al. 2019].

Die Schwierigkeiten, die sich beim Recycling ergeben, lassen sich an drei Beispielen erläutern (Kasten 4):

Kasten 4

Beispiel 1: Recycling von Metallen

Das Recycling von Metallen wie Eisen, Kupfer und Aluminium ist verbreitet und etabliert, soweit die Altmetalle gewisse Reinheitsanforderungen erfüllen. Technisch derzeit nicht entfernbare Begleitelemente (wie Kupfer in Stahl oder Aluminium) bereiten aber dann zunehmende Probleme, wenn immer mehr Metalle im Kreis geführt werden und weniger primäres Rohmaterial zum Verdünnen zur Verfügung steht. Im schlimmsten Fall muss dann das kontaminierte Material aus dem Kreislauf herausgenommen und entsorgt werden [von Gleich 2006].

Bei seltenen Metallen (z. B. Kobalt und Lithium für die Batterieherstellung) ist das Recycling weniger verbreitet. Bei seltenen und strategisch wichtigen Metallen kann es jedoch ökologisch, ökonomisch und auch politisch sinnvoll sein, einen Sekundärrohstoff mit mehr Energieaufwand zu produzieren als man für den Primärrohstoff brauchen würde. Das kann der Fall sein, wenn die Rohstoffgewinnung in einem Drittland ethisch und ökologisch problematisch ist und/oder ein Land nicht total

von einem Exporteur abhängig sein möchte. In den kommenden Jahrzehnten kann dies bei chemischen Elementen eintreten, die für die Erzeugung und Speicherung von Energie aus erneuerbaren Quellen benötigt werden. Es wird damit gerechnet, dass die Rohstoffnachfrage gerade infolge des Ausbaus von Zukunftstechnologien in den kommenden Jahren dramatisch zunimmt. Zum Beispiel wird bei Lithium im Zeitraum zwischen 2013 und 2035 ein Anstieg des jährlichen Verbrauchs von 30 Mt auf 110 Mt erwartet [DERA 2016]. Ein Hinweis: Deutschland importiert mehr als 98 % der metallischen Rohstoffe.

Beispiel 2: Recycling mineralischer Baustoffe

Bei Ziegeln oder Beton wird durch Recycling die für die Herstellung benötigte Energie zum Teil eingespart. Bei Sand und Kies ist dieser Effekt zwar unbedeutend, aber ihr Abbau zerstört gewachsene Landschaftsräume und Biotope. Recycling-Beton und sekundäre Gesteinskörnungen sollten daher viel mehr auch im Hochbau genutzt werden. Entsprechende Anlagen sind vorhanden – was oft fehlt, ist die Akzeptanz von Architekten, Bauunternehmen und Investoren.

Beispiel 3: Recycling von Kunststoffen

Kunststoffe sind die Sorgenkinder des Recyclings, nicht zuletzt wegen ihrer Sortenvielfalt und aufgrund zahlloser Additive. Seit den 1950er Jahren wurden weltweit mehr als 8 Gt Kunststoffe hergestellt, wobei sich die Produktion etwa alle 20 Jahre verdoppelt und im Jahr 2015 mehr als 400 Mt betrug [BUND 2019b]. Kunststoffe sind persistente Stoffe, die durch Abnutzung oder am Ende ihrer Nutzungsphase zu erheblichen Anteilen in der Umwelt verteilt werden. In der EU entsprachen 2015 die THG-Emissionen für Herstellung, Verarbeitung und Entsorgung von Kunststoffen einem Jahresbudget von 1.781 Mt CO₂eq [BUND 2019b]. Mehr als ein Drittel der in Europa hergestellten Kunststoffmenge wird für Verpackungen verwendet [BUND 2019b]. 2017 fielen in Deutschland

18,9 Mt Verpackungsmüll an; der Anteil an Plastik beträgt hierbei insgesamt 3 Mt oder 38 kg pro Einwohner und Jahr [Deutscher Bundestag 2020]. In anderen Mitgliedstaaten der EU sind die Zahlen ähnlich [EU-Kommission 2018]. Viele Verpackungsfolien bestehen aus Mehrschichtsystemen, die ein sortenreines Recycling unmöglich machen. Zahlreiche verformbare und feste Kunststoffe (Elastomere und Duroplaste) stellen das Recycling vor erhebliche Probleme.

Einige Kunststoffe werden mit großem Erfolg recycelt, allen voran PET⁵-Getränkeflaschen oder HDPE⁶ aus Post Consumer-Abfällen. Fortschritte auf diesem Gebiet erzielte zum Beispiel die Firma Werner & Mertz [DBU 2019]. Inzwischen liegt die Zahl der Flaschen aus Recycling-PET, die durch die RecyclatInitiative in den Einsatz kamen und dadurch Flaschen aus Neeware einsparen, bei mehr als 300 Millionen. Hinter der großen Zahl steht auch eine deutliche Umweltentlastung: Bei 300 Millionen Flaschen bis zum Jahr 2019 ergibt sich eine CO₂-Ersparnis von mindestens 22.800 Tonnen. Auch mit HDPE aus Kunststoff-Mischabfällen wurden Fortschritte erzielt. Die Recyclingflaschen sind sogar für Lebensmittel und Kosmetika geeignet [EREMA 2019]. Ein weiterer Pluspunkt: Plastikflaschen, die im Recyclingkreislauf bleiben, gelangen nicht in die Umwelt und verschmutzen keine Böden oder Gewässer, indem sie über Zeiträume von Jahrhunderten hinweg zu Mikroplastik zerfallen.

Im Jahr 2018 wurden 42,6% der in der EU getrennt erfassten 29,1 Mt Plastikabfälle von Endverbrauchern (Post Consumer Abfälle) verbrannt; 24,9% wurden deponiert und nur 32,5% recycelt, wobei hiervon 19% aus der EU vorwiegend in asiatische Länder ausgeführt wurden [PlasticsEurope 2019]. Besonders bei Mischkunststoffen in Post Consumer-Abfällen macht es oft auch ökologisch keinen Sinn, mit viel Energieaufwand verschmutzte Kunststoffe sortenrein abzutrennen, zu reinigen, zu pelletieren und dann erneut zu extrudieren. Zwar lassen sich aus solchen Mischkunststoffen noch minderwertige Produkte wie Poller oder Park-

bänke herstellen („Downcycling“); aber der Markt hierfür ist überschaubar.

Bevor solche Abfälle in Müllverbrennungsanlagen oder Zementöfen ausschließlich energetisch genutzt werden, kann es sinnvoll sein, ein chemisches Recycling einzusetzen, z. B. durch Depolymerisation, wobei die Monomere, aus denen der Kunststoff besteht, wiedergewonnen werden, oder durch Solvolyse wie das CreaSolv-Verfahren, womit Multilayerverpackungen aufbereitet werden können [FHG IVV 2020]. Damit lässt sich auch das giftige Flammschutzmittel HBCD aus Polystyrol abtrennen. Die sogenannte rohstoffliche Verwertung durch Pyrolyse oder Vergasung ist hier jedoch nicht gemeint; sie ist sehr kritisch zu sehen, da durch Teerbildung gefährliche Stoffe entstehen. Insgesamt werden mehrere Verfahren zurzeit erprobt [FHG Umsicht 2020], müssen aber noch ihre ökonomische und ökologische Sinnhaftigkeit beweisen.

Eine effektive Kreislaufwirtschaft kann ein wirksames Mittel sein, den Energie- und Ressourcenverbrauch bei der Herstellung und Nutzung von Produkten zu senken, auch wenn ein nahezu hundertprozentiges stoffliches Recycling für viele Stoffgruppen eine Illusion bleibt.

Zum Ausbau eines Recyclings gehört neben der Entwicklung und Anwendung technischer Verfahren auch der Aufbau von Transport- und Sammellogistiken, Maßnahmen zur Erhöhung der Akzeptanz von Sekundärrohstoffen im Gewerbe und bei Verbraucher*innen und vor allem Änderungen in der Produktgestaltung („Design“). Produkte müssen wiederverwendbar, langlebiger, reparierbar und modular konstruiert sein, damit aus ihnen hochwertige Recyclingprodukte hergestellt werden können. Recyclingfähigkeit muss also ein wesentliches Bewertungskriterium für Produkte sein! Außerdem vermeiden regionale Wertschöpfungsketten lange Transportwege.

⁵ PET: Polyethylenterephthalat

⁶ HDPE: High Density Polyethylene (Polyethylen hoher Dichte)

Alternative Rohstoffbasis für die chemische Industrie

Die weltweite Chemikalienproduktion steigt in Menge, Umsatz und Vielfalt kontinuierlich [UNEP 2019a]. In den vergangenen Jahrzehnten hat sich die Produktion ungefähr alle zwölf Jahre verdoppelt. Eine entsprechende weitere Steigerung wird vorhergesagt. Die chemische Industrie benötigt etwa 10% des globalen Energiebedarfs für ihre Prozesse. Der Mineralölverbrauch des Chemiesektors wächst im Vergleich mit anderen Branchen am stärksten [IEA 2018b].

Die chemische Industrie unternimmt zwar erhebliche Anstrengungen zu einer effizienten Energienutzung bei der Produktion und damit zu einer Verbesserung ihrer CO₂-Bilanz. Es kann jedoch auf Dauer nicht nachhaltig sein, fossile Rohstoffe – allen voran Mineralöl (und auch Gas) – als dominierende Rohstoffbasis (Feedstock) für die Produktion zu nutzen. Letztlich tragen Stoffe, die aus fossilen Rohstoffen hergestellt sind, auch zu Treibhausgasemissionen bei, indem sie am Ende ihrer Nutzungszeit entweder biologisch abgebaut oder bei der Entsorgung verbrannt werden.

Die früher verbreitete (fossile) Rohstoffquelle Kohle kommt wegen ihrer noch größeren CO₂-Emissionen

pro Energieeinheit im Vergleich zu Mineralöl und Gas nicht in Betracht. Die direkte Nutzung des energiearmen und reaktionsträgen Kohlenstoffdioxids als Synthesebaustein (Carbon Capture and Use, CCU) ist zwar für einige Produktionen möglich, ist aber im Umfang nur gering [Behr & Neuberg 2008].

Somit verbleiben zwei Möglichkeiten, Kohlenstoff für die Synthese chemischer Stoffe zu gewinnen: entweder aus biologischen Grundstoffen oder synthetisch aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff unter Einsatz von Energie.

- Biostoffe können den Vorteil haben, dass die Syntheseleistungen der Natur, z. B. bei Pflanzen und Mikroorganismen, genutzt werden können. Die „weiße“ Biotechnologie in geschlossenen Systemen dient der Synthese einer zunehmenden Anzahl von Chemikalien. Auch Algenkulturen können organische Reststoffe verwerten und Biomasse in Form von Proteinen, Fetten und Kohlehydraten herstellen [DECHEMA 2016, Pleissner & Smetana 2020]. Außerdem sind Naturstoffe wie Holz oft eine sinnvolle Alternative zum Beispiel zu Beton als Baustoff oder auch zu Kunststoffen. Bei der Zellstoffgewinnung aus Holz fällt als „Abfallprodukt“ in großer Menge



Abbildung 8: Mineralöl bildet die wichtigste stoffliche Grundlage der chemischen Industrie (Werk Burghausen)
© iStock.com/Dirschl

Lignin an, das sich grundsätzlich als Grundstoff zur Herstellung aromatischer Verbindungen eignet [Wong et al. 2020]. Gleichwohl sind die Potenziale der Bioökonomie, also der Nutzung von Biostoffen, begrenzt (siehe Kasten 5). Der derzeitige Bedarf an mineralölbasierten Rohstoffen könnte nur zu einem Bruchteil durch biologische Rohstoffe ersetzt werden. Denn die Produktion von Biomasse ist meist flächengebunden; Boden ist weder in den Ländern des Nordens noch des Südens vermehrbar. Flächenkonkurrenzen zum Anbau lebensmittelliefernder Pflanzen, eine weitere Intensivierung der Land- und Forstwirtschaft und die Zerstörung von Naturräumen wären die unweigerliche Folge [Spangenberg & Kuhlmann 2020]. Monokulturen für nachwachsende Rohstoffe müssten entstehen (siehe Kapitel 5). Biomasse lässt sich auch durch Hydrierung in chemische Grundstoffe überführen (Fischer-Tropsch-Synthese). Dabei wird jedoch das wertvolle Komplexitätsniveau natürlicher Produkte zerstört. Generell ist es hierbei naturverträglicher, Abfallbiomasse zur Herstellung chemischer Grundstoffe zu nutzen als Anbaubiomasse.

- Die zweite Alternative ist die Synthese chemischer Grundstoffe durch die Reaktion von Kohlenstoffdioxid (CO₂) mit Wasserstoff (H₂) unter Einsatz von Energie. Mit solchen Power to X-Verfahren (PtX)⁷ können auch synthetische Kraftstoffe hergestellt werden. Zahlreiche kleinere Anlagen sind bereits in Betrieb [IN4 Climate NRW 2020, KIT 2019] und eine Mindestquote synthetischer Kraftstoffe in Flugbenzin wird politisch diskutiert [BMU 2020]. Grundsätzlich hilft dies dem Klima nur, wenn die eingesetzte Energie zur Gewinnung von Wasserstoff („grüner“ Wasserstoff) und den daraus synthetisierten chemischen Grundstoffen erneuerbar ist. Erhebliche Energiemengen sind dafür erforderlich, die bei den heutigen Abschätzungen des in Zukunft benötigten Energiebedarfs bisher kaum berücksichtigt werden. So würde sich nach Angaben der chemischen Industrie der Strombedarf für die Branche in Deutschland bei einer Verringerung ihrer THG-Emissionen um 98 % (bis 2050) um den Faktor elf erhöhen [DECEMA 2019]. Außerdem wird man – spätestens sobald

Kasten 5

Stoffkreisläufe in der Natur

Die Bioökonomie fokussiert einerseits auf den Übergang von nicht regenerierbaren zu regenerierbaren Ressourcen und andererseits auf die Natur als Vorbild im Sinne eines Lernens von der Natur (Bionik). Bäume können es sich zum Beispiel leisten, ihre ‚Photovoltaikmodule‘ zur Wasserspaltung im Herbst abzuwerfen, damit zur Humusbildung beizutragen. Im Frühjahr bauen sie dann neue Module. Davon sind wir technologisch und stofflich weit entfernt. In der Natur gibt es im engeren Sinne auch keine Abfälle. Reststoffe der einen Organismen werden von anderen als Rohstoffe genutzt. Die ‚Industrielle Ökologie‘ versucht, sich bei der Gestaltung von Unternehmensclustern daran zu orientieren [Chertow 2000, Korhonen et al. 2005]. Die Natur kennt auch keine Rohstoffimporte. Genutzt wird, was unmittelbar vorhanden ist (CO₂, Wasser, Stickstoff, Kalk, Sonnenenergie usw.). Dem aktuellen Bioökonomiediskurs fehlt es nicht zuletzt auch an Achtung vor der Natur. In diesem Sinne ist auch der Begriff ‚nachwachsende Rohstoffe‘ irreführend. Worüber wir sprechen, sind pflanzliche und tierische Produkte, die wir zur Vermeidung von Energie- und Rohstoffverlusten möglichst auf dem hohen molekularen und Komplexitätsniveau nutzen sollten, auf das die Organismen sie mit Hilfe des unmittelbar Vorhandenen schon synthetisiert haben. Dieses Niveau sollte nach Möglichkeit nicht durch industrielle Prozesse verloren gehen, z. B. durch Bioraffination von Naturstoffen auf das Niveau von Ethen oder einfachen Kohlenwasserstoffgemischen wie Naphtha.

man keine Energieerzeugung aus fossilen Quellen mehr betreiben wird – zur Bedarfsdeckung CO₂ aus der Luft filtern müssen [IEA 2020, Viebahn et al. 2019]. Derartige Verfahren zum ‚Direct air capture‘ befinden sich derzeit in Entwicklung, sind aber noch energie- und kostenintensiv. Das IPCC diskutiert in einem Report 2018 die Möglichkeit „negativer Emissionen“, um das 1,5 °C-Ziel zu erreichen [IPCC 2018]. Geo-Engineering-Verfahren, um Emissionen von Treibhausgasen zu vermeiden oder rückgängig zu

⁷ Endprodukte dieser Verfahren können Gase wie Methan (PtG) oder flüssige Kohlenwasserstoffe (PtL) sein.

machen, sind wegen ungeklärter irreversibler Langzeitfolgen allerdings äußerst problematisch.

Es wird deutlich, dass nicht alleine eine Verstetigung, sondern nur eine Reduktion der chemischen Produktion nachhaltig sein kann – ein weiteres Argument für die Verkleinerung der Stoffströme nicht nur durch Effizienzsteigerung, sondern auch durch Bedarfsminde- rung (Suffizienz).

4. Auswirkungen des Klimawandels auf Wirkung und Verhalten von Stoffen

Der Klimawandel beeinflusst zahlreiche physikalische, chemische und biologische Prozesse auf der Erde: Höhere Temperaturen, veränderte Niederschlagsmengen, schrumpfende Eisbedeckung, Änderungen der Vegetation, Meeres- und Luftströmungen wirken sich zudem auf Exposition und Wirkung von Schadstoffen auf Menschen und Umweltorganismen aus. Zahlreiche Stressfaktoren wirken auf Menschen und Umweltorganismen ein, können die Empfindlichkeit gegenüber toxischen Stoffen steigern und die Wahrscheinlichkeit von Erkrankungen erhöhen. Der Klimawandel verschiebt die Zeiten von Fortpflanzung und Nahrungsaufnahme, was zu geringerer Fitness der Organismen führen kann. Derartige Einflüsse wurden beispielsweise bei Fischen und Zooplankton an Talsperren nachgewiesen [Jäschke et al. 2013].

