



Akademien der Wissenschaften Schweiz  
Académies suisses des sciences  
Accademia svizzera delle scienze  
Academias svizas da las ciencias  
Swiss Academies of Arts and Sciences

# Indikatoren zur Beurteilung der Nutzung natürlicher Ressourcen

Beispiele und Anwendungen



# Glossar

## **Indikator**

Ein Indikator ist eine Variable, die auf Messungen basiert und ein im Fokus stehendes Phänomen so genau wie möglich und nötig abbildet (Joumard und Gudmundsson 2010).

Zur Klassierung von Indikatoren wurden verschiedene Systeme entwickelt, beispielsweise das «Driving Forces, Pressures, States, Impacts, Responses (DPSIR)»-System (Gabrielsen und Bosch 2003).

## **Natürliche Ressource**

Ressource, die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (zum Beispiel Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität.

Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen (UBA 2012, in Anlehnung an die thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen der EU).

## **Ökobilanz**

Ein Prozess, um die Umweltbelastungen zu evaluieren, die mit einem Produktsystem oder einer Aktivität verbunden sind. Dies erfordert die Identifikation und Quantifizierung der verbrauchten Energie, der verbrauchten Materialien sowie der in die Umwelt freigesetzten Abfälle. Die davon ausgehende Abschätzung der Umweltbelastungen berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus eines Produkts oder einer Aktivität, angefangen bei der Förderung und Verarbeitung des Rohmaterials über Herstellung, Verteilung, Nutzung, Zweitnutzung und Unterhalt bis zum Recycling und der Endlagerung. Dabei sind auch alle Transportwege eingeschlossen. Ökobilanzen berücksichtigen Umweltschäden in den Bereichen Ökosysteme, menschliche Gesundheit und Ressourcenübernutzung (Fullana et al. 2009, S. 26).

# Vorwort

In Anbetracht dessen, dass der Lebensraum des Menschen – die Erde – begrenzt ist und der weltweite Verbrauch an natürlichen Ressourcen in den vergangenen Jahrzehnten deutlich zugenommen hat, stellt sich immer dringender die Frage, wie wir besser, das heisst nachhaltiger mit unseren natürlichen Ressourcen umgehen können. Dies nicht zuletzt auch deshalb, weil die Nutzung natürlicher Ressourcen mit beträchtlichen Umweltauswirkungen verknüpft ist.

Wesentliche Voraussetzung für einen besseren Umgang mit unseren natürlichen Ressourcen ist, dass wir wissen, wie es um sie steht. Die Wissenschaft kann hierbei eine wichtige Rolle spielen, indem sie dazu beiträgt, die Nutzung natürlicher Ressourcen und ihre Auswirkungen über Indikatoren mess- beziehungsweise fassbar zu machen und die Ergebnisse einer Anwendung dieser Indikatoren zu interpretieren.

Die vorliegende Broschüre gibt einen Überblick über mögliche Indikatoren zur Beurteilung der Nutzung natürlicher Ressourcen und zeigt auf, wo noch Lücken bestehen. Diese wird es in einer gemeinsamen Anstrengung zwischen Wissenschaft, Politik und anderen Akteuren zu schliessen gelten, wenn wir ernsthaft eine Transformation zu einer nachhaltigeren Gesellschaft anstreben wollen. Ein nachhaltigerer Umgang mit endlichen natürlichen Ressourcen ist nicht nur eine Frage von Ökologie und Ökonomie, sondern schliesst auch soziale, kulturelle, moralische und politische Aspekte ein. Diese Broschüre beschränkt sich bewusst auf die physische Welt. Sie ist als Einstiegsbroschüre ins Thema gedacht.

Prof. Dr. Ulrich W. Suter  
Präsident der SATW

Dr. Xaver Edelmann  
World Resources Forum

# Indikatoren als Entscheidungshilfe

Natürliche Ressourcen, wie Material, Wasser, Fläche und Energie, sind für alles Leben essenziell – und sie sind endlich. Auch der Mensch ist auf sie angewiesen, für seinen individuellen Stoffwechsel ebenso wie für wirtschaftliche Aktivitäten.