Mehr Luftschadstoffe und toxische Belastung

Die Tendenz fester und flüssiger Chemikalien, in den Gaszustand überzugehen, steigt (bei konstantem Luftdruck) mit zunehmender Temperatur stark an. Das direkte Maß für das Bestreben einer Substanz, sich in die Atmosphäre zu verflüchtigen, ist ihr Dampfdruck bei gegebener Temperatur. Im Bereich der natürlichen Umgebungstemperaturen auf der Erde zwischen Polargebieten und Wüsten kann der Dampfdruck eines Stoffes um ein bis zwei Größenordnungen parallel zur Temperatur ansteigen [Klöpffer 2012]. Bei einem moderaten Temperaturanstieg von 24 °C auf 29 °C nimmt zum Beispiel der Dampfdruck des Weichmachers Diethylphthalat bereits um rund 60% zu [Berechnung mit Näherungsformel aus Schwarzenbach et al. 2002].

Die globale Erwärmung bewirkt also einen verstärkten Übergang von Chemikalien in die Atmosphäre. Dadurch nimmt ihr Transport in der Atmosphäre, bis hin zur globalen Ausbreitung, erheblich zu.

Neben der Lufttemperatur spielen Dauer und Intensität der Sonneneinstrahlung auf Materialien und Erzeugnisse für die Verflüchtigung von Chemikalien eine wesentliche Rolle. Dies wurde kürzlich für die Freisetzung organischer Verbindungen, darunter viele aromatische Kohlenwasserstoffe, aus dem Asphalt von

Straßenbelägen in Kalifornien belegt: Bei moderater direkter Sonneneinstrahlung auf den Asphalt nahmen die Emissionen um das Dreifache zu. Die freigesetzten Substanzen werden unter Sonneneinstrahlung durch Hydroxylradikale zu schwerflüchtigen Verbindungen oxidiert, die sich zu flüssigen und festen Partikeln (Aerosole) zusammenlagern. Diese sekundären organischen Aerosole zählen zum alveolengängigen Feinstaub (PM_{2,5}). Hochgerechnet für die Region der Metropole Los Angeles übertreffen die jährlichen Emissionen aus Asphalt im Sommer bereits heute die primären Feinstaubemissionen aus dem Straßenverkehr der Stadt [Khare et al. 2020]. Die Versiegelung von Flächen mit Asphalt ist ein global steigender Trend. Weltweit werden jährlich über 122 Mt erdölbasierter Flüssigasphalt verarbeitet.

Flüchtige organische Verbindungen wiederum führen in der unteren Troposphäre in Gegenwart von Stickstoffoxiden („NO_x“: NO und NO₂) und intensiver Sonneneinstrahlung zur Bildung hoher Ozonkonzentrationen [Graedel und Crutzen 1994]. Ozon ist ein lungengängiges Gas, das aufgrund seiner stark oxidierenden Wirkung auf die Atemwege reizend wirkt, Entzündungen auslöst und zu einer Beeinträchtigung der Lungenfunktion führt.

Durch den Klimawandel nehmen Häufigkeit und Dauer sommerlicher Hitzeperioden und die Sonneneinstrahlung zu. Die damit einhergehende Abnahme sommerlicher Niederschläge führt zusätzlich zu höheren Konzentrationen von Luftschadstoffen, vor allem von Feinstaub, da die Luft seltener „ausgewaschen“ wird und für diese stabilen Hochdruckwetterlagen ein geringer Austausch der Luftmassen charakteristisch ist. Daher ist trotz bereits erreichter Emissionsminderungen von flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) und Stickoxiden (NO_x) mit eher steigenden Konzentrationen von Luftschadstoffen zu rechnen. Gerade in urbanen Gebieten wird die Temperatur deutlich schneller ansteigen als im globalen Mittel [BMZ 2015]. Der Faktor beträgt je nach Lage 2 bis 4. Im Jahr 2050 werden im Vergleich zu 2020 demnach Berlins Sommer bis zu 6 °C heißer sein; für Wien sind sogar 7,6 °C mehr vorhergesagt [Bastin 2019, Leahy 2019].

Experimentelle Studien belegen Kombinationswirkungen verschiedener Luftschadstoffe wie Stickoxiden, lungengängigem Feinstaub und Ozon. Gerade in städtischen Gebieten sind Menschen durch die sommerlichen Hitzeperioden bereits sehr gestresst, können dehydrieren und deshalb empfindlicher auf Schadstoffe reagieren. Im August 2020, dem zweitheißesten seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881, sind nach Angaben des Statistischen Bundesamtes in Deutschland 6% mehr Menschen gestorben als im Durchschnitt der Jahre 2016 bis 2019 [Stat. Bundesamt 2020a]. Es gibt Hinweise, dass die Kombination von Klimawandel und Exposition gegenüber Luftschadstoffen das Potenzial für ernste negative Folgen auf die menschliche Gesundheit in urbanen Räumen und anderen Gebieten mit hoher Luftverschmutzung hat [Noyes et al. 2009]. Was für den Menschen gilt, trifft ebenso auf Tiere und Pflanzen zu: Luftschadstoffe beeinträchtigen Stoffwechsel und Wachstum.

Semiflüchtige Substanzen

Semiflüchtige Substanzen sind Stoffe, die zwar nicht rasch verdampfen, aber einen so hohen Dampfdruck besitzen, dass sie in der Atmosphäre zumindest teilweise gasförmig und nicht nur an Feinstaubpartikel angelagert vorliegen. Hierzu zählen die meisten der persistenten organischen Schadstoffe (persistent organic pollutants, POPs). Typische Vertreter sind die sehr fettlöslichen polychlorierten Biphenyle (PCB). Obgleich die Produktion und Verwendung von PCB in Deutschland schon in den 1980er Jahren eingestellt wurde, werden sie aktuell immer noch aus PCB-haltigen Materialien wie Fugendichtungsmassen und Anstrichen freigesetzt [Weber et al. 2015], durch atmosphärischen Ferntransport global verbreitet und schlagen sich in der Folge gerade in den arktischen und subarktischen Regionen auf Land- und Wasseroberflächen nieder. In diesen kalten Gegenden werden sie von Organismen aufgenommen und reichern sich besonders in Tieren an der Spitze der Nahrungsnetze in hohen Konzentrationen an [Desforges et al. 2018]. Auch in alpinen Regionen finden sich in höheren Lagen erhöhte Gehalte. Der Prozess des Transports in höhere Breiten und der Anreicherung dort wird „globale Des-

tillation“ oder “Heuschrecken-Effekt“ genannt (siehe Abb. 9) [Wania & Mackay 1996].

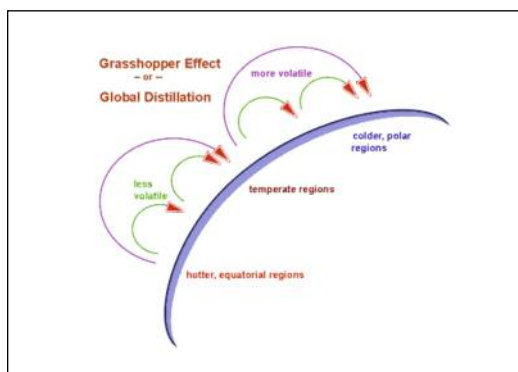


Abbildung 9: Globale Destillation persistenter organischer Schadstoffe (POPs)⁸: Semiflüchtige Stoffe verdampfen in warmen Regionen und werden – teilweise in mehreren Schritten – in der Atmosphäre in kalte Zonen transportiert, wo sie deponiert werden (Darstellung der Universität Guelph/Kanada).

Im Laufe der Jahrzehnte lagerten sich beträchtliche Mengen von POPs auf Gletschern und arktischen Böden ab. Durch das in Folge der Erderwärmung eintretende Abschmelzen der Gletscher und das Auftauen der Permafrostböden werden diese Stoffe mit den Schmelz- und Quellwässern verstärkt freigesetzt. Dies führt zu erhöhten POP-Konzentrationen in Gewässern, Böden und schließlich in Organismen [Noyes et al. 2009]. Auf der Zugspitze wurden bereits chlororganische Pestizide, PCB und andere POPs im Quellwasser des Tunnelsystems unterhalb des Schneeferners nachgewiesen [LfU 2014].

Die vom Klimawandel verursachte Zunahme der Häufigkeit und Dauer sommerlicher Hitzeperioden und der Sonneneinstrahlung verstärkt die Verflüchtigung von Stoffen aus Oberflächen und deren atmosphärischen (Fern-)Transport. Gleiches gilt für die Ausbreitung semiflüchtiger Pestizidwirkstoffe von Pflanzen- und Bodenoberflächen nach der Ausbringung. In Brandenburg wurde über mehrere Jahre die weite Verdriftung der Herbizide Pendimethalin und Prosulfocarb und der großflächige Eintrag in biologisch bewirtschaftete Agrarräume des Biosphärenreservats Schorfheide-Chorin nachgewiesen [LUGV 2015]. Auch in Südtirol wurden auf Spielplätzen in der Nachbarschaft von

⁸ hotter, equatorial regions: warme Äquatorregionen, temperate regions: gemäßigte Regionen, colder, polar regions: kalte Polarregionen, less volatile: weniger flüchtig, more volatile: überdurchschnittlich flüchtig

Obst- und Weingärten hohe Konzentrationen ausgebrachter Pestizide (z. B. Chlorpyrifos-methyl, Oxidazon) festgestellt [Linhart et al. 2021].

Rascherer Abbau

Höhere Temperaturen führen meist zu einem schnelleren Abbau organischer Chemikalien in der Umwelt durch mikrobielle Umwandlung und durch abiotische Prozesse wie Hydrolyse und Photolyse, sodass deren Gesamthalbwertszeit in der Umwelt abnimmt. Von Waldow et al. sagten dies für verschiedene POPs für die nördliche Hemisphäre durch die Anwendung eines komplexen atmosphärisch-ozeanischen Zirkulationsmodells vorher, wobei ein Anstieg der mittleren globalen Temperatur um 3,4 °C bis zum Jahr 2100 angenommen wurde. Die Autor*innen zeigten auch, dass der Klimawandel den Ferntransport von PCB und anderen POPs aus den Regionen ihrer Verwendung (vor allem Europa, Nordamerika und Ostasien) in benachbarte Kontinente und in die arktischen Regionen verstärkt [von Waldow et al. 2007].

Der raschere Abbau organischer Chemikalien bei höheren Temperaturen kann vorteilhaft sein, ist doch die Persistenz dann weniger ausgeprägt. Allerdings entstehen auch toxische Umwandlungsprodukte schneller und in höheren Konzentrationen. Die Folgen des Klimawandels, wie Trockenheit und verminderte Vegetation, können bewirken, dass die Schadstoffbelastung von Böden, Gewässern und Lebewesen trotz höherer Temperaturen letztlich nicht abnimmt.

Human- und Ökotoxizität

Temperaturerhöhungen führen in der Umwelt häufig zu einem Anstieg der toxischen und ökotoxischen Wirkung von Schadstoffen [Noyes et al. 2009]. Sowohl aus der Öko- als auch der Humantoxikologie ist bekannt, dass in der Regel das Einwirken von zwei oder mehreren Stressoren auf ein Lebewesen schädlicher ist, als wenn nur einer der Stressoren mit der gleichen Intensität wirkt. Dies gilt unabhängig davon, ob die Stressoren chemisch oder physikalisch-biologisch sind oder eine Kombination aus beiden. Physikalisch-biologische Stressoren können natürlichen Ursprungs

sein, wie ungünstige Temperatur, Wasser- oder Nahrungsmangel. Der Klimawandel kann gerade diese natürlichen Stressoren verstärken oder überhaupt erst verursachen. Organismen, die nicht in andere Lebensräume ausweichen können, sind vom Aussterben bedroht.

Beispielsweise ist bei Fischen belegt, dass die Temperaturtoleranz bei Exposition mit verschiedenen Pestizidwirkstoffen sinkt. Die kombinierte Einwirkung von hoher Temperatur und einer Chemikalie kann dabei zu einem schädlichen Effekt führen, selbst wenn die einzelnen Dosen für sich allein jeweils ohne erkennbare Wirkung sind. So zeigten Besson et al. [2020], dass die kombinierte Exposition gegenüber einer nicht-toxischen Konzentration des Insektizids Chlorpyrifos und einer um nur 1,5 °C erhöhten Wassertemperatur bei Fischen das Schilddrüsenhormonsystem – ein für die Entwicklung und das Überleben zentrales Hormonsystem – stört. Und: Treten chemische und nicht-chemische Stressoren bei aquatischen Lebewesen gemeinsam auf, kann dies zu einer erheblichen Steigerung der toxischen Wirkung führen, so dass die Autoren von überadditiven Effekten sprechen [Segner et al. 2014].

Weiterhin gibt es ernstzunehmende Hinweise, dass eine hohe Belastung mit zahlreichen POPs, von denen viele nachweislich endokrin wirksam sind, und anderen toxischen Stoffen die Adaptionsfähigkeit von Säugetieren und Vögeln an veränderte Umweltbedingungen beeinträchtigen kann [Steinhäuser 2007]. Beispielsweise sind die Konzentrationen von polychlorierten Biphenylen (PCB) und per- und polyfluorierten Alkylsubstanzen (PFAS) im Körper einiger Eisbärpopulationen so hoch, dass diese die körpereigenen Abwehrkräfte schwächen [Liu et al. 2018]. Das Immunsystem der Tiere ist dann weniger in der Lage, dem Klimastress standzuhalten. Dies ist wichtig, da der Temperaturanstieg in den arktischen Regionen in einem viel stärkeren Maße und schneller voranschreitet als im globalen Durchschnitt. Für die Anpassungsfähigkeit von Lebewesen an höhere Temperaturen ist aber nicht nur der absolute Anstieg, sondern auch die Geschwindigkeit der Erderwärmung entscheidend [Schellnhuber 2016]. Die rasante Erwär-

mung der Arktis könnte dort somit in Kombination mit der hohen POP-Belastung der arktischen Biota zu einem dramatischen Verlust der Artenvielfalt führen.

Hochwasser setzt Schadstoffe frei

Während in Folge des Klimawandels in vielen Regionen in den Sommermonaten die Niederschläge abnehmen, werden sie in den Wintermonaten häufig steigen. Insgesamt wird damit gerechnet, dass die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen und von Hochwasser zunehmen. Wenn – wie häufig der Fall – die kommunalen Kläranlagen große Regenmengen nicht mehr aufnehmen können, fließt mit Niederschlagswasser verdünntes ungereinigtes Abwasser in Bäche und Flüsse [Tagesspiegel 2020]. Entsprechend gelangen höhere Schadstoffmengen in die Fließgewässer.

Kasten 6

Mobilisierung von Schadstoffen aus Sedimenten

Bei Hochwasserereignissen können Schadstoffe aus kontaminierten Sedimenten remobilisiert werden. Von 1930 bis 1945 wurden in Bitterfeld, Aken und Staßfurt große Mengen Magnesium produziert. Durch die Umsetzung der Rohstoffe mit Chlorgas entstanden polychlorierte Dioxine und Furane (PCDD/F) als Nebenprodukte, die mit dem Waschwasser in die Flüsse Mulde, Bode und Saale geleitet wurden. In der Folge wurden über die letzten 70 Jahre durch Hochwasser die Sedimente und Flussauen der Elbe bis zum Hamburger Hafen und der Mündung in die Nordsee kontaminiert [Weber et al. 2015].

Die DDR stellte im Einzugsbereich der Mulde große Mengen Organochlorpestizide her, die sich im Sediment anreicherten. Bei dem großen Hochwasserereignis vom August 2002 wurden diese Schadstoffe remobilisiert und in die Elbe gespült. In den folgenden Jahren wurden in den Brassen der Mulde deutlich höhere Gehalte dieser Pestizidwirkstoffe festgestellt. (siehe Abb. 10) [UBA 2020c].

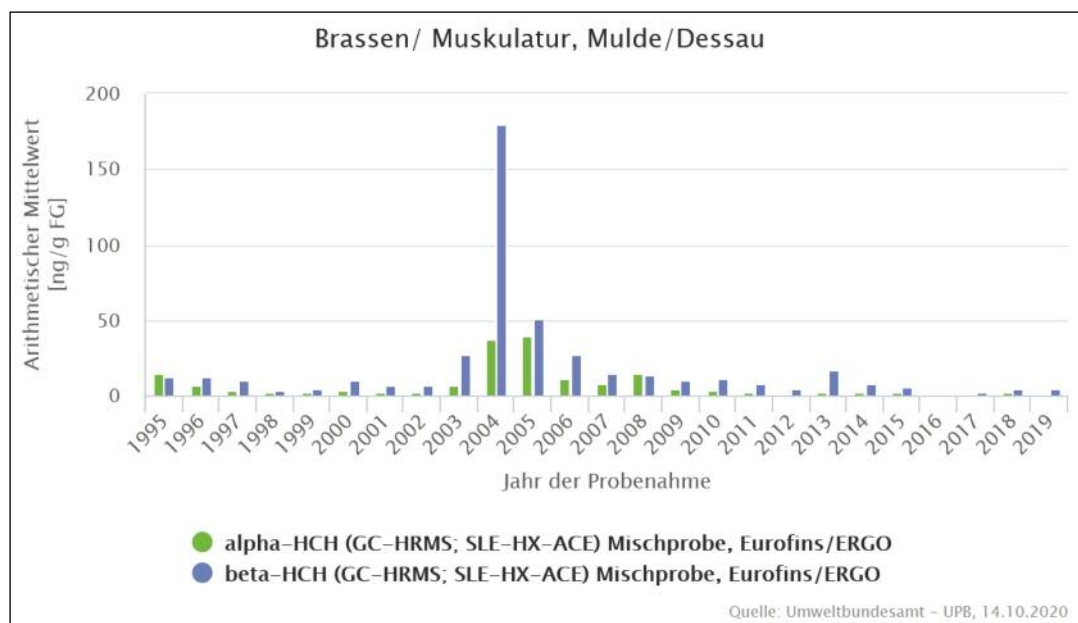


Abbildung 10: Konzentrationen der Hexachlorcyclohexan-Isomere in der Muskulatur von Brassen aus der Mulde in ng/g Frischgewicht

5. Stoffliche Belastungen führen zu Verlusten der biologischen Vielfalt

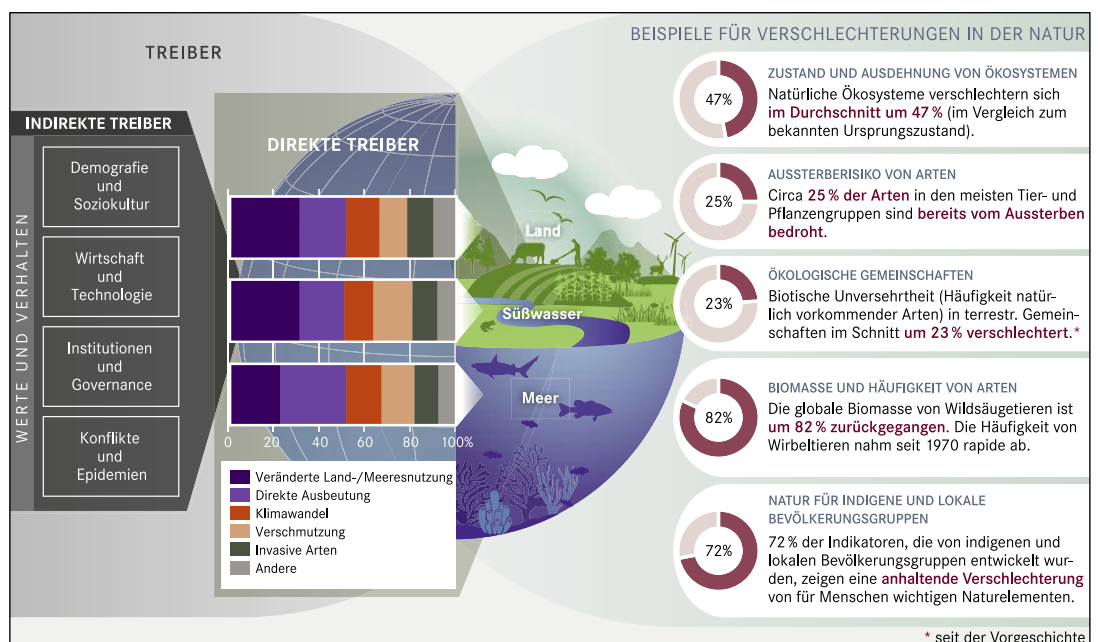
Weltweit nimmt die biologische Vielfalt dramatisch ab. Die natürliche Aussterberate, die bis ungefähr zum Jahr 1500 n. Chr. jährlich bei 0,1 bis 2,0 Arten pro 1 Million Arten und Jahr gelegen hat, wird heute um das zehn- bis hundertfache übertroffen. Circa ein Viertel der bekannten Arten (Wirbeltiere, Wirbellose und Pflanzen) sind vom Aussterben bedroht [IPBES 2019]. Die Abnahme der biologischen Vielfalt betrifft jedoch nicht nur die Zahl ausstorbender Arten: Der Gesamtbestand der freilebenden Wirbeltiere hat seit 1970 um 68 % abgenommen [WWF 2020].

Geraten Ökosysteme unter Stress, sind es die empfindlichen Arten, die zuerst verschwinden. Die Toleranz des Ökosystems gegenüber anthropogenen Belastungen, die sogenannte „pollution-induced community tolerance“ (PICT), nimmt dann zwar häufig zu [Blanck 2010]; das Ökosystem ist aber trotzdem gefährdet. Denn die Fähigkeit eines Ökosystems, nach Störungen den ursprünglichen Zustand wieder zu erreichen, die so genannte Resilienz, nimmt mit abnehmender Diversität ab.

Im Global Biodiversity Outlook 5 (GBO 5) zeigte die UNEP im September 2020, dass die meisten der

20 Aichi-Ziele⁹ verfehlt werden. Diese Ziele hat die Staatengemeinschaft 2010 mit dem Ziel, die Situation der biologischen Vielfalt bis 2020 deutlich zu verbessern, vereinbart [CBD 2020]. Die wichtigsten Ursachen dafür sind Landnutzungsänderungen durch Agrar- und Forstwirtschaft, insbesondere Entwaldung, sowie Urbanisierung und Übernutzung der Ökosysteme, wie der Meere durch Fischerei. Auch die Rohstoffgewinnung, Stoffproduktion und -nutzung sowie der Pestizideinsatz [Leopoldina 2018] tragen wesentlich zum Rückgang der Biodiversität bei. Für eine Umkehr des fortschreitenden Verlusts an biologischer Vielfalt sind aus Sicht der Autor*innen des GBO 5 auch eine niedrigere Schadstoffbelastung, eine nachhaltige Produktion und ein geringerer Konsum erforderlich.

Stoffeinträge sind nach dem Landnutzungswandel und der direkten Ausbeutung der Natur ein wesentlicher Treiber, der die Natur in ähnlicher Größenordnung verändert wie der Klimawandel [IPBES 2019]. Die Biodiversitätskrise lässt sich also nur lösen, wenn neben dem Klimaschutz auch eine nachhaltige Stoffpolitik umgesetzt wird (Abb. 11).



⁹ Die 20 Aichi-Ziele wurden 2010 bei der Vertragsstaatenkonferenz der Konvention über die biologische Vielfalt beschlossen.

Abbildung 11: Treiber für Biodiversitätsverluste: Deutsche Übersetzung des UFZ in Anlehnung an das Summary for Policy makers (SPM) des Globalen Assessments des IPBES [IPBES 2019]

Rohstoffgewinnung und -aufbereitung

Das kontinuierliche Anschwellen der Stoffströme beginnt mit der Extraktion der Rohstoffe. Die Gewinnung von Erzen und fossilen Rohstoffen hat im vergangenen Jahrhundert dramatisch zugenommen und setzt sich fort (siehe Abb. 12) [IRP 2017, UNEP 2016, de Wit et al. 2018]. Bis 2050 wird eine weitere Verdopplung des Verbrauchs erwartet. Zwar steigt auch die Gesamtrohstoffproduktivität: Sie hat in Deutschland zwischen 2000 und 2016 um 35% zugenommen [Stat. Bundesamt 2020b]. Doch durch die starke Zunahme des Konsums wurden diese Gewinne mehr als kompensiert.

Diese Rohstoffressourcen sind zudem nicht erneuerbar. Da ihre Extraktion aus immer geringeren Konzentrationen zu einem stetig höheren Aufwand führt, ist eine Erschöpfung der Vorkommen absehbar. Sind die begehrten Metalle nur in geringen Konzentrationen im Erz enthalten, entstehen bei der Förderung und Verarbeitung noch größere Abraumhalden. Insbesondere

bei Tagebauen sind der Flächenbedarf und damit der Verlust belebter Landschaft enorm. Neu erschlossene Lagerstätten werden immer tiefer und entlegener; der Erzgehalt nimmt ab, Abraum und Einsatz von Chemikalien und Energie steigen [UBA 2018]. In Ländern des Südens ist zudem die Rohstoffgewinnung in etlichen Fällen mit Menschenrechtsverletzungen verbunden.

Häufig werden bei bergbaulichen Aktivitäten toxische Begleitstoffe frei. Ein Beispiel ist die Freisetzung von Uran und Cadmium bei der Gewinnung von Phosphat. Dramatische Beispiele für zerstörte Naturräume durch Rohstoffabbau sind die Gewinnung von Öl aus Teersanden in Alberta (Kanada), die Verseuchung des Nigerdeltas in Afrika mit Mineralöl und die illegale Gewinnung von Gold unter Einsatz von Quecksilber im Amazonasurwald (Abb. 13). Der Rohstoffbedarf der Industrie- und einiger Schwellenländer bedroht damit nicht nur einzelne Arten, sondern zerstört ganze Ökosysteme.

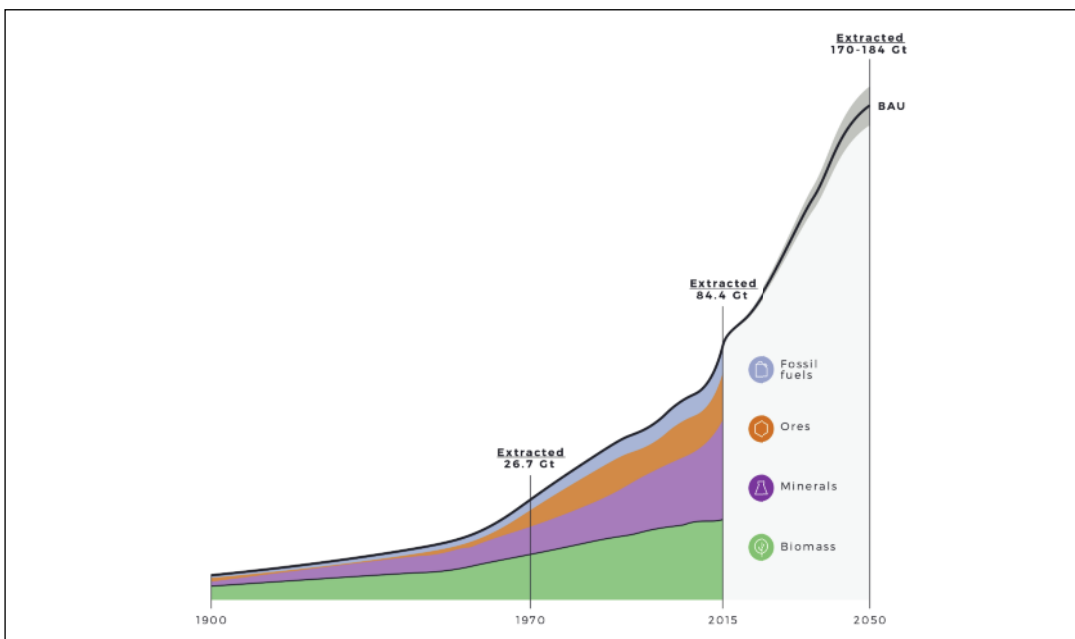


Abbildung 12: Weltweite Zunahme der Rohstoffextraktion (de Wit et al., 2018)¹⁰

¹⁰ Biomass – Biomasse, Minerals – Mineralien, Ores – Erze, Fossil fuels – fossile Brennstoffe

Wegen des Klimawandels werden die Lagerstätten für Rohöl und Erdgas in subpolaren und polaren Zonen immer zugänglicher. Auch der Erzabbau wird in diesen Regionen erleichtert. Doch ein Unfall, etwa auf einer Ölplattform, hätte in diesen Breiten für die durch den Klimawandel bereits bedrohten Organismen und Öko-

systeme weitreichendere Folgen als in wärmeren Gegenden, zumal sich das Öl bei niedrigeren Temperaturen langsamer abbaut. Der Ölunfall im sibirischen Norilsk im Juni 2020 ist ein Beispiel für dramatische Folgen eines Umweltunfalls in arktischen Breiten [Spiegel 2020].



Abbildung 13: Verwüstung von Landschaften durch Rohstoffextraktion: Abbau von Ölsanden in Fort McMurray (Alberta, Kanada) (oben), illegale Goldgewinnung mit Quecksilber im Amazonasgebiet (unten)
© iStock.com/dan_prat (oben), iStock.com/Tarcisio_Schnaider (unten)

Auch das Aufbereiten von Erzen führt zu erheblichen toxischen Emissionen und gefährdet so die belebte Natur. Aus dem 19. und 20. Jahrhundert sind Hüttenrauchschäden bekannt, die zum Absterben der Wälder und auch zu Verlusten an Säugetieren und Vögeln im Umkreis führten [Knolle und Knolle 1993, Schröder und Reuss 1883]. Dank verbesserter Reinigung der Abluft aus solchen Anlagen gehört dies in der EU der Vergangenheit an, ist jedoch in den Ländern des Südens noch verbreitet. Aber auch in Industrieländern wie Australien sind heute metallurgische Prozesse noch häufig mit erheblichen Umweltbelastungen verbunden [Norgate et al. 2006]. Noch in der jüngeren Vergangenheit hat nach Dammbürchen in Ungarn, Kanada und Brasilien toxischer Erzaufbereitungsschlamm zahlreiche Menschenleben gekostet und ganze Täler und Flüsse vergiftet. Das Sintern von Eisenerz war zudem lange Zeit eine wichtige Emissionsquelle für polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F) [DGUV 1990, UBA 2014].

Emissionen toxischer Stoffe in die Luft

Werden organische Stoffe verbrannt, entstehen meist nicht nur Kohlenstoffdioxid und Wasser, sondern auch zahlreiche andere, die Umwelt und Biosphäre belastende Stoffe, die weiträumig verteilt werden (Abb. 14). In den Industrieländern gehörten lange Zeit die Emissionen von Schwefeldioxid (SO_2) und Stickstoffoxiden (NO und NO_2) bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe zu den drängendsten Umweltproblemen. Aus Schwefeldioxid entsteht Schwefelsäure, die zu niedrigen pH-Werten des Niederschlagswassers führt, was insbesondere Wälder schädigt. Stickstoffoxide – auch heute noch ein Problem insbesondere bei Emissionen aus Dieselmotoren – werden zu Salpetersäure oxidiert und bewirken neben der Versauerung eine großflächige Düngung und damit Eutrophierung terrestrischer Ökosysteme.



Abbildung 14: Modernes Kraftwerk in Europa
© iStock.com/zhongguo

Eine unvollständige Verbrennung führt auch zur Emission toxischer polycyclischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK). Bei der Verbrennung von Abfällen und insbesondere chlorhaltiger Produkte können polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F) gebildet werden. Diese zählen zu den giftigsten Stoffen, sind persistent und können sich in Organismen anreichern. Sie werden daher in der Stockholm-Konvention zu persistenten organischen Schadstoffen (POPs) geregelt (siehe Kasten 1, Kapitel 1). In den Industrieländern werden diese Emissionen heute nach dem Stand der Technik minimiert¹¹.

Auch bei der Herstellung und Verarbeitung von Chemikalien und Produkten werden viele Stoffe einschließlich ihrer Nebenprodukte in die Luft emittiert. Hinzu kommen ungewollte Freisetzungen von Stoffen durch betriebliche Störungen oder Unfälle bei Produktion und Verarbeitung.

Eine nachhaltige Stoffpolitik bedeutet daher auch, Emissionen aus Verbrennung sowie Herstellung und Verarbeitung von Stoffen, insbesondere toxische Stoffe, zu vermeiden oder, falls dies nicht möglich ist, soweit wie möglich zu verringern. Oft lassen sich schädliche Emissionen durch die Wahl und Veränderung von Produktionsprozessen vermeiden. Außerdem sind Vorkehrungen zu treffen, dass Betriebsstörungen, die zum unbeabsichtigten Austritt schädlicher Stoffe führen können, vermieden werden oder beherrschbar sind.

Emissionen müssen in den Industrieländern nach dem Stand der Technik beziehungsweise dem Stand der Sicherheitstechnik vermindert werden, zum Beispiel durch Einhausung von Prozessen und optimierte Abgasreinigung. In vielen Fällen ist allerdings zwischen Industrie, Behörden und Umweltverbänden umstritten, ob neue Techniken bereits Stand der Technik sind. Die Industrie betrachtet neue Techniken zuweilen aufgrund ihrer Kosten als unverhältnismäßig und versucht, deren Einführung zu verzögern. Der Stand der Technik in der EU wird aber bei vielen Anlagen weltweit noch nicht erreicht.

Kasten 7

Beispiele für Defizite bei der Emissionsminderung in Industrieländern

In der Seeschifffahrt wird stark schwefelhaltiges Schweröl („Bunkeröl“) noch sehr oft eingesetzt. Die Umstellung auf schwefelarme und damit weniger schädliche Treibstoffe ist beispielsweise in vielen Häfen vorgeschrieben, jedoch nicht auf offener See.