Während ein Mensch in einer Jäger- und Sammlergesellschaft täglich etwa drei Kilogramm biotisches und abiotisches Material beanspruchte, liegt der Verbrauch eines heutigen Menschen in einem Industrieland bei mehr als 40 Kilogramm pro Tag (Fischer-Kowalski et al. 1997). Der steigende Ressourcenverbrauch pro Kopf sowie das rasche Wachstum der Weltbevölkerung erhöhen den Druck auf die Ökosysteme der Erde und können zur Hypothek für zukünftige Generationen werden. Die Endlichkeit natürlicher Ressourcen ist heute wieder spürbar ins Bewusstsein gerückt, zum Beispiel beim Erdöl, bei den Metallen oder bei der Wasserversorgung in trockenen Regionen.

Müssen wir unseren Konsum einschränken? Oder können wir der Verknappung der natürlichen Ressourcen allein durch technische Fortschritte und erhöhte Ressourceneffizienz begegnen? Es ist an der Gesellschaft zu entscheiden, wie sie die natürlichen Ressourcen nutzen soll, ob sie bewusster, nachhaltiger mit ihnen umgehen möchte (siehe zum Beispiel SATW-Schrift Nr. 41 «Seltene Metalle: Rohstoffe für Zukunftstechnologien»). Will sie diesen Weg zielgerichtet beschreiten, muss sie aber die Nutzung natürlicher Ressourcen und die mit ihr zusammenhängenden Probleme beschreiben und messen, beispielsweise über Indikatoren.

In den letzten Jahren sind verschiedene solcher Indikatoren entwickelt worden, die sich unter anderem dadurch unterscheiden, was sie ausweisen (die Ressourcennutzung und/oder die damit zusammenhängenden Auswirkungen) und inwieweit sie qualitative Aspekte des Ressourcenbedarfs berücksichtigen (zum Beispiel Art der Nutzung von Flächen, Materialtypen).

Entscheidend für ihre Praxistauglichkeit wird dabei sein, ob sie «bei aller verbleibenden Unschärfe in der Grössenordnung stimmen und die handelnden Personen in die richtige Richtung lenken» (Schmidt-Bleek 2007), also richtungssicher sind, und wie repräsentativ, anwendbar, zuverlässig, transparent, zugänglich und nachvollziehbar sie sind.

In der vorliegenden Broschüre werden ausgewählte Indikatoren zur Messung und Beschreibung der Ressourcennutzung und deren Auswirkungen vorgestellt. Die Broschüre beschreibt Indikatoren, die sich auf die Ressourcenkategorien Material, Fläche, Wasser und Energie beziehen, und veranschaulicht diese am Beispiel von vier Metallen, welche für die Herstellung von High-Tech-Produkten von grosser Bedeutung sind (siehe Tabelle): Kupfer (Cu), Platin (Pt), Lithium (Li) und Neodym (Nd). Entscheidend bei den Berechnungen der jeweiligen Indikatoren ist, dass alle Stoff- und Energieflüsse entlang des Lebenswegs eines Produktes oder einer Dienstleistung mit einbezogen werden. Für die in dieser Broschüre untersuchten Metalle werden die Stoff- und Energieflüsse berücksichtigt, welche von der Rohstoffentnahme bis zum handelbaren Metall entstehen (siehe Abbildung 1). Die dafür notwendigen Daten werden der Datenbank ecoinvent (2010) entnommen, welche speziell für Ökobilanzen entwickelt worden ist<sup>1</sup>.

<b>Material</b>	<b>Fläche</b>
<b>Wasser</b>	<b>Energie</b>

Die von jedem Indikator abgedeckten Ressourcenkategorien sind in dieser Broschüre jeweils farbig markiert.

	Metallkategorie	Anwendungen (Auswahl)	Jahresproduktion in Tonnen, 2010 (USGS 2011)
Kupfer	Halbedelmetall	Elektrische Leitungen, Kupferrohre	16 200 000
Lithium	Alkalimetall	Batterien, Medikamente, Schmierstoffzusatz, Zementadditiv	25 300
Neodym <sup>2</sup>	Metall der Seltenen Erden	Permanentmagnete, Laser	- <sup>3</sup>
Platin	Edelmetall	Fahrzeugkatalysatoren, Laborgeräte, Zahnimplantate, Schmuck	183

Tabelle 1: Anwendungen und Jahresproduktion der vier ausgewählten Metalle.

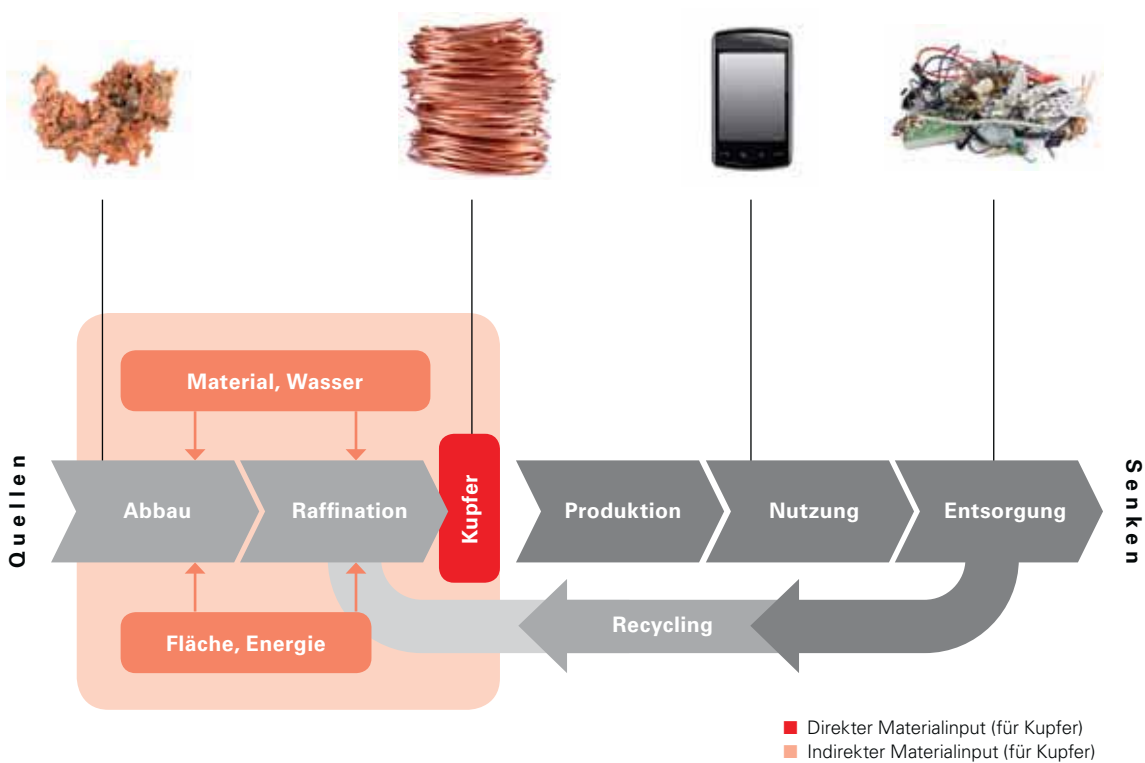


Abbildung 1: Ressourceninputs und Lebenswegabschnitte; dargestellt am Beispiel Kupfer.

<sup>1</sup> Die Details zu den Berechnungen sind in den Datenblättern zu den 4 Metallen auf der Website [www.ecoinvent.ch](http://www.ecoinvent.ch) zu finden.

<sup>2</sup> Da Neodym bei der Erzeugung eines von mehreren Nebenprodukten beim Abbau von Monazit und Bastnäsit ist, werden ihm bei den Berechnungen nur 41% der gesamten Umweltauswirkungen zugewiesen.

<sup>3</sup> Die Jahresproduktion von Neodym wird nicht einzeln ausgewiesen. Die Gruppe der Seltenen Erden umfasst zusammen 130 000 Tonnen.