Ein Giftstoff in der Abluft von Kohlekraftwerken wurde in den Industrieländern lange Zeit nicht ausreichend streng reguliert: Quecksilber, ein giftiges Schwermetall, das unter anderem die Zunahme von Intelligenzminderungen bei Kindern verursacht¹² [ClientEarth 2020]. Es ist in geringen Beimengungen in Kohle enthalten und wird bei der Verbrennung nur unvollständig herausgefiltert. Das Minamata-Übereinkommen (siehe Kasten 1 in Kapitel 1) fordert Maßnahmen zur Minderung dieser Emissionen, die insgesamt größer sind als alle anderen Eintragswege von Quecksilber in die Umwelt. Die Umweltverbände fordern die Etablierung eines Grenzwertes von 1 µg/Nm³ Abgas [NABU et al. 2017]. Die einfachste Möglichkeit zur Vermeidung solcher Emissionen liegt auf der Hand: Verzicht auf die Energiegewinnung durch das Verbrennen von Kohle.

Toxische Abwässer und Abfälle gefährden die Biosphäre

Bei industriellen Prozessen und auch, wenn Chemikalien in Haushalten und Gewerbe verwendet werden, entsteht Abwasser, das häufig gefährliche Stoffe enthält. 80% des globalen Abwassers gelangen ungereinigt in die Gewässer, meist in die Flüsse [IPBES 2019]. Zahlreiche Stoffe im Abwasser können aber auch durch Kläranlagen nicht oder nur unvollständig herausgefiltert werden. Ein Beispiel hierfür sind zahlreiche Wirkstoffe von Arzneimitteln, die überwiegend durch menschliche Ausscheidungen in Gewässer gelangen [BUND 2020a]. Abwasser enthält in der Regel zahlreiche Chemikalien, sodass bei der Beurteilung der Wirkungen auf aquatische Lebensgemeinschaften auch Kombinationseffekte zu berücksichtigen sind.

¹¹ In Deutschland: u.a. über die 17. BImSchV (Bundesimmissionschutzverordnung)

¹² Quecksilber ist besonders schädlich, weil es selbst in geringen Mengen einen langdauernden neurotoxischen Effekt auf das sich entwickelnde Gehirn (Nervenzellen) von Ungeborenen und Kindern hat [Ceccatelli et al. 2013]. Eine Beeinträchtigung der intellektuellen Entwicklung durch Quecksilber [Surkan et al. 2009] ist schon lange nachgewiesen. Selbst wenn der Schaden für den Einzelnen gering wäre (wenige IQ-Punkte), steigt die volkswirtschaftliche Bedeutung erheblich durch die großflächige Verteilung von Quecksilber, d. h. die Vielzahl der betroffenen Personen [Bellinger et al. 2018]. Darüber hinaus besteht aufgrund der epigenetischen (genverändernden) Wirkung [Culbreth & Aschner 2019] von Methylquecksilber – (das in der Umwelt als Transformationsprodukt entsteht) – der begründete Verdacht einer Generationen übergreifenden Übertragung/Vererbung: Dabei erleiden nachfolgende Generationen die negativen Effekte auf das Gehirn auch, ohne selbst jemals Quecksilber ausgesetzt gewesen zu sein. Daraus ergibt sich die Forderung, bei allen Kohlekraftwerken, die Quecksilber emittieren, umgehend die bestmögliche Filtertechnik anzuwenden.

Für einige Chemikalien sind in der EU oder auf nationaler Ebene Umweltqualitätsnormen (UQN) für Oberflächengewässer festgeschrieben [EU 2013]. Bei der Ableitung der UQN sind die ökotoxischen Wirkungen der betrachteten Stoffe auf Wasserorganismen maßgeblich. Die Konzentrationen dieser Stoffe in Gewässern werden gemessen, und bei Überschreitung sollen Reduktionsmaßnahmen ergriffen werden. Auch einige Arzneimittelwirkstoffe werden hier diskutiert und sind in einer so genannten Beobachtungsliste aufgeführt [EU-Kommission 2020a].

Über die Flüsse, aber auch durch direkte Einleitungen, gelangen toxische Stoffe auch in die Meeresumwelt und finden sich dort in teilweise bedenklichen Schadstoffkonzentrationen [OSPAR 2019].

Eine Reduktion der Gewässerbelastung durch toxische Abwässer lässt sich durch Substitution problematischer, insbesondere persistenter Schadstoffe, Minderungsmaßnahmen an der Quelle und den weiteren Ausbau der Kläranlagen durch eine 4. Reinigungsstufe erreichen.

Eine weitere Belastung entsteht durch Abfälle: Der Mensch entledigt sich der Stoffe und Produkte, die er nicht mehr verwenden kann oder will, indem er sie wegwirft. Sie werden zu Abfall. Lassen sich diese Produkte nicht wiederverwenden oder stofflich recyceln (siehe Kapitel 3), sind sie zu verbrennen oder zu deponieren. Die Abfall-Rahmenrichtlinie der EU regelt auch den Umgang mit gefährlichen Abfällen [EU 2018], von denen eine Gefahr für die belebte Umwelt ausgehen kann. Trotz EU-Abfallrecht und der internationalen Basel-Konvention (siehe Kasten 1 in Kapitel 1) werden erhebliche Mengen Elektro- und Elektronikschrott, die gefährliche Stoffe wie Schwermetalle und bromierte Flammschutzmittel enthalten, illegal in Ländern des Südens entsorgt. Dort werden unter gesundheits- und umweltschädlichen Bedingungen einige wertvolle Metalle zurückgewonnen [NABU 2019].

Plastik bedroht die Biosphäre

Die Biosphäre wird nicht nur durch giftige Stoffe belastet. Plastik ist meist nicht toxisch, aber extrem

Kasten 8

Zusatzstoff in Autoreifen gefährdet Silberlachse

Dem Kautschuk von Fahrzeugreifen und anderen Gummiprodukten wird üblicherweise ein Antioxidans beigemischt. Diese Substanz soll eine Zerstörung der Kunststoffmatrix durch Ozon verhindern. Verbreitet ist das Antioxidans 6PPD¹³. Untersuchungen der Washington State University haben nun gezeigt, dass Reifenabrieb von Straßen in die Flüsse und Bäche geschwemmt wird und dann toxische Stoffe freisetzt, was an der US-amerikanischen Westküste zum Zusammenbruch von Silberlachs-Populationen (*Oncorhynchus kisutch*) führen kann. Als ursächlich für die Vergiftungen wurde das Oxidationsprodukt 6PPD-Chinon identifiziert [Tian Z. et al. 2021].

Dringend erforderlich sind weitere Untersuchungen zu Vorkommen und Verbreitung dieses Oxidationsproduktes und seine ökotoxikologischen Eigenschaften. Es ist wahrscheinlich, dass der Stoff auch gegenüber anderen Fischen und Wasserorganismen giftig ist. Der Fall zeigt eine gravierende Lücke in den EU-Chemikalienverordnungen REACH und CLP auf. Untersucht und eingestuft werden Ausgangskemikalien (hier: 6PPD). Bei bestimmungsgemäßem Gebrauch soll es mit Ozon reagieren und das Chinon als Folgeprodukt bilden. In solchen Fällen müssen Untersuchungen auch zeigen, dass diese Folgeprodukte sicher sind und nicht Umwelt und Gesundheit gefährden.

persistent. Einmal in die Umwelt eingetragen, kann es kaum mehr zurückgeholt werden, schon gar nicht, wenn es Produkten als Mikroplastik zugesetzt wurde oder sich als Abrieb von Plastikartikeln, Textilien oder Fahrzeugreifen in der Umwelt verbreitet. Vor allem in Ländern ohne funktionierende Abfallwirtschaft landen Plastikabfälle in der Umwelt und gelangen über Flüsse letztlich in die Ozeane.

Meeresorganismen, insbesondere Planktonfresser, nehmen die Partikel auf, können sie nicht verdauen und verhungern mit gefüllten Mägen. Über das Nahrungsnetz gelangen sie dann auch in höhere Organismen wie Fische und Meeressäuger und darüber hinaus in

¹³ N-1,3-dimethylbutyl- N'-phenyl-p-phenylendiamin



Abbildung 15: Plastikmüll am tropischen Meeresstrand
© iStock.com/narvikk

den menschlichen Körper. Auch Böden (über Komposte, Gärreste und Klärschlamm), Flüsse und Seen enthalten heute ubiquitär Plastikreste [UBA 2021]. Plastik ist überall. Die Verschmutzung der Meere mit Mikro- und Makroplastik ist eine existenzielle Bedrohung der Meeresumwelt (Abb. 15).

Die großen Mengen in Kombination mit ihrer schweren Abbaubarkeit machen Kunststoffe zu einem der heute drängendsten globalen Umweltprobleme. Zudem stellen oft giftige Beimengungen in Kunststoffen, wie Weichmacher, Antioxidantien, UV-Stabilisatoren und Flammschutzmittel ein ernstes Umweltproblem dar [BUND 2019b]. Kunststoffteile in der Umwelt können zudem Schadstoffe aus der wässrigen Umgebung aufnehmen, anreichern und in die Körper von Lebewesen transportieren.

Aus der EU wurden nicht verwertete Plastikabfälle bis vor kurzem in großem Umfang zur Verwertung vorwiegend in asiatische Länder exportiert (siehe Kapitel 3). Die Verwertung dort ist oft unzureichend und führt zu erheblichen Umweltbelastungen. Allerdings lassen

einige dieser Länder – insbesondere China – inzwischen den Import aus Europa und Nordamerika nicht mehr zu, was zu einer verstärkten Verbrennung der Abfälle führt. Die Beschlüsse der Basel-Konvention vom 10. Mai 2019 [UNEP 2019b], dass nur noch sortenreine, unverschmutzte Kunststoffabfälle künftig ohne Genehmigung zur Wiederverwertung exportiert werden dürfen, sind zu begrüßen und konsequent umzusetzen.

Das Verursacherprinzip sowie das Näheprinzip der Kreislaufwirtschaft erfordern, Abfallexporte auf ein Minimum zu senken. Sie sollten nur in Länder ausgeführt werden, die nachweislich mindestens die Entsorgungs- und Recyclingstandards der EU einhalten.

Invasive Arten und Welthandel

Ein wichtiger Treiber für die Bedrohung der Biodiversität sind invasive Arten. Diese sind Organismen, die aus anderen Teilen der Welt verschleppt oder eingeführt werden, neue Lebensräume besiedeln und die dort heimischen Arten verdrängen können (Neobiota) [Settele 2020]. Sehr oft sind es Verkehrsmittel, die diese Ausbreitung verursachen. Im Laderaum von

Handelsschiffen reisen viele Organismen wie Termiten oder Spinnen als „blinde Passagiere“ mit; Holz aus China hat den Asiatischen Laubholzbockkäfer eingeschleppt [Lfl 2021]; Lastkraftwagen überwinden mit ihrer Ladung oder ihren Reifenprofilen natürliche Barrieren wie die Alpen und bringen die asiatische Tigermücke nach Mitteleuropa. Das Ballastwasser von Seeschiffen ist voller gebietsfremder Organismen, so dass es nach dem Ballastwasser-Übereinkommen für die internationale Seeschifffahrt zu desinfizieren ist. Dieses Abkommen wurde 2004 verabschiedet und ist seit 2017 in Kraft [IMO 2020]. Finden die eingeschleppten Organismen am Zielort günstige Bedingungen, können sie sich dort etablieren und vermehren. Die Zunahme der globalen Stoffströme begünstigt somit die Ausbreitung nichtheimischer Tiere und Pflanzen. Unter den Organismen, die auf diese Weise verbreitet werden, befinden sich auch Mücken und andere Organismen, die Krankheiten, sogenannte Zoonosen, übertragen können.

Anbau nachwachsender Rohstoffe

Der Ersatz fossiler Rohstoffe durch nachwachsende

Rohstoffe erscheint vielen als Königsweg zur Nachhaltigkeit, zur Bewältigung der Klimakrise und zur Minderung stofflicher Risiken für die Biodiversität. Die Nachfrage nach Biomasse aus der Natur hat in der jüngsten Vergangenheit erheblich zugenommen [IPBES 2019]. Biologische Rohstoffe sind zwar ein wichtiger Ansatz für eine klimaneutrale Wirtschaft. Dieser Ansatz hat jedoch deutliche Grenzen (siehe Kapitel 3). Nachwachsende Rohstoffe können ohnehin nur in sehr begrenztem Umfang fossile Rohstoffe ersetzen. Auch Holz – im Baubereich eine erwünschte Alternative zu Beton – ist eine begrenzte Ressource, zumal aus Sicht des Naturschutzes mehr ungenutzte, naturnahe Wälder wünschenswert sind.

Bedenklich ist die zunehmende Konkurrenz um Flächen: Werden Energiepflanzen in immer stärkeren Maße angebaut, verdrängen diese damit Anbauflächen für lebensmittelliefernde Nutzpflanzen [Priefer et al. 2017]. Bei einigen, in Europa vermehrt angebauten Energiepflanzen wie Silphie oder Miscanthus existiert noch keine angestammte Begleitflora. Somit führt deren Anbau zu weiterer Artenverarmung. Zunehmend



Abbildung 16: Ölpalmenplantage in Indonesien
© iStock.com/adiartana

werden nachwachsende Rohstoffe aus den Ländern des Südens importiert, wofür dort oft großflächig Naturräume zerstört werden (Abb. 16). Die Rodung von Urwäldern hat gravierende ökologische Schäden zur Folge, wie Auslaugung der Böden, Schädigung des Wasserhaushalts, und führt darüber hinaus auch zur Freisetzung von Treibhausgasen infolge der Degradation der Böden, so dass die Klimabilanz negativ ist.

Aber auch in Europa hat die Zunahme des Anbaus von Biomasse Folgen: Brachflächen, die ein wichtiges Rückzugsgebiet für bedrohte Tierarten und Pflanzen waren, wurden wieder unter den Pflug genommen. Waren Ende der 1990er Jahre rund 10% der Agrarflächen in Deutschland stillgelegt, so sind es heute nur noch 2 bis 3% [Leopoldina 2020].

Auch hier gilt: Am Verringern und Verlangsamen von Stoffströmen führt kein Weg vorbei. Unser Konsum und unsere Lebensstile müssen sich den planetaren Grenzen (siehe Kapitel 2) anpassen.

Pestizide und Düngemittel

„Die eigentlichen Emissionen der chemischen Industrie ... sind ... die Produkte selbst.“ Dieses Zitat von Eberhard Weise, einem ehemaligen Vorstandsmitglied der Bayer AG, zeigt, dass die Produkte, die gewollt in die Umwelt eingetragen werden, diese belasten und auch die Biodiversität bedrohen können [Held 1991]. Dies gilt in besonderem Maße für agrarische Pestizide, Biozide und Düngemittel.

Die Landwirtschaft ist einer der wichtigsten Treiber des Artenrückgangs [Leopoldina 2020]. Ursache ist die Form der industriellen Bewirtschaftung, der zum Beispiel Feldraine zum Opfer fallen. Die moderne Landwirtschaft basiert auch auf dem intensiven und flächendeckenden Einsatz von Pestiziden und Düngemitteln (Abb. 17). So schädigen insbesondere die insektiziden Neonicotinoide die biologische Vielfalt auf und um die Äcker. Im Vergleich zu 1995 hat in Deutschland die Menge an ausgebrachten Pestizidwirkstoffen in der Landwirtschaft zwar nicht zugenommen – sie liegt bei ca. 30.000 t jährlich –, jedoch

sind die heutigen Wirkstoffe um ein Vielfaches wirksamer als damals [Leopoldina 2020]. Zusätzlich ist zu bedenken, dass die behandelten Flächen wegen des zunehmenden Ökoanbaus tendenziell rückläufig sind [BÖLW 2020].

Es geht aber nicht nur um die direkten toxischen Wirkungen gegenüber Zielorganismen. Maßgeblich sind auch indirekte Wirkungen: Beispielsweise eliminieren Herbizide wie Glyphosat Wildkräuter, die dann den Bestäuberinsekten fehlen [Klinger 2017, Leopoldina 2018]. Nahrungsnetze werden unterbrochen; Tiere verhungern an einem scheinbar reich gedeckten Tisch. Die Situation verschärft sich beim Anbau herbizid-resistenter Kulturpflanzen, wodurch sich die Einsatzmengen pro Fläche vergrößern, Fruchtwechsel vermieden werden und sich resistente Wildkräuter entwickeln [Schütte et al. 2017].

Auch Düngemittel vermindern die Agrarbiodiversität [Meyer et al. 2014]. Flächendeckend sind vor allem die Stickstoffgehalte der Böden infolge der Ausbringung von Gülle und Mineräldünger sehr hoch. Dies betrifft auch Grünland, das nur noch in geringem Maße für die Weidehaltung genutzt wird. Dank intensiver Düngung weist es eine immer geringere Diversität der unterschiedlichen Typen von Grünland auf [Gilhaus et al. 2017]. Die nährstoffreiche, artenarme Einheitswiese wird zur Norm. Vor allem Pflanzen mit hohem Nährstoffbedarf wie Brennnessel und Giersch breiten sich aus.

Die für den Lebensraum Acker wichtige Begleitflora verschwindet. Dies ist eine wesentliche Ursache für den dramatischen Rückgang der Fluginsekten und in Folge auch der Vögel in Agrarökosystemen [Lemoine 2007]. Säugetiere wie Feldhase oder Feldhamster und Vögel wie Rebhuhn, Feldlerche oder Goldammer zählen zu den vom Aussterben bedrohten Tierarten. Das Verschwinden vieler Tiere, Pflanzen und Mikroorganismen aus Agrarökosystemen führt zu einer Verringerung der Ökosystemleistungen und gefährdet damit die dauerhafte Stabilität von Agrarlandschaften.