# Material

**Die gesamte Menge an biotischem und abiotischem Material, welche im Jahr 2007 abgebaut und in Produkte und Dienstleistungen eingebunden wurde, wird auf rund 60 Milliarden Tonnen geschätzt (SERI 2010). Diese Menge erhöht sich auf 120 bis 180 Milliarden Tonnen, wenn zusätzlich das ungenutzte Material berücksichtigt wird. Bestehende Indikatoren zur Materialnutzung erfassen und messen Art und Menge der Materialien, verzichten aber meist darauf, die damit verbundenen vielfältigen Umweltbelastungen zu beschreiben.**

Je grösser die abgebaute Menge an Material, desto schwerwiegender der Effekt auf die Ökosysteme. Dieser Gedanke liegt der Metapher des «ökologischen Rucksacks» zugrunde. Der Definition nach erfasst der ökologische Rucksack alle Stoffströme, die für die Herstellung eines Produktes notwendig sind. Das Eigengewicht des Produktes wird dabei nicht berücksichtigt (Schmidt-Bleek 1994). In Bezug auf Aussagen zu Umweltbelastungen ist das Konzept vereinfachend, da die Materialströme nur quantitativ erfasst werden, qualitative Stoffmerkmale wie zum Beispiel die Toxizität eines Stoffes jedoch vernachlässigt werden. Trotz dieser Vereinfachung bildet die Methode des ökologischen Rucksacks die Grundlage für eine Reihe von Indikatoren (zum Beispiel MIPS, Gesamtmaterialaufwand TMR, Direkter Material Input DMI<sup>4</sup>). Der Hauptunterschied zwischen den einzelnen Indikatoren liegt dabei in der gewählten Systemgrenze: Je nach deren Auswahl fokussieren die Indikatoren entweder auf die Makroebene (zum Beispiel TMR für Länder, Volkswirtschaften) oder die Mikroebene (zum Beispiel MIPS für Dienstleistungen) und berücksichtigen mehr oder weniger Materialkategorien.

## MIPS

Der Indikator «Material-Input pro Serviceeinheit» (MIPS) misst den Verbrauch an Materialien für eine Dienstleistung (Service). Produkte sind in dieser Sichtweise «Dienstleistungserfüllungsmaschinen» (Schmidt-Bleek 2007). Der MIPS berücksichtigt fünf Arten von Materialkategorien:

- abiotisches Material; inklusive mineralischer Rohstoffe, fossiler Treibstoffe und Bodenaushub,
- biotisches Material,
- Bodenbewegungen in Land- und Forstwirtschaft, inklusive Erosion,
- Wasser aus Oberflächengewässern, Grund- und Tiefenwasser sowie
- Luft im Zusammenhang mit Verbrennungsprozessen und chemischer oder physikalischer Umwandlung.

Der MIPS erfasst direkte wie auch indirekte Materialinputs (siehe Abbildung 1, Seite 5). Für ein Produkt bedeutet dies: Eigengewicht plus Rucksack. Der Materialinput ist dabei definiert als die gesamte Menge an Material, die über den ganzen Lebenszyklus des Produktes hinweg bewegt wird. Der Begriff Material umfasst beim MIPS auch die fossilen Energieträger sowie Wasser und Luft. Die Grundlagen für die Berechnung des MIPS werden vom Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH zur Verfügung gestellt (Wuppertal Institut 2011).

---

<sup>4</sup> Weitere Informationen zu den Indikatoren TMR und DMI sind unter folgender Webadresse zu finden: <http://www.eea.europa.eu/publications/signals-2000/page017.html>.

Gemäss MIPS verbraucht die Produktion von 1 Kilogramm Platin etwa 530 Tonnen Material (siehe Abbildung 2, rote Balken). Für 1 Kilogramm Kupfer liegt der Wert fast drei Grössenordnungen darunter (0,7 Tonnen). Für Lithium und Neodym liegen keine MIPS-Werte vor.

Der Vergleich der beiden MIPS-Werte mit einer zusätzlich berechneten Materialsumme gemäss ecoinvent-Daten (siehe Abbildung 2, hellrote Balken) zeigt, dass sich die Ergebnisse in einer ähnlichen Grössenordnung bewegen. Die MIPS-Werte, welche im Unterschied zur Materialsumme das Eigengewicht des Produktes mit einbeziehen, weisen dabei höhere Materialmengen aus. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass der

MIPS nebst den abiotischen und biotischen Materialien zusätzlich die Ressourcen Wasser und Luft mitberücksichtigt.