Auch die Vielfalt des Bodenlebens wird durch die intensive Bewirtschaftung und den Einsatz chemischer Produkte stark beeinträchtigt [KBU 2020]. Die industrielle Landwirtschaft führt auch zu einer Auslaugung der Böden. Der Gehalt an gebundenem organischem Kohlenstoff, unter anderem als Humus, nimmt ab, und der Boden degradiert.

Immer offensichtlicher wird, dass Pestizide auch auf bakterielle Lebensgemeinschaften (Mikrobiome) wirken. Insektizide und insbesondere auch das verbreitete Herbizid Glyphosat schädigen die Darmmikroflora von Säugetieren und bestäubenden Insekten wie Bienen [Mesnage et al. 2019 und 2021, Motta et al. 2018, Syromiatnikov et al. 2020]: Die Zusammensetzung der Bakterienflora ändert sich, die Immunität gegenüber Krankheitserregern nimmt ab und Reproduktion und Verhalten der Wirtstiere ändern sich. Auch die mikrobielle Vielfalt im Boden wird durch Pestizide (Herbizide, Fungizide, Insektizide) negativ beeinflusst [Meena et al. 2020]. Die Bodenfruchtbarkeit und die Vielfalt höherer Bodenorganismen nehmen ab.

Die intensive Landwirtschaft verringert nicht nur die Vielfalt der Pflanzen- und Tierarten in Agrarräumen. Auch die Vielfalt der angebauten Pflanzensorten nimmt stetig ab. Wenige Hochleistungssorten der Kulturpflanzen dominieren zunehmend die Ackerflächen. Die Landwirt*innen können aus Hybrid-Saatgut meist kein eigenes Saatgut gewinnen, sondern müssen jedes Jahr neues Saatgut kaufen. Die agrarökologische Anpassung an örtliche und regionale Anbaubedingungen nimmt ab. Die Sorten haben meist einen hohen Nährstoffbedarf, sind empfindlich gegenüber Schadorganismen und empfänglich für Pflanzenkrankheiten. Hoher Dünger- und Pestizideinsatz sind die Folgen.

Hormonaktive Stoffe und Infochemikalien

Besonders tückisch wirken sich hormonell wirkende Stoffe auf Ökosysteme aus. Die endokrine Disruptoren (ED) genannten Stoffe beeinflussen bereits bei niedrigen Konzentrationen das Hormonsystem von Menschen und Tieren. Sie simulieren oder blockieren Hormone (vor allem die Sexualhormone und das Schilddrüsenhormon) oder ändern Bildung, Transport



Abbildung 17: Ausbringung von Mineraldünger
© iStock.com/fotokostic

und Abbau natürlicher Hormone [WHO 2012]. Zahlreiche Industriechemikalien und Pestizide wirken auf diese Weise. Endokrine Disruptoren, die wie Geschlechtshormone wirken, können beim Menschen das Hormongleichgewicht von Ungeborenen in der Frühschwangerschaft verändern und so zu Störungen der Entwicklung der Geschlechtsorgane bis hin zur Begünstigung von Brust- oder Prostatakrebs beitragen. Auch Hormone als Arzneimittel werden über die Ausscheidungen in die Umwelt emittiert [BUND 2020a]. Endokrine Disruptoren bedrohen nicht nur die menschliche Gesundheit, sondern können auch natürliche Lebensgemeinschaften schädigen. Beispielsweise wird das Geschlechterverhältnis von Fischen in belasteten Gewässern zugunsten weiblicher Tiere verändert. Fortpflanzung und Entwicklung sowohl von Wirbeltieren als auch von Wirbellosen werden beeinflusst [Mathiesen et al. 2016].

Hormone sind Botenstoffe innerhalb eines Organismus. Auch zwischen Lebewesen werden in der Natur Informationen durch Stoffe ausgetauscht. Organismen wie Insekten und Pflanzen informieren sich mittels chemischer Substanzen gegenseitig über Futterquellen und Fraßfeinde. Insekten senden Sexuallockstoffe (Pheromone) aus. Andere Chemikalien beeinflussen das Schwarmverhalten von Fischen und Heuschrecken [Brönmark et al. 2000]. Solche chemischen Substanzen werden Infochemikalien genannt und spielen bei den meisten Lebewesen eine entscheidende Rolle für lebenswichtige Prozesse wie Fortpflanzung, Sozialverhalten, Nahrungsaufnahme, Verteidigung oder Orientierung. Manche Duftstoffe in Kosmetika oder Wasch- und Reinigungsmitteln besitzen Strukturen, die denen natürlicher Infochemikalien sehr ähneln [Nendza et al. 2009]. Erste Hinweise zeigen, dass einige synthetische Chemikalien derartige Informationen simulieren oder unterdrücken können [Berghahn et al. 2012]. Sogar von Stoffen, die in Plastikabfällen vorhanden sind, werden derartige Effekte beobachtet [Pfaller et al. 2020, Trotter et al. 2018]. Anthropogene Infochemikalien sind damit potenzielle Störfaktoren in einem hochsensiblen System des Zusammenlebens von Tier-

und Pflanzenarten [Klaschka, 2009a und 2009b]. So beeinträchtigen einige Neuropharmaka das Schwarmverhalten von Fischen oder Pestizide den Orientierungssinn von Honigbienen.

Verringerte stoffliche Vielfalt

Stoffliche Belastungen bedrohen die biologische Vielfalt. Umgekehrt entstehen durch den Artenrückgang auch Probleme: Für den Menschen wichtige Ökosystemleistungen wie die Bestäubung sind gefährdet. Weiterhin gehen viele genetische Ressourcen, deren Schutz im Nagoya-Protokoll 2010 international vertraglich geregelt ist (siehe Kasten 1, Kapitel 1), verloren und damit natürliche Wirkstoffe. Dies bedeutet einen unwiederbringlichen Verlust für die chemische Vielfalt. Zahlreiche Pflanzeninhaltsstoffe mit pharmakologischer Wirkung sind noch nicht entdeckt. Das komplexe, artenreiche Ökosystem der Korallenriffe und die tropischen Regenwälder enthalten zahllose, noch unbekannte Substanzen und Botenstoffe, die wichtig für Pharmaka, Pflanzenschutz oder auch technische Anwendungen werden können. Diese genetischen Ressourcen gilt es zu erhalten, um Optionen für geeignete, umweltverträgliche Lösungen nicht zu verlieren [CBD 2010].

6. Nachhaltige Chemie schützt Klima und biologische Vielfalt

Stoffpolitisch bedeutet Nachhaltigkeit, auf regenerierbarer Basis zu arbeiten und Vorsorge walten zu lassen. Es geht vor allem darum, irreversible Beeinträchtigungen der Ökosysteme zu vermeiden. Dies bedeutet, dass

- Regenerierbarkeit und Recycling (Wiederverwendung und -verwertung) von Anfang an mitgedacht werden;
- chemische Produkte keine gefährlichen Eigenschaften haben sollten, die Umwelt und Gesundheit belasten;
- die chemische Produktion so gestaltet werden muss, dass sie keine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt und in Bezug auf Energie- und Ressourcenverbrauch effizient ist;
- Stoffströme so gemanagt werden, dass sie die planetaren Grenzen nicht überschreiten und ökologischen Kriterien genügen.

Nachhaltige Chemie betrifft sowohl die wissenschaftliche Disziplin der Chemie als auch Chemie als ökonomischen Sektor. Sie bezieht die zwölf Prinzipien der „Green Chemistry“ von Anastas und Warner als wissenschaftliche Kriterien mit ein [Anastas und Warner 1998] und betrachtet darüber hinaus die Funktion, die chemische Stoffe erfüllen sollen, sowie soziale, ökonomische und ethische Aspekte [Kümmerer 2012]. Das internationale Kollaborationszentrum für nachhaltige Chemie (ISC3) hat die zentralen Charakteristika der nachhaltigen Chemie in einem Dialogpapier dargestellt [ISC3 2020].

Viele Funktionen lassen sich auch ohne den Einsatz synthetischer Chemikalien erfüllen. Die Prüfung, ob nicht-chemische Alternativen nachhaltiger sind, steht deshalb am Anfang. Allerdings ist eine „chemiefreie“ Welt nicht mehr denkbar und wäre auch nicht nachhaltig. Ohne Chemie lassen sich viele Nachhaltigkeitsziele (SDG) der Vereinten Nationen nicht erreichen [UNO 2015]; – man denke nur an die Notwendigkeit von Arznei- und Desinfektionsmitteln zur Eindämmung von Krankheiten.

Nachhaltige Chemikalien

Chemikalien, denen der Mensch oder die Umwelt ausgesetzt sein können, sollen möglichst keine gefährlichen Eigenschaften besitzen. Insbesondere sollen sie nicht persistent sein, sich nicht langfristig anreichern und keine eventuell noch unerkannten, schädlichen Wirkungen, die irreversibel sind, auslösen. Sie sollen „benign by design“ sein [Kümmerer 2015], also von der Struktur gesehen gutartig, und zeitlich und räumlich eine kurze Reichweite haben („short range chemicals“) [Scheringer 2002]. Manche Gefährlichkeitsmerkmale sind unverzichtbar mit der Funktion verbunden. Zum Beispiel müssen Treibstoffe brennbar oder Desinfektionsmittel giftig sein. Jedoch sind gefährliche Eigenschaften ohne Funktion prinzipiell vermeidbar!

Zur Beurteilung, wie nachhaltig eine Chemikalie ist, gehören weitere Kriterien wie der Ressourcenverbrauch bei der Gewinnung und Herstellung, die stoffliche und ökologische Eignung für die Einsatzbereiche, die Möglichkeit der Wiederverwendung und -verwertung (Recycling) oder der Kompostierung und das Verhalten in der Abfallphase. Das Umweltbundesamt hat mit einem „Leitfaden Nachhaltige Chemikalien“ eine Entscheidungshilfe publiziert [UBA 2016]. Dabei kann die Nachhaltigkeit einer Chemikalie regional unterschiedlich beantwortet werden: In Ländern ohne Abfall- und Abwasserbehandlung nach dem Stand der Technik lassen sich zum Beispiel Organohalogenverbindungen wie chlorierte Lösungsmittel in Produkten sicher nicht nachhaltig verwenden.

Entscheidend für die Beurteilung der Nachhaltigkeit sind nicht allein stoffliche Eigenschaften, sondern auch die Funktion, die eine Chemikalie erfüllen soll [Anastas und Zimmerman 2018, Kümmerer 2017]. Nachhaltige Chemie betrachtet die Anwendung von Chemikalien in unterschiedlichen Produkten und Produktionen und auch den Service, den eine Chemikalie leisten soll (Chemie für was und für wen?).

Das Geschäftsmodell Chemikalienleasing ist ein Beispiel dafür, wie der Chemikalieneinsatz bedarfsgerecht gesenkt und dadurch Gefährdungen vermieden werden können [UNIDO 2018]. Bei diesem „Chemical Leasing“ stellt ein Chemieunternehmen einen Stoff oder ein Gemisch für einen bestimmten Zweck zur Verfügung, bleibt aber weiterhin sein Eigentümer und übernimmt danach die Verantwortung für die Entsorgung. Je nach den Erfordernissen und dem Nutzen eines Produktes ergeben sich daraus unterschiedliche Anforderungen an die jeweilig verwendeten Chemikalien. Der Nutzen eines Stoffes im gesamten Produktlebenszyklus sollte so weit wie möglich optimiert und gleichzeitig mögliche Schäden vermieden werden.

Nachhaltige Chemieproduktion

Chemische Stoffe sollten in einer Weise hergestellt werden, die den Nachhaltigkeitskriterien genügt. Dies bedeutet unter anderem eine hohe Energie- und Ressourceneffizienz, eine wirksame Reinigung von Abwasser und Abluft, ein geringes Abfallaufkommen und inhärent sichere Produktionsverfahren¹⁴. Dies erfordert, heutige Produktionsweisen innovativ zu verändern: zum Beispiel Umstellung der Rohstoffbasis, biotechnische und (neue) katalytische Verfahren, Einsatz von Mikroreaktoren, Umstellung auf Synthesen bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck [UBA 2009]. Wichtig für eine rasche und nachhaltige Umstellung der Produktion wäre, Betriebsgenehmigungen nicht mehr unbefristet zu erteilen, sondern die Anlagen rasch dem Stand der Technik anzupassen.

Nachhaltiges Stoffstrommanagement

In der aktualisierten deutschen Nachhaltigkeitsstrategie nennt die Bundesregierung zum Management von Ressourcen unter anderem folgende Managementregeln [Bundesregierung 2016]:

- „Erneuerbare Naturgüter (wie die Wälder oder die Fischbestände) dürfen auf Dauer nur im Rahmen ihrer Fähigkeit zur Regeneration genutzt werden. Nicht erneuerbare Naturgüter (wie z. B. mineralische

Rohstoffe oder fossile Energieträger) dürfen auf Dauer nur in dem Umfang genutzt werden, wie ihre Funktionen durch andere Materialien oder durch andere Energieträger ersetzt werden können. Die Freisetzung von Stoffen darf auf Dauer nicht größer sein als die Anpassungsfähigkeit der natürlichen Systeme – z. B. des Klimas, der Wälder und der Ozeane.

- Energie- und Ressourcenverbrauch sowie die Verkehrsleistung müssen vom Wirtschaftswachstum entkoppelt werden.

Diese sehr allgemein formulierten Regeln lassen sich durch drei strategische Ansätze konkretisieren, die einander ergänzen: Effizienz, Konsistenz und Suffizienz (siehe Kasten 9) [relaio 2018].

Kasten 9a

Die drei Strategien für ein nachhaltiges Stoffstrommanagement

- Die **Effizienz**-Strategie setzt darauf, Materialien und Energie schonend und möglichst langfristig zu nutzen. Staatliche Beratung für Unternehmen [z. B. Effizienzagentur 2020], Forschungsförderung [z. B. BMU 2020] und Normen (wie die VDI-Richtlinie 4605 [VDI 2017]) treiben die Ressourceneffizienz bei Gewinnung und Verarbeitung von Ressourcen voran. Das heißt: Der spezifische Ressourcenverbrauch bezogen auf die Wertschöpfung sinkt. Diese Entkopplung von Ressourcenverbrauch und Bruttoinlandsprodukt (BIP) hat jedoch nur geringen Einfluss auf den Konsum, der in vielen Bereichen zur Vergrößerung beziehungsweise Beschleunigung von Stoffströmen beiträgt. Miniaturisierung und Einsparung teurer Ressourcen können sogar einen „Rebound-Effekt“ hervorrufen [Deutscher Bundestag 2014].

¹⁴ Das Konzept der inhärenten Sicherheit will Gefahren in einem Produktionsprozess bereits an der Quelle vermeiden. Im Idealfall bedeutet dies z. B., dass eine Anlage bei einer Prozessstörung automatisch in einen sicheren Zustand fährt.

Kasten 9b

- Die **Konsistenz**-Strategie zielt darauf, natürliche Systeme und technische Prozesse zusammenzuführen. Hierzu zählen Ansätze, industrielle Tätigkeiten im Sinne natürlicher Produktions- und Destruktionskreisläufe zu verknüpfen („Industrial Ecology“ [Ayres and Ayres 2002]). Dem Konsistenzprinzip folgen auch Konstruktionen, die aus Modulen oder Materialien bestehen, die unverändert an anderer Stelle wiederverwendet werden können, ebenso wie das Herstellen von Stoffen, die sich an natürlichen Vorbildern orientieren, oder die konstruktive oder funktionale natürliche Strukturen nachahmen (Bionik). Ein weiterer Aspekt dieser Strategie ist das Wiedergewinnen (sekundärer) Rohstoffe durch ein möglichst hochwertiges Recycling von Produkten (siehe Kapitel 3). Eine „Circular Economy“ setzt neben der Kreislaufführung und einer ressourceneffizienten Produktion auf höhere Haltbarkeit, Reparierbarkeit und mehrfache Nutzung von Produkten. Ansätze nachhaltiger Chemie sind hier besonders gefragt [Kümmerer et al. 2020]. Allerdings stößt man hierbei ebenso auf Grenzen wie beim Effizienzprinzip, auch wenn dies häufig unterschlagen wird (z.B. im Cradle to Cradle – C2C-Ansatz: Hierbei wird eine vollständige technische Rückführung oder Überführung von Produkten in biologische Kreisläufe angestrebt [Lovins et al. 2014]).
- Die **Suffizienz**-Strategie stellt die Frage nach dem Genug. Konkret bedeutet dies, bewusst auf den (nicht rückholbaren) Verbrauch von Ressourcen zu verzichten. Übersetzt man diese Strategie mit „Genügsamkeit“, dann ist so etwas in Konsumgesellschaften verpönt, weil dies nach Mangel und Askese klingt [Weber-Blaschke 2009]. Suffizienz bedeutet jedoch nicht asketischer Verzicht, sondern stellt die Frage nach dem rechten Maß und dem bewussteren Umgang mit begrenzten Ressourcen, oder vereinfacht ausgedrückt: Oft ist weniger mehr [BUND 2017, Sachs 1993].

Die Grundregeln des nachhaltigen Managements von Stoffströmen müssen daher neben der Effizienz- und Konsistenz-Strategie, die sich wechselseitig ergänzen, auch den Suffizienz-Ansatz umfassen. Dies gilt insbesondere angesichts der Endlichkeit nicht erneuerbarer Ressourcen, insbesondere von seltenen Mineralien oder Metallen.

Schritte in Richtung deutlich höherer Effizienz und Konsistenz sind sozial und wirtschaftlich verträglich umsetzbar und weitgehend unumstritten. Entsprechende Optimierungen von Wertschöpfungsketten oder Geschäftsmodellen belegen dies in der Praxis. Für eine höhere Akzeptanz und einen Durchbruch des Suffizienzprinzips bedarf es eines wachsenden Bewusstseins der Endlichkeit der Ressourcen, neuer Leitbilder für Wohlstand und Wachstum, eines gesetzlichen Rahmens und damit einer Abkehr vom ökonomischen Wachstumsmodell. Doch ohne wirksame Suffizienzstrategien werden wir diese nicht erreichen.

Neben der Qualität (Substitution) und Quantität (Reduktion) von Stoffströmen geht es schließlich auch um die Frage, ob die Kreisläufe der Techno- und der Ökosphäre zueinander offen oder geschlossen sind. Bei leicht abbaubaren, kompostierbaren Stoffen ist eine Öffnung technischer Kreisläufe gegenüber den globalen biogeochemischen Kreisläufen und den regionalen ökologischen Kreisläufen möglich. Demgegenüber sind persistente Stoffe, Gift- oder Nährstoffe, die natürliche Stoffkreisläufe stören und in der Natur nichts zu suchen haben, gegenüber der Ökosphäre abzuschließen (siehe Abb. 18).

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft fokussiert vor allem auf Kreisläufe innerhalb der Technosphäre. Dabei ist anzustreben, dass Produkte, die aus chemischen Stoffen hergestellt sind, möglichst lange Produktlebensdauern haben. Sie sollten für Wieder- und Weiterverwendung, Reparatur und ein hochwertiges Recycling geeignet sein. Regionale Stoffströme sollten konsequent Vorrang gegenüber globalen Materialströmen haben.

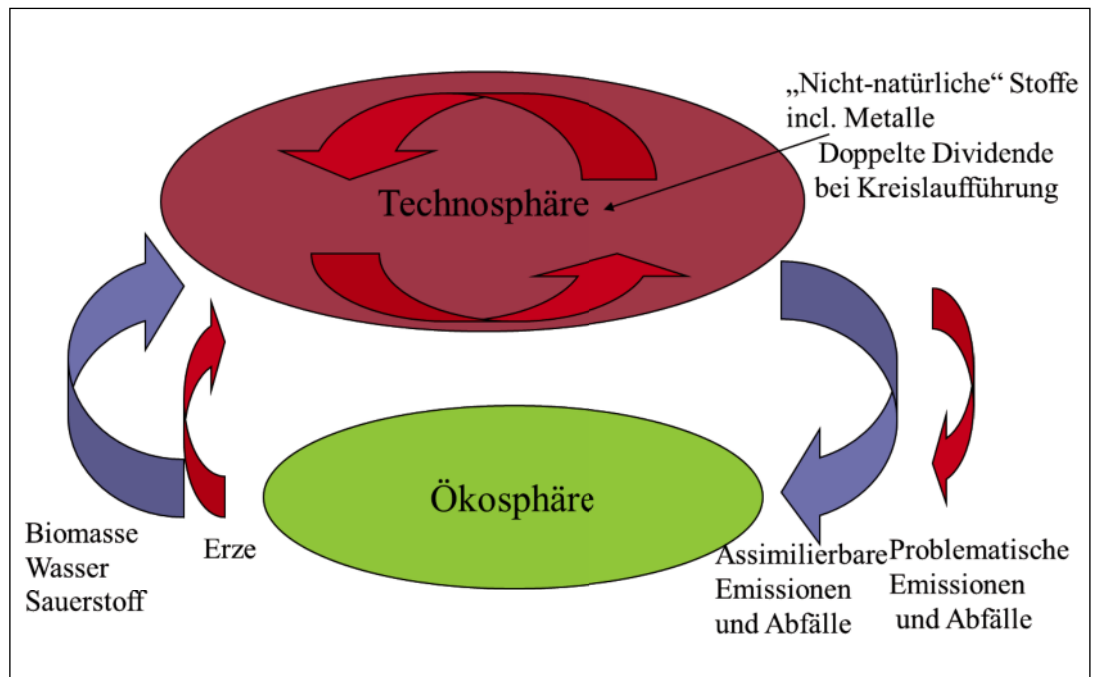


Abbildung 18: Öffnen und Schließen der Übergänge zwischen Öko- und Technosphäre

*Als „nicht natürlich“ werden hier Stoffe bezeichnet, die nicht schon auf natürlichem Wege in größeren Mengen in der Bio-/Geosphäre kreisen, also im Wesentlichen synthetische Stoffe sowie in den biogeochemischen Kreisläufen nur in geringen Mengen freigesetzte Elemente, wie z. B. viele (Schwer)Metalle: [Göbbling-Reisemann, von Gleich 2009]

Daraus folgen Anforderungen an das Produktdesign (wie Reparierbarkeit und Zerlegbarkeit) und eine möglichst einfache chemische Zusammensetzung, die einem hochwertigen Recycling nicht entgegensteht [Kümmerer et al. 2020]. Hierzu zählen der Verzicht auf Additive und die Verwendung von Monomaterialien. Die Hersteller sollten deshalb nicht nur für die Funktionsfähigkeit, sondern auch für die Kreislaufführung ihrer Stoffe verantwortlich sein.

Besonders zu beachten sind umweltoffene Anwendungen, also alle Chemikalien, die die Menschen wie Düngemittel, Insektizide, Arzneimittel oder Stoffe zur Beschichtung von Oberflächen bewusst und gezielt in die Umwelt einbringen, um bestimmte Wirkungen zu erzielen. Hier muss die Frage nach dem Nutzen, der Minimierung und der nicht-chemischen Alternativen noch deutlicher gestellt werden. Eine vollständige und rasche Mineralisierbarkeit ist dann Voraussetzung für eine nachhaltige Anwendung. Mögliche Auswirkungen

auf die biologische Vielfalt und das Klima müssen betrachtet und unter besonderer Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips bewertet werden.

Die größte Herausforderung des 21. Jahrhunderts ist, eine dauerhaft und global verträgliche Lebens- und Wirtschaftsweise zu erreichen. Eine nachhaltige Stoffpolitik kann und muss hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten, um die Klima- und Biodiversitätsziele zu erreichen. Es braucht einen am Gemeinwohl und den planetaren Grenzen orientierten sozial-ökologischen Umbau unserer Gesellschaft (Transformation). Eine Neuorientierung der Ressourcen- und Stoffpolitik ist ein zentraler Baustein dieses Prozesses. Ziel muss es sein, die Stoffströme insgesamt deutlich zu reduzieren. Vertiefende Informationen finden sich im Projekt Ressourcenwende [BUND 2020b]. Nachhaltiges Stoffstrommanagement erfordert somit nicht nur eine nachhaltige Chemie, sondern auch eine ökologische Ökonomie [Bringezu und Kümmerer 2012]. In dem

Review „The Economics of Biodiversity“ werden Wege, der Natur wieder einen ökonomischen Wert zuzusprechen und damit das nachhaltige Entwicklungsziel einer nachhaltigen Produktion und Konsums (SDG 12) zu erreichen, aufgezeigt [Dasgupta 2021]. Fundamentale Änderungen des Wirtschafts- und Finanzsystems, aber auch der Institutionen und der gesellschaftlichen Wertvorstellungen sind demnach notwendig, um die Natur wieder ins Gleichgewicht mit menschlichen Aktivitäten zu bringen.

7. Empfehlungen und Schlussfolgerungen

Dieses Hintergrundpapier verdeutlicht: Der Verlust an biologischer Vielfalt, der Klimawandel und die Überlastung des Planeten mit Stoffen sind eng miteinander verwoben. Alle drei globalen Herausforderungen müssen gemeinsam angegangen und gelöst werden. Dabei muss berücksichtigt werden, wie sich die drei Handlungsfelder gegenseitig beeinflussen.

Immer mehr zeigt sich: Die globalen Umweltprobleme sind Folgen einer natur- und umweltfeindlichen Wirtschaftsweise. Eine Abkehr vom ständig steigenden Verbrauch von Energie und Ressourcen ist dringend notwendig. Dies wird in der erforderlichen Größenordnung nicht allein durch eine Entkoppelung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch gelingen. Vielmehr braucht es einen Ansatz, der insbesondere in den Ländern des Nordens konsequente Suffizienz-Strategien beinhaltet. Ein ganzheitlicher Ansatz und eine Abkehr vom ständigen materiellen Wachstum sind erforderlich. Für die Länder des Südens bedarf es einer nachhaltigen Entwicklungsstrategie, die wirtschaftliche Teilhabe ermöglicht, ohne der Verschwendung von Energie und Ressourcen im Norden nachzueifern.

In einem Gesamtkonzept müssen drei Ansätze ineinandergreifen: einmal Effizienzstrategien, dann Konsistenzstrategien, also vor allem die Kreislaufführung von Stoffen und die Verwendung von Stoffen, die sich in die ökologischen Kreisläufe einfügen lassen, sowie Suffizienz-Strategien zum Verzicht auf übermäßige Nutzung von Ressourcen. Unter dem Stichwort Suffizienz wird nach dem Nutzen der Produkte gefragt, auch nach alternativen Produkten, nach Langlebigkeit und Reparaturfreundlichkeit sowie nach der drastischen Senkung der Energie- und Ressourcenverbräuche in Produktion und Verwendung.

Die Folgen eines übermäßigen Energie- und Ressourcenverbrauchs und der Verbreitung gefährlicher Stoffe sind nicht nur dramatische Klimaveränderungen und die zunehmende Erschöpfung nicht erneuerbarer Ressourcen. Die globalen Gefährdungen führen letztlich zu einem Verlust von Naturräumen und der biologischen Vielfalt und damit verbunden zu einer Gefahr für das menschliche (Über-)Leben.

Nachhaltige Biodiversitäts-, Klima- und Stoffpolitik sind demnach drei Säulen einer internationalen transformativen Politik. Die ersten beiden Politikfelder sind global durch internationale Rahmenkonventionen geregelt: durch das Paris-Übereinkommen für den Klimaschutz und das Übereinkommen über die biologische Vielfalt. Für den stofflichen Bereich fehlt bisher eine entsprechende globale Konvention. Ein rechtsverbindliches internationales Stoffrahmen-Übereinkommen ist dringend erforderlich. Dieses muss klar definierte Reduktionsziele für den Verbrauch an Chemikalien und Ressourcen ebenso wie eine Strategie für eine nachhaltige Entgiftung der Umwelt, Effizienzziele und Anforderungen an die Kreislaufführung und die Abfallbehandlung enthalten¹⁵.

Wichtig ist dabei, ein unabhängiges wissenschaftliches und zwischenstaatliches Begleitgremium zu schaffen – analog zum Weltklimarat IPCC bezüglich des Klimas und zum Weltrat zur biologischen Vielfalt IPBES. Zahlreiche prominente Wissenschaftler haben diesen Bedarf aufgezeigt [Wang et al. 2021] und deutlich gemacht, dass es wichtig ist, eine nachhaltige Stoffpolitik wissenschaftlich zu untermauern [Scheringer 2017]. Eventuell lässt sich das International Panel on Chemical Pollution (IPCP) zu einem derartigen wissenschaftlichen Impulsgeber ausbauen [IPCP 2019]. Dazu müssten jedoch die institutionelle Anbindung und die Sichtweise dieses Gremiums deutlich erweitert werden. Vorschläge und Forderungen dazu sind in der BUND Position 69 „Herausforderungen für eine nachhaltige Stoffpolitik“ [BUND 2019a] definiert.

Sowohl auf internationaler Ebene als auch im europäischen und nationalen Rahmen müssen die Wechselwirkungen zwischen Biodiversitäts-, Klima- und Stoffpolitik stärker berücksichtigt und angegangen werden. Ein internationaler Prozess muss auf allen Ebenen initiiert werden, der aufbauend auf den Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen einen gemeinsamen Handlungsrahmen definiert, der alle drei Politikfelder verknüpft und der konkrete Handlungsziele und -instrumente analog zur Agenda 21 der Weltkonferenz in Rio de Janeiro im Jahr 1992 erarbeitet. Die gravierenden globalen Umweltveränderungen zeigen: Die Zeit drängt. Schnelles, vernetztes und konsequentes Handeln ist erforderlich.

¹⁵ Eine der Grundlagen kann der SAICM-Prozess sein, dem es jedoch noch an Rechtsverbindlichkeit fehlt und der sich auf Themen des Chemikalienmanagements beschränkt.

Anastas, P. T.; Warner, J. C. (1998): Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press: New York, p.30. By permission of Oxford University Press

Anastas P.T. and Zimmerman J.B. (2018): The United Nations sustainability goals: How can sustainable chemistry contribute? Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry, 13: 150–153, <http://webhost.bridgew.edu/ebrush/CHEM%20489%20PDF/Journal%20Club/For%20JC-3%20UNSDGs/2018%20UNSDGs%20How%20can%20green%20chemistry%20contribute.pdf>

Arens M. and Vogl V. (2019): Can we find a market for green steel? Steel Times International, 43, 59–61, https://www.researchgate.net/profile/Marlene_Arens/publication/340778462_Can_we_find_a_market_for_green_steel/links/5e9d686b299bf13079aa4bc1/Can-we-find-a-market-for-green-steel.pdf?origin=publication_detail

Ayres R.U. and Ayres L.W. eds. (2002): A Handbook of Industrial Ecology, Edward Elgar Publishing, Northampton, MA, <https://doi.org/10.1017/S1466046603261123>

Bastin J-F, Clark E, Elliott T, Hart S, van den Hoogen J, Hordijk I, Ma H, Majumder S, Manoli G, Maschler J, Mo L, Routh D, Yu K, Zohner C M, Crowther T W (2019): Understanding climate change from a global analysis of city analogues, Plos One, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0217592>

BDEW (2020): Wasserstoff statt Kohle – Wie wird Stahl grün?, <https://www.bdew.de/verband/magazin-2050/wasserstoff-statt-kohle-der-stahl-der-zukunft-ist-klimafreundlich/>

Behr A., Neuberg S. (2008): Aktuelle Wochenschau, Hrsg. GDCh, Katalytische Kohlendioxid-Chemie, <http://archiv.aktuelle-wochenschau.de/2008/woche20/woche20.html>

Bellinger D.C. et al. (2019): Global burden of intellectual disability resulting from prenatal exposure to methylmercury, 2015. Environ. Res., 170:, 416–421. Global burden of intellectual disability resulting from prenatal exposure to methylmercury, 2015 - ScienceDirect

Berghahn R, Mohr S, Hübner V, Schmiedliche R, Schmiedling I, Svetich-Will E, Schmidt R (2012): Effects of repeated insecticide pulses on macroinvertebrate drift in indoor stream mesocosms. Aquat. Toxicol., 122–123:56–66; <https://link.springer.com/article/10.1186/2190-4715-25-21>

Besson M., Feeney, W.E., Moniz, I. et al. (2020): Anthropogenic stressors impact fish sensory development and survival via thyroid disruption. Nat. Commun. 11, 3614. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17450-8>

Blanck H. (2010): A Critical Review of Procedures and Approaches Used for Assessing Pollution-Induced Community Tolerance (PICT) in Biotic Communities, Human and Ecological Risk Assessment – An International Journal, 1003–1034, <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1080-700291905792>

BMU (2020): Umweltministerium plant feste PTL-Quote für Flugzeug-Kerosin, <https://www.airliners.de/umweltministerium-ptl-quote-flugzeug-kerosin/57534>

BMU (2020): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm ProgRes III, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourcen_effizienz/progress_iii_programm_bf.pdf

BMZ (2015): Klimawandel: Was er für Städte bedeutet, <https://www.cisl.cam.ac.uk/business-action/low-carbon-transformation/ipcc-climate-science-business-briefings/translations/pdfs/german/cities-briefing-web-de-giz.pdf/view>

BÖLW (2020): Kommentar zum Pesticidabsatzbericht, Ökolandbau NRW: BÖLW-Kommentar zu Pesticidabsatzbericht

Bringezu S., Kümmerer K. (2012): Nachhaltiges Ressourcen- und Stoffstrommanagement – Zwischen Gigatonnen und Mikrogramm, GAIA A 21/1(2012): 69–72, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/4227/file/4227_Bringezu.pdf

Brönmark C., Hansson L.A. (2000): Chemical communication in aquatic systems: an introduction. Oikos, 88:103–109, https://www.researchgate.net/profile/Christer_Bronmark/publication/27996023_Chemical_communication_in_aquatic_systems_An_introduction/links/5bab34a645851574f7e6524d/Chemical-communication-in-aquatic-systems-An-introduction.pdf?origin=publication_detail

BUND – Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2017): Perspektive 2030 – Suffizienz in der Praxis, Berlin https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/ressourcen_und_technik/suffizienz_perspektive_2030_impulspapier.pdf

BUND – Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland (2019a): Herausforderungen für eine nachhaltige Stoffpolitik, BUND-Position 69, Berlin, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/position/position_stoffpolitik.pdf

BUND, Heinrich Böll Stiftung (2019b): Plastikatlas – Daten und Fakten über eine Welt voller Kunststoff, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/chemie/chemie_plastikatlas_2019.pdf

BUND – Bund für Umwelt- und Naturschutz Deutschland (2020a): Arzneimittel in der Umwelt, BUND Position 70, Berlin, https://www.bund.net/fileadmin/user_upload_bund/publikationen/bund/position/position_arzneimittel.pdf

BUND – Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2020b): Projekt Ressourcenwende, <https://www.ressourcenwende.net/>

Bundesregierung (2016): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, S. 33–34, <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975292/730844/3d30c6c2875a9a08d364620ab7916af6/deutsche-nachhaltigkeitsstrategie-neuaufgabe-2016-download-bpa-data.pdf?download=1>

Bunge R. (2016): Recycling ist gut, mehr Recycling ist besser – oder nicht?, Proceedings zur Berliner Rohstoff- und Recyclingkonferenz 2016, www.vivis.de/wp-content/uploads/RuR9/2016_RuR_79-92_Bunge.pdf

BUWAL (1990): Methodik für Ökobilanzen auf der Basis ökologischer Optimierung, Schriftenreihe Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) Nr.133, 19

CBD (2010): Uses of genetic resources, <https://www.cbd.int/abs/infokit/factsheet-uses-en.pdf>

CBD (2020): Global Biodiversity Outlook 5, <https://www.cbd.int/gbo5/gbo5/publication/gbo-5-en.pdf>

Ceccatelli S. et al. (2013): Long-lasting neurotoxic effects of exposure to methylmercury during development. Journal of Internal Medicine, 273, 490–497. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/joim.12045>

Chertow, M. R. (2000): Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. Annual Review of Energy and the Environment 25: 313–337.