Die Stärke des MIPS ist, dass er gut nachvollziehbar und leicht anwendbar ist. Seine Schwäche liegt darin, dass er sehr stark vereinfacht. So werden unterschiedliche Materialien in einer einzigen Kenngrösse zusammengefasst. Durch die Vernachlässigung qualitativer Aspekte liefert der MIPS letztlich kein differenziertes Bild der Umweltbelastungen, die mit der Materialnutzung einhergehen.

<b>Material</b>	<b>Fläche</b>
<b>Wasser</b>	<b>Energie</b>

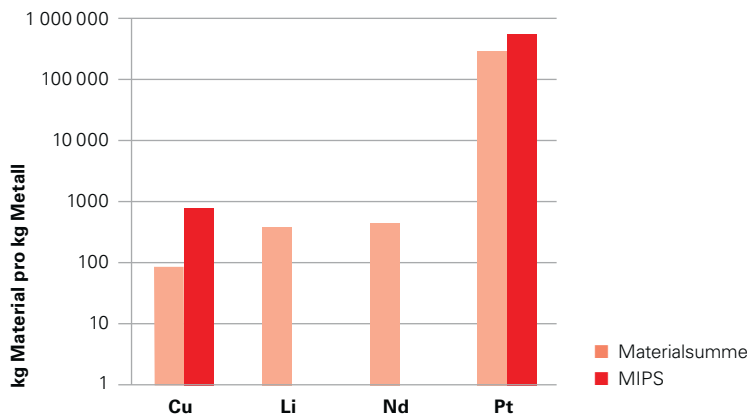
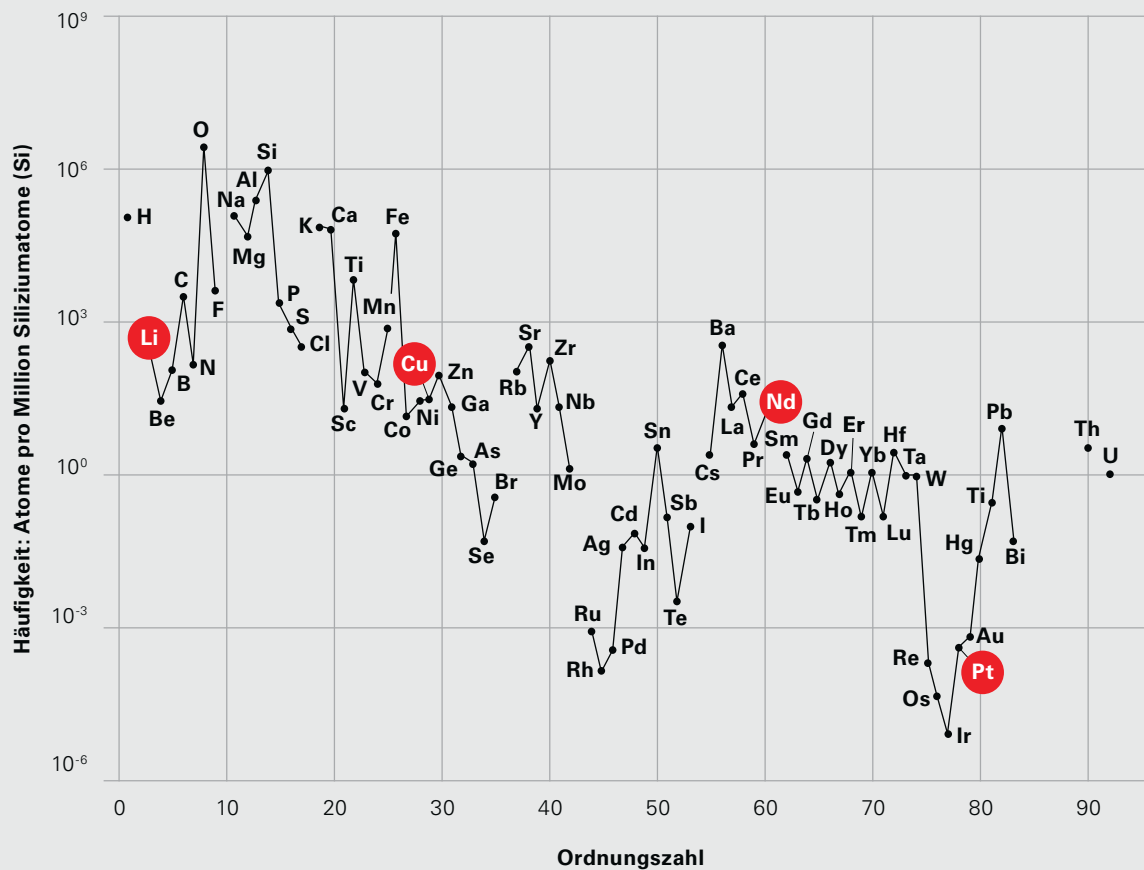