ClientEarth (2020): Emissionsgrenzwerte für Kohlekraftwerke: Gesundheitliche Folgen der vorgeschlagenen Grenzwerte in Deutschland, <https://www.documents.clientearth.org/wp-content/uploads/library/2020-05-12-emissionsgrenzwerte-fur-kohlekraftwerke-gesundheitliche-folgen-der-vorgeschlagenen-grenzwerte-in-deutschland-ext-de.pdf>

- Culbreth M. & Aschner M. (2019): Methylmercury Epigenetics (2019): Toxics, 7, 56, <https://www.mdpi.com/2305-6304/7/4/56>
- Dasgupta P. (2021): The Economics of Biodiversity: The Dasgupta Review, London, HM Treasury, <https://www.gov.uk/government/publications/final-report-the-economics-of-biodiversity-the-dasgupta-review>
- DBU (2019): DBU aktuell Nr. 7, 2019, https://www.dbu.de/708artikel38397_2486.html
- DECHEMA (2016): Mikroalgen-Biotechnologie – Gegenwärtiger Stand, Herausforderungen, Ziele, https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/PP_Algenbio_2016_ez1.pdf
- DECHEMA (2019): Roadmap Chemie 2050, https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/2019_Studie_Roadmap_Chemie_2050-p-20005590.PDF
- DERA – Deutsche Rohstoffagentur (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016, https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf?__blob=publicationFile&t=5
- Desforges J.-P., Hall A., McConnell B. et al. (2018): Predicting global killer whale population collapse from PCB pollution. *Science* 361 (6409), 1373–6, doi: 10.1126/science.aat1953
- Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste (2014): Der Rebound-Effekt: Störendes Phänomen bei der Steigerung der Energieeffizienz, <https://www.bundestag.de/resource/blob/282726/85e2970ac3cda746a05541a0269eda69/der-rebound-effekt--stoerendes-phaenomen-bei-der-steigerung-der-energieeffizienz-data.pdf>
- Deutscher Bundestag – Wissenschaftliche Dienste (2018) : Energieverbrauch bei der Herstellung von mineralischem Stickstoffdünger, <https://www.bundestag.de/resource/blob/567976/bb4895f14291074b0a342d4c714b47f8/wd-8-088-18-pdf-data.pdf>
- Deutscher Bundestag (2020): Drucksache 19/23141, Umsetzung des EU-Plastikbeitrags in Deutschland, <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/231/1923141.pdf>
- Deutsche Wirtschaftsnachrichten (2020): Zement erzeugt mehr CO₂ als alle Lkw der Welt zusammen, <https://deutsche-wirtschaftsnachrichten.de/2019/08/18/zement-erzeugt-mehr-co2-lkw/>
- DGUV (1990): DGUV Information 209-028 – Auftreten von Dioxinen (PCDD / PCDF) bei der Metallerzeugung und Metallbearbeitung, <https://shop.wolterskluwer.de/wirtschaft/41838000-dguv-information-209-028-auftreten-von-dioxinen-pcdd/pcdf-bei-der-metallerzeugung-und-metallbe.html>
- EEA – Europäische Umweltagentur (2002): Late lessons from early warnings: the precautionary principle 1896–2000, Issue Report 22/2001, Copenhagen, ISBN: 92-9167-323-4, https://www.eea.europa.eu/publications/environmental_issue_report_2001_22
- EEA – Europäische Umweltagentur (2013): Late lessons from early warnings: science, precaution, innovation II, Report No.1/2013, Copenhagen, ISBN: 978-92-9213-349-8, <https://www.eea.europa.eu/publications/late-lessons-2>
- Effizienzagentur NRW (2020): <https://www.ressourceneffizienz.de/startseite>
- Ellen MacArthur Foundation (2019): Completing the picture how the circular economy tackles climate change, https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Completing_The_Picture_How_The_Circular_Economy_Tackles_Climate_Change_V3_26_September.pdf
- EP – Europäisches Parlament (2018): Treibhausgasemissionen nach Ländern und Sektoren, <https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/priorities/klimawandel/20180301STO98928/treibhausgasemissionen-nach-landern-und-sektoren-infografik>
- EREMA (2019): Press Release FDA confirmed: PCR-HDPE produced with EREMA technology is suitable for food packaging made with up to 100 percent post consumer recycle, (20.09.2019), https://cdn2.hubspot.net/hubfs/3421927/PCOs/2019_09_PR_EREMA_PCR-HDPE_suitable_for_food_packaging_final_EN.pdf
- EU-Kommission (2018): A European Strategy for Plastics in a Circular Economy, COM(2018)28 final, <https://ec.europa.eu/environment/circular-economy/pdf/plastics-strategy.pdf>
- EU Kommission (2020a): Durchführungsbeschluss (EU) 2020/1161 der Kommission vom 04. August 2020 zur Erstellung einer Beobachtungsliste von Stoffen für eine unionsweite Überwachung im Bereich der Wasserpolitik gemäß der Richtlinie 2008/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020D1161&from=EN>
- EU-Kommission (2020b): Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft – Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa, COM(2020) 98 final, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:9903b325-6388-11ea-b735-01aa75ed71a1.0016.02/DOC_1&format=PDF
- EU – Europäische Union (2013): Richtlinie 2013/39/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. August 2013 zur Änderung der Richtlinien 2000/60/EG und 2008/105/EG in Bezug auf prioritäre Stoffe im Bereich der Wasserpolitik, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:226:0001:0017:DE:PDF>
- EU – Europäische Union (2018): Richtlinie 2018/851/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0851&from=DE>
- FHG IVV (2020): Recycling von Multilayer-Verpackungen, <https://www.ivv.fraunhofer.de/de/recycling-umwelt/multilayerrecycling.html>
- FHG Umsicht (2020): Diskussionspapier „Chemisches Kunststoffrecycling“, <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2020/diskussionspapier-chemisches-kunststoffrecycling.html>
- Friege H. et al. (2019): How should we deal with the interfaces between chemicals, product and waste legislation?, *Environ Sci Eur* (2019) 31:51, <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0236-7>
- Gilhaus, K., Boch, S., Fischer, M. et al. (2017): Grassland management in Germany: Effects on plant diversity and vegetation composition, *Tuexenia*, 37, 379–397, https://www.researchgate.net/profile/Steffen_Boch/publication/320034546_Grassland_management_in_Germany_Effects_on_plant_diversity_and_vegetation_composition/links/59c9fccaca272bb050746f3/Grassland-management-in-Germany-Effects-on-plant-diversity-and-vegetation-composition.pdf?origin=publication_detail
- Gleich, A. von (2006): Outlines of a sustainable metals industry. In: Gleich, A. von; Ayres, R. U.; Göbbling-Reisemann, S. (Eds.) (2006): Sustainable Metals Management. Securing Our Future – Steps Towards a Closed Loop Economy. Springer, Dordrecht pp 3-39 https://www.researchgate.net/publication/226079336_Outlines_of_a_Sustainable_Metals_Industry

- Göbbling-Reisemann, S.; von Gleich, A. (2009): Ressourcen, Kreislaufwirtschaft und Entropie am Beispiel der Metalle. In: Hösel, G.; Bilittewski, B.; Schenkel, W.; Schnurer, H. (Hrsg.) Müllhandbuch. Erich Schmidt Verlag, Berlin, S. 1–27
- Graedel T.E., Crutzen P.J. (1994): Chemie der Atmosphäre: Bedeutung für Klima und Umwelt. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg. ISBN: 3-86025-204-6
- Held M. (Hrsg.) (1991): Leitbilder der Chemiepolitik, Campus Verlag, S. 55-64, ISBN: 3593344505 / 3-593-34450-5
- IEA – International Energy Agency (2018a): Global Energy Outlook 2018, <https://webstore.iea.org/download/summary/190?fileName=German-WE0-2018-ES.pdf>
- IEA – International Energy Agency (2018b): The future of petrochemicals, <https://webstore.iea.org/the-future-of-petrochemicals>
- IEA – International Energy Agency (2020): Direct Air capture, Tracking report June 2020, <https://www.iea.org/reports/direct-air-capture>
- IMO – International Maritime Organisation (2020): BWM Convention and Guidelines, <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/BWMConventionandGuidelines.aspx>
- IN4 Climate NRW (2020): Best Practice Rheticus, <https://www.in4climate.nrw/best-practice/2020/rheticus/>
- IPBES (2019): Das „Globale Assessment“ des Weltbiodiversitätsrates IPBES, Auszüge aus dem "Summary for policymakers" (SPM), Stand 6. Mai 2019, https://www.helmholtz.de/fileadmin/user_upload/IPBES-Factsheet.pdf
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2018): Global Warming of 1.5 °C, Summary for Policymakers, https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf
- IPCP – International Panel on Chemical Pollution (2019): Strengthening the Science Policy Interface in International Chemicals Governance: A Mapping and Gap Analysis, Zenodo, <https://www.ipcp.ch/wp-content/uploads/2019/02/IPCP-Sci-Pol-Report2019.pdf>
- IRP – International Resource Panel (2017): Assessing global resource use: A systems approach to resource efficiency and pollution reduction. A Report of the International Resource Panel. United Nations. Environment Programme. Nairobi, Kenya, <https://www.resourcepanel.org/reports/assessing-global-resource-use>
- ISC3 (2020): Key characteristics of sustainable Chemistry – Towards a Common Understanding of Sustainable Chemistry, Bonn (Germany) 2020
- ITF – International Transport Forum (2017): ITF Transport Outlook 2017, <https://www.itf-oecd.org/transport-outlook-2017>
- Jäschke K. et al. (2013): Wie zeigt sich der Klimawandel in den deutschen Talsperren?, Wasserwirtschaft 5, 32-35, <https://www.springerprofessional.de/wie-zeigt-sich-der-klimawandel-in-den-deutschen-talsperren/3417338>
- KBU – Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt (2020): Boden und Biodiversität – Forderungen an die Politik. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020_07_20_kbu_boden_und_biodiversitaet_bf.pdf
- Khare P., Machesky J., Soto R., He M., Presto A.A., Gentner D.R. (2020): Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors. Science Advances 6, 2 September 2020. <http://advances.sciencemag.org/content/6/36/eabb9785>
- KIT (2019): PtL-Anlage am KIT produziert Kraftstoffe aus Luft und Strom <https://www.springerprofessional.de/betriebsstoffe/erneuerbare-energien/ptl-anlage-am-kit-produziert-kraftstoffe-aus-luft-und-strom/17081894>
- Klaschka U. (2009a): Chemical communication by infochemicals, Environ Sci Pollut Res, 16:367, <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-009-0171-z>
- Klaschka U. (2009b): A new challenge: development of test systems for the infochemical effect. Environ Sci Pollut Res, 16:370–388, <http://rd.springer.com/article/10.1007/s11356-008-0093-1>
- Klinger R. et al. (2017): Rechtsgutachten zur Einführung von Anwendungsvorbehalten zum Schutz der Biodiversität im Rahmen von Zulassungen nach dem Pflanzenschutzgesetz, UFOPLAN Forschungskennzahl 3716 67 432 0, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/kfzk_3716_67_432_rechtsgutachten%20einfuehrung%20anwendungsvorbehalten_bf.pdf
- Klöpffer W. (2012): Verhalten und Abbau von Umweltchemikalien. 2. Auflage, Wiley-VCH, Weinheim. ISBN: 978-3-527-32673-0.
- Knolle F. und Knolle F. (1983): Vogel- und Säugetierverluste durch Umweltbelastungen im Gebiet des Harzes, Vogelk. Ber. Nieders. 15, H. 2, https://www.karstwanderweg.de/publika/vo_be_ni/15/47-49/index.htm
- Korhonen, J. and Snakin, J. P. (2005): Analysing the evolution of industrial ecosystems: concepts and application. Ecological Economics 52(2): 169–186
- Kümmerer K. (2015): Benign by Design, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/dokumente/session-6_2-kummerer.pdf
- Kümmerer K. (2017): Nachhaltige Chemie – das künftige Leitbild, Angewandte Chemie , 129, 16640 – 16641, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ange.201709949>
- Kümmerer K., Clark J.H. and Zuin V.G. (2020): Rethinking chemistry for a circular economy, Science , 367(6476):369–370, doi: 10.1126/science.aba4979, <https://science.sciencemag.org/content/367/6476/369.full>
- Leahy S., National Geographic, (2019): Australische Sommer in Berlin: Klimaprognose für das Jahr 2050, <https://www.nationalgeographic.de/umwelt201907australische-sommer-berlin-klimaprognose-fuer-das-jahr-2050>
- Lemoine, N., Bauer, H.-G., Peintinger, M. Et Böhning-Gaese, K. (2007): Effects of climate and land-use change on species abundance in a Central European bird community. Conservation Biology, 21, 495 – 503, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17391199/>
- Leopoldina (2018): Der stumme Frühling – Zur Notwendigkeit eines umweltverträglichen Pflanzenschutzes, Diskussion Nr. 16. Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale), https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2018_Diskussionspapier_Pflanzenschutzmittel.pdf
- Leopoldina et al. (2020): Biodiversität und Management von Agrarlandschaften – Umfassendes Handeln ist jetzt wichtig. Nationale Akademie der Wissenschaften, Halle (Saale), https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2020_Akademie_n_Stellungnahme_Biodiversitaet%CC%88t.pdf
- LfL– Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2021): Der Asiatische Laubholzbockkäfer (ALB) in Bayern, Der Asiatische Laubholzbockkäfer in Bayern – LfL