Abbildung 2. Vergleich zwischen MIPS (rot, Daten aus Wuppertal Institut 2011) und der Summe der indirekt verbrauchten Materialien (hellrot) gemäss ecoinvent (2010), logarithmische Darstellung. Die MIPS-Werte für Lithium und Neodym fehlen.



### Elementhäufigkeit in der oberen Erdkruste



Die Abbildung stellt die Häufigkeit verschiedener Elemente in der oberen Erdkruste als Anzahl Atome pro Million Siliziumatome dar. Von den vier in der Broschüre betrachteten Metallen (rot markiert) ist Lithium am häufigsten, gefolgt von Kupfer und Neodym, die um eine beziehungsweise zwei Größenordnungen seltener sind. Eines der seltensten Metalle ist

Platin. Bei den in dieser Broschüre angewendeten Indikatoren schneiden die häufigeren Metalle (Cu, Li, Nd) bezüglich Verbrauch an natürlichen Ressourcen und den dadurch induzierten Umweltauswirkungen besser ab. (Quelle: Wikipedia, angepasst nach USGS (2002), Rare Earth Elements – Critical Resources for High Technology, Fact Sheet 087-02)



# Fläche

**Die Landfläche der Erde misst knapp 150 Millionen Quadratkilometer, das entspricht etwa 30 Prozent der gesamten Erdoberfläche. Der Druck auf die Ressource Land steigt durch menschliche Bedürfnisse wie Mobilität, Ernährung, Wohnen und Erholung einer wachsenden Weltbevölkerung. Erforderlich ist deshalb ein einfach einsetzbares Instrument, um den Flächenverbrauch für Produkte und Dienstleistungen zu bestimmen.**

Der Abbau von Rohstoffen, zum Beispiel Erzen, beansprucht Land. Abhängig von flächenspezifischen Eigenschaften wie zum Beispiel der Vegetation, der Bodenbeschaffenheit oder der Nutzung führt ein Eingriff in eine Fläche zu mehr oder minder starken Umweltauswirkungen. Ob beispielsweise Kupfer im Regenwald oder auf einer Wüstenfläche gefördert wird, wirkt sich sehr unterschiedlich auf die biologische Vielfalt und die Leistungen der Ökosysteme (zum Beispiel die Produktion von Biomasse) aus. Eine rein quantitative Aufsummierung der genutzten Flächen greift aus ökologischer Sicht deshalb zu kurz. Erforderlich ist auch eine Bewertung der Flächen aufgrund qualitativer Merkmale. Zwei bestehende Methoden werden nachfolgend skizziert: Der Ökologische Fussabdruck, welcher verbreitet Anwendung findet, sowie exemplarisch ein in der Ökobilanzierung entwickelter Flächenindikator.

## Ökologischer Fussabdruck

Der Ökologische Fussabdruck (Englisch: Ecological Footprint) wurde in den 1990er-Jahren von Mathis Wackernagel und William Rees entwickelt und ist heute eine international verbreitete Methode, um die Nutzung natürlicher Ressourcen darzustellen (Wackernagel et al. 2005). Er bezeichnet die biologisch produktive Fläche, die für die Aktivitäten zum Beispiel eines Individuums oder innerhalb eines Landes in einem bestimmten Zeitraum benötigt wird, um alle konsumierten Produkte und Dienstleistungen zu erzeugen und die anfallenden Abfälle zu absorbieren. Masseinheit ist der globale Hektar (gha), welcher die durchschnittliche Produktivität der biologisch produktiven Erdoberfläche pro Hektar in einem Jahr

beschreibt. Wird die Methode auf geografische Räume angewendet, lässt sich nicht nur die Ressourcennutzung abschätzen, sondern diese auch mit der entsprechenden vorhandenen Kapazität an natürlichen Ressourcen vergleichen.

Der Ökologische Fussabdruck erfasst den Flächenverbrauch für folgende Nutzungstypen: Ackerland, Weideland, Fischgründe, Nutzwald und überbautes Land (direkt berechneter Flächenverbrauch). Für jeden Nutzungstypen stellt die Methode einen Faktor bereit, um die jeweilige, zeitlich und räumlich variierende Produktivität in eine vergleichbare Masseinheit (globaler Hektar) umzurechnen. Als weiterer Nutzungstyp wurde eine virtuelle «CO<sub>2</sub>-Fläche» eingeführt. «CO<sub>2</sub>-Fläche» steht für die Wald- und Ozeanfläche, die erforderlich wäre, um die bei der Nutzung fossiler Energie frei gewordene Menge Kohlendioxid wieder zu binden (indirekt berechneter Flächenverbrauch). Der Anteil der «CO<sub>2</sub>-Fläche» am globalen Flächenverbrauch ist beträchtlich: Für das Jahr 2007 betrug er rund 50 Prozent.

Die Berechnung des Ökologischen Fussabdrucks der weltweiten Produktion von Kupfer, Lithium und Platin im Jahr 2010 zeigt, dass Kupfer insgesamt deutlich mehr Ressourcen (in globalen Hektar) verbraucht als Platin und Lithium (siehe Abbildung 3). Anders hingegen sieht das Bild aus, wenn die Auswirkungen der Produktion von jeweils einem Kilogramm Metall berechnet werden: Die Flächennutzung (in globalen Hektar mal Jahr<sup>5</sup>) ist bei Platin um drei bis vier Größenordnungen höher als für Kupfer, Lithium und Neodym (siehe Abbildung 4).

Bei allen betrachteten Metallen ist der weitaus grösste Anteil des Flächenverbrauchs beziehungsweise der Flächennutzung auf die Kompensation des Verbrauchs an fossiler Energie (CO<sub>2</sub>-Fläche) zurückzuführen. Eine wichtige Rolle spielt auch die Fläche zur Kompensation des Verbrauchs an nuklearer Energie, welche in der verwendeten Ökobilanz-Datenbank ecoinvent zusätzlich ausgewiesen wird<sup>6</sup>.

Material	Fläche
Wasser	Energie

Der Ökologische Fussabdruck hat sich in den letzten Jahren als Methode etabliert. Seine grosse Stärke ist seine intuitive Zugänglichkeit. Dennoch erfordert er ein gewisses Mass an Abstraktionsfähigkeit, weil er zwischen direkt und indirekt berechneten Flächen unterscheidet.

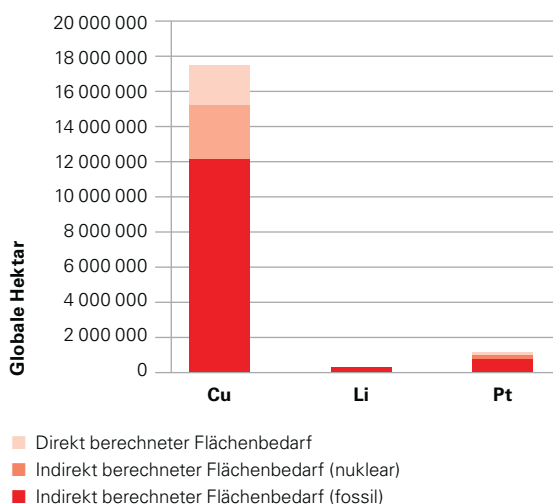


Abbildung