- LfU - Bayerisches Landesamt für Umwelt (2014): Zusammenfassung Erfassung von persistenten organischen Schadstoffen im Bayerischen Alpenraum. https://www.lfu.bayern.de/analytik_stoffe/purealps/publikationen/doc/zusammenfassung_popalp.pdf
- Linhart C. et al. (2021): Year round pesticide contamination of public sites near intensively managed agricultural areas in South Tyrol, Environ. Sci. Eur. 33, 1-12, Linhart2021_Article_Year-roundPesticideContaminati.pdf
- Liu Y., Richardson E.S., Derocher A.E. et al. (2018): Hundreds of Unrecognized Halogenated Contaminants Discovered in Polar Bear Serum. Angew. Chem. 57 (50), 16401-6, <https://doi.org/10.1002/anie.201809906>
- Lovins A.B., Braungart M., Stahel W.R. (2014): A New Dynamic: Effective Business in a Circular Economy. Ellen MacArthur Found. Publ., ISBN 0-9927784-1-7
- LUGV - Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (2015): Durchführung einer Bioindikation auf Pflanzenschutzmittelrückstände mittels Luftgüte-Rindenmonitoring, Passivsammlern und Vegetationsproben. Fachbeiträge des LUGV Heft Nr. 147. <https://www.lfu.brandenburg.de>
- Matthiesen P. et al. (2016): Recommended Approaches to the Scientific Evaluation of Ecotoxicological Hazards and Risks of Endocrine-Active Substances, Integrated Environmental Assessment and Management, 13, 267-279, <https://setac.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/ieam.1885>
- Meena R.S. et al. (2020): Impact of Agrochemicals on Soil Microbiota and Management: A Review, Land, 9, 34; https://www.researchgate.net/profile/Shamina-Pathan/publication/338765833_Impact_of_Agrochemicals_on_Soil_Microbiota_and_Management_A_Review/links/5e29a09c299bf1521677717c/Impact-of-Agrochemicals-on-Soil-Microbiota-and-Management-A-Review.pdf?origin=publication_detail
- Mesnager R. et al. (2019): Shotgun metagenomics and metabolomics reveal glyphosate alters the gut microbiome of Sprague-Dawley rats by inhibiting the shikimate pathway, bioRxiv, 1-36, <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/870105v1>
- Mesnager R. et al. (2021): Use of Shotgun Metagenomics and Metabolomics to Evaluate the Impact of Glyphosate or Roundup MON 52276 on the Gut Microbiota and Serum Metabolome of Sprague-Dawley Rats, Environ. Health Persp., 1-27, <https://www.x-mol.com/paper/1354521735587045376>
- Meyer, S., Wesche, K., Krause, B. et al. (2014): Diversitätsverluste und floristischer Wandel im Ackerland seit 1950. Natur und Landschaft, 89, 392-398.
- Motta E.V.S. et al. (2018): Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. PNAS, 115, 10305-10310, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6187125/>
- NABU et al. (2017): Minamata-Konvention, <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/170120-nabu-stellungnahme-minamata-ratifikation.pdf>
- NABU (2019): Recycling im Zeitalter der Digitalisierung, Spezifische Recyclingziele für Metalle und Kunststoffe aus Elektrokleinern im ElektroG: Regulatorische Ansätze, https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcen/ue1/190702_recycling_im_zeitalter_der_digitalisierung_endbericht.pdf
- Nendza M., Klaschka U., Berghahn R. (2013): Suitable test substances for proof of concept regarding infochemical effects in surface waters. Environmental Sciences Europe, 25:21. <http://www.enveurope.com/content/25/1/21>.
- Norgate T.E. et al. (2006): Assessing the environmental impact of metal production processes, Journal of cleaner production, 15, 838-848, https://www.researchgate.net/publication/222402610_Assessing_the_environmental_impact_of_metal_production_processes
- Noyes P.D., et al. (2009): The toxicology of climate change: Environmental contaminants in a warming world. Environ. Int., 35, 971-986, doi:10.1016/j.envint.2009.02.006. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412009000543>
- OSPAR (1992): Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks, Deutsche Übersetzung des BMU, https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Gesetze/ospar_convention_2014_bf.pdf
- OSPAR (2019): The OSPAR list of chemicals for priority action - Suggestions for future actions, <https://www.ospar.org/documents?v=40953>
- Pleissner D. und Smetana S.: (2020). Editorial: Conversion of organic waste to food and feed; Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. 100394. 10.1016/j.cogsc.2020.100394
- Pfaller J.B. et al. (2020): Odors from marine plastic debris elicit foraging behavior in sea turtles; Current Biology 30, R191-R214; https://www.researchgate.net/publication/339808340_Odors_from_marine_plastic_debris_elicit_foraging_behavior_in_sea_turtles
- PlasticsEurope (2019): Plastics – the Facts 201, <https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications/1804-plastics-facts-2019>
- Priefer C. et al. (2017): Pathways to Shape the Bioeconomy, Resources, 6, 10, https://www.researchgate.net/profile/Carmen_Priefer/publication/313881726_Pathways_to_Shape_the_Bioeconomy/links/59ea38320f7e9bfd5eb6cc2b1/Pathways-to-Shape-the-Bioeconomy.pdf?origin=publication_detail
- relaio (2018): Suffizienz, Konsistenz und Effizienz – Drei Wege zu mehr Nachhaltigkeit, 12.11.2018, <https://www.relaio.de/wissen/suffizienz-konsistenz-und-effizienz-drei-wege-zu-mehr-nachhaltigkeit/>
- Rockström, J. et al. (2009): A safe operating space for humanity. Nature Vol. 461, S. 472-475, <https://www.nature.com/articles/461472a>
- Sachs, W. (1993): Die vier E's: Merkposten für einen maßvollen Wirtschaftsstil, Politische Ökologie 11(33), 69-72, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/66/file/66_Sachs.pdf
- SAICM - Strategic Approach to International Chemicals Management (2020): <http://www.saicm.org/>
- Schellnhuber H.-J. (2015): Selbstverbrennung. C. Bertelsmann, München. ISBN: 978-3-570-10262-2
- Scheringer M. (2002): Persistence and Spatial Range of Environmental Chemicals: New Ethical and Scientific Concepts for Risk Assessment, Wiley VCH Verlag, ISBN 9783527305278
- Scheringer M. (2017): Environmental chemistry and ecotoxicology: in greater demand than ever, Environ Sci Eur 29:3, DOI 10.1186/s12302-016-0101-x, https://www.researchgate.net/publication/312517504_Environmental_chemistry_and_ecotoxicology_in_greater_demand_than_ever
- Schroeder, Julius von und Reuss, C. (1883) : Die Beschädigung der Vegetation durch Rauch und die Oberharzer Hüttenrauchschäden, Verlag: Zentralantiquariat der DDR Leipzig,, 1986 (Neuausgabe: 1987, ISBN 3-487-08279-9)

- Schütte G. et al. (2017): Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide resistant plants, *Environ. Sci. Eur.* 29:5, <https://enveurope.springeropen.com/track/pdf/10.1186/s12302-016-0100-y.pdf>
- Schwarzenbach R.P., Gschwend P.M., Imboden D.M. (2002): *Environmental Organic Chemistry*. 2. Auflage, Wiley, New York, ISBN: 978-0-471-64964-9
- Segner H., Schmitt-Jansen M., Sabater S. (2014): Assessing the impact of multiple stressors on aquatic biota: the receptor's side matters. *Environ. Sci. Technol.* 48 (14), 7690-6, <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es405082t>
- Settele J. (2020): Die Triple-Krise – Artensterben, Klimawandel, Pandemien, Edel Books, Hamburg, ISBN 978-3-8419-0653-3
- Spangenberg J. und Kuhlmann W. (2020): Bioökonomie im Lichte der Nachhaltigkeit und der Umsetzung der SDGs (FKZ 3520890900)
- Spiegel (2020): Größter Ölunfall nördlich des Polarkreises aus dem All zu sehen, 07.06.2020, Russland: Größter Ölunfall nördlich des Polarkreises aus dem All zu sehen – DER SPIEGEL
- Stat. Bundesamt (2020a): Pressemitteilung Nr. 399 vom 9. Oktober 2020, https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2020/10/PD20_399_12621.html
- Stat. Bundesamt (2020b): Umweltökonomische Gesamtrechnungen – Gesamtrohstoffproduktivität und ihre Komponenten, Gesamtrohstoffproduktivität und ihre Komponenten – Statistisches Bundesamt ([destatis.de](https://www.destatis.de))
- Steffen, W. et al. (2015a): Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* Vol. 347, no. 6223, <https://science.sciencemag.org/content/347/6223/1259855>
- Steffen, W., W. Broadgate, L. Deutsch, O. Gaffney, C. Ludwig. (2015b): The Trajectory of the Anthropocene: The great acceleration., *The Anthropocene Review* 2: 81–98 <https://www.stockholmresilience.org/publications/artiklar/2016-04-18-the-trajectory-of-the-anthropocene-the-great-acceleration.html>
- Steinhäuser K.G. (2007): Globaler Wandel – neue Fragen für Stoffbewertung und Ökotoxikologie. Vortrag auf der SETAC GLB Jahrestagung, Leipzig, 12.09.2007.
- Surkan, P. J. et al. (2009): Neuropsychological function in school-age children with low mercury exposures. *Environ. Res.*, 109, 728–33. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013935109000760?via=ihub>
- Syromiatnikov M.Y. (2020): The Effect of Pesticides on the Microbiome of Animals, *Agriculture*, 10, 79; <https://www.mdpi.com/2077-0472/10/3/79>
- Tagesspiegel (2020): Krankenhaus-Abwässer fließen ungefiltert in die Berliner Kanalisation, 02.04.2020, <https://www.tagesspiegel.de/berlin/regeln-lockerer-als-bei-industrie-krankenhaus-abwaesser-fliesen-ungefiltert-in-berliner-kanalisation/25701858.html>
- Tian Z. et al. (2021): A ubiquitous tire rubber-derived chemical induces acute mortality in coho salmon, *Science* 371, 185–189
- Trotter B. et al. (2018): Plastic waste interferes with chemical communication in aquatic ecosystems, *Sci Rep.* 9: 5889, https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6458178/pdf/41598_2019_Article_41677.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2009): Nachhaltige Chemie, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3734.pdf>
- UBA – Umweltbundesamt (2012): UBA-Text 01/2012, Indikatoren /Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion, <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4237.pdf>
- UBA – Umweltbundesamt (2014): Dioxine und dioxinähnliche PCB in Umwelt und Nahrungsketten, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp_dioxine_entwurf_25.04.2014_grau-ocker.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2016): Leitfaden Nachhaltige Chemikalien, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/161215_uba_fb_chemikalien_dt_bf.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2018): Strukturelle und produktionstechnische Determinanten der Ressourceneffizienz: Untersuchung von Pfadabhängigkeiten, strukturellen Effekten und technischen Potenzialen auf die zukünftige Entwicklung der Rohstoffproduktivität (DeteRes), *Texte* 29/2018, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-04-11_texte_29-2018_deteress.pdf
- UBA – Umweltbundesamt (2020a): Energieverbrauch nach Energieträgern und Sektoren, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/energieverbrauch-nach-energietraegern-sektoren>
- UBA – Umweltbundesamt (2020b): Branchenabhängiger Energieverbrauch des verarbeitenden Gewerbes, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umwelt-wirtschaft/industrie/branchenabhaengiger-energieverbrauch-des-der-energiebedarf-deutschlands>
- UBA – Umweltbundesamt (2020c): Daten der Umweltprobenbank
- UBA – Umweltbundesamt (2021): Kunststoffe in der Umwelt – Ein Problem für unsere Böden oder nur falscher Alarm? Fachtagung der Kommission Bodenschutz beim UBA (KBU) zum Weltbodentag 2020 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und Botschaften; https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2875/dokumente/ergebnispapier_-_kunststoffe_in_der_umwelt_final_02.docx.pdf
- UNCTAD (1992): Agenda 21, https://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf
- UNCTAD (2019): Review of maritime transport, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2019_en.pdf
- UNEP (2015): Global Waste Management Outlook, <https://www.uncclearn.org/sites/default/files/inventory/unep23092015.pdf>
- UNEP (2016): Global material flows and resource productivity, https://www.resourcepanel.org/sites/default/files/documents/document/media/global_material_flows_full_report_english.pdf
- UNEP (2019a): Global Chemicals Outlook, GCO II Synthesis report, https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27651/GCOII_synth.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- UNEP (2019b): UNEP.CHW.14/CRP.40, <http://wiki.ban.org/images/0/Ob/UNEP-CHW.14-CRP.40.English.pdf>
- UNIDO (2018): Chemical Leasing, <https://www.unido.org/our-focus/safeguarding-environment/resource-efficient-and-low-carbon-industrial-production/chemical-leasing>

- Universität Regensburg (2020): Aichi Biodiversitätsziele, <https://biodiv.de/biodiversitaet-infos/konvention-ueber-die-biologische-vielfalt/aichi-biodiversitaets-ziele-2020.html>
- UNO (2015): Sustainable Development Goals, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/sustainable-development-goals/>
- VDI (2012): Richtlinie 4600, Kumulierter Energieaufwand, Beuth-Verlag Berlin
- VDI (2017): Richtlinie 4605, Nachhaltigkeitsbewertung, Beuth-Verlag Berlin
- VDI (2018): Richtlinie 4800, Teil 2, Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands, Beuth-Verlag Berlin
- Viebahn P. et al. (2019): Entwicklungsstand und Forschungsbedarf von Direct Air Capture – Ergebnis einer multidimensionalen Analyse, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, 69, 30-33, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7438/file/7438_Viebahn.pdf
- von Waldow H., MacLeod M., Scheringer M., Hungerbühler K. (2007): How does the characterisation of organic contaminants change with respect to their global fate under a climate-change scenario? SETAC Europe Annual Meeting, Manuscript-ID: SETAC-EU-0229-2007
- Wang Z. et al. (2021): We need a global science-policy body on Chemicals and waste: Major gaps in current efforts limit policy responses, *Science* 371, Issue 6531, pp. 774-776, DOI: 10.1126/science.abe9090, <https://science.sciencemag.org/content/371/6531/774?rss=1>
- Wania F., Mackay D. (1996): Tracking the Distribution of Persistent Organic Pollutants, *Environ.Sci.Technol.* 30, 390A-396A,
- Weber-Blaschke G. (2009): Stoffstrommanagement als Instrument nachhaltiger Bewirtschaftung natürlicher und technischer Systeme. Ein kritischer Vergleich ausgewählter Beispiele. Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe in Forschung und Praxis“ des Wissenschaftszentrums Straubing, Bd. 1, Verlag Attenkofer, Straubing, 330 S. (Habilitationsschrift 2005, Technische Universität München).
- Weber R., Hollert H., Kamphues J. et al. (2015): Analyse und Trendabschätzung der Belastung der Umwelt und von Lebensmitteln mit ausgewählten POPs und Erweiterung des Datenbestandes der POP-Dioxin-Datenbank des Bundes und der Länder mit dem Ziel pfadbezogener Ursachenaufklärung. Umweltbundesamt, Dokumentationen 114/2015. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-trendabschaetzung-der-belastung-der-umwelt>
- de Wit, M. et al (2018): The Circularity Gap Report, https://pacecircular.org/sites/default/files/2020-01/Circularity%20Gap%20Report%202018_0.pdf
- WHO - Weltgesundheitsorganisation (2012): State of the Science of Endocrine Disrupting Chemicals (EDCs), <https://www.who.int/ceh/publications/endocrine/en/>
- Wong S.S. et al. (2020): Downstream processing of lignin derived feedstock into end products, *Chemical Society Rev.* 15, <https://doi.org/10.1039/D0CS00134A>
- WWF (2020): Living Planet Report 2020 – Kurzfassung, https://www.wwf.de/fileadmin/user_upload/living-planet-report/2020/Living-Planet-Report-2020-Kurzfassung.pdf

Glossar

CBD	Convention on Biodiversity (Übereinkommen über die Biologische Vielfalt)
CLP	Classification, Labelling and Packaging, (Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung), EU-Verordnung Nr. 1272/2008
CO ₂ eq	CO ₂ -Äquivalente – Summe der Treibhausgase unter Berücksichtigung der spezifischen Potenz im Vergleich zu Kohlenstoffdioxid
EEA	European Environment Agency (Europäische Umweltagentur)
ED	Endocrine Disruptor (hormonaktive Substanz)
HBCD	1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan
HDPE	High density polyethylene (Polyethylen hoher Dichte)
Infochemikalie	Botenstoff zur Informationsübermittlung zwischen Organismen
IPBES	Intergovernmental Science Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (Weltbiodiversitätsrat)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Weltklimarat)
IPCP	International Panel on Chemical Pollution
KEA	Kumulierter Energiebedarf
KRA	Kumulierter Ressourcenbedarf
Mikrobiom	Bakterielle Lebensgemeinschaft
Nm ³	Normkubikmeter – Volumen bei 1013 hPa und 0 °C
OSPAR	Oslo-Paris Übereinkommen zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks
PAK	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane
PET	Polyethylenterephthalat
PFAS	Per- und Polyfluorierte Alkylsubstanzen

PICT	Pollution-induced community tolerance (Fähigkeit eines Ökosystems anthropogene Belastungen zu verkraften)
PM _{2,5}	Partikelfraktion, die einen gröÙenselektiven Lufteinlass passiert, der für Partikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 2,5 µm eine Abscheidewirksamkeit von 50 % hat (Partikel bis maximal ca. 5–6 µm).
POP	Persistent organic pollutant (persistenter organischer Schadstoff)
PtX	Power to X- Technologie zur Herstellung von Gas (PtG) oder Flüssigkeiten (PtL) mittels elektrischer Energie aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid
REACH	Registration, Evaluation and Authorisation of Chemicals, EU-Verordnung Nr. 1907/2006
SAICM	Strategic Approach to an International Chemicals Management (Strategischer Ansatz für ein internationales Chemikalienmanagement)
SDG	Sustainable Development Goal (nachhaltiges Entwicklungsziel)
UBA	Umweltbundesamt
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development
UNEP	United Nations Environment Programme
UNIDO	United Nations Industrial Development Organisation
UQN	Umweltqualitätsnorm

Impressum

Herausgeber:

*Bund für Umwelt
und Naturschutz
Deutschland e. V. (BUND),
Friends of the Earth Germany,
Kaiserin-Augusta-Allee 5,
10553 Berlin*

Telefon: 0 30/2 75 86-40

Telefax: 0 30/2 75 86-440

Mail: info@bund.net

www.bund.net

AutorInnen:

*Dieter Cohors-Fresenborg,
Henning Friege, Arnim von
Gleich, Janna Kuhlmann, Volker
Molthan, Markus Große-Ophoff,
Wolfgang Körner, Klaus Günter
Steinhäuser aus dem BAK
Umweltchemikalien und Toxiko-
logie*

*Wir danken für hilfreiche
Diskussionen und Beiträge:
Dr. Marlene Arens (Fraunhofer
Institut für System- und Inno-
vationsforschung), Prof. Dr.
Ursula Klaschka (Hochschule
Ulm), Dr. Jan Koschorreck
(Umweltbundesamt), Prof. Dr.
Daniel Pleissner (Leuphana Uni-
versität Lüneburg), Prof. Dr.
Josef Settele (UFZ Halle), Prof.
Dr. Ulrich Szewzyk (TU Berlin).
Beatrice Pippia unterstützte uns
bei der Auswahl der Abbildungen.*

Redaktion:

Ralph Ahrens

V. i. S. d. P.:

Petra Kirberger

Produktion:

Natur & Umwelt GmbH

April 2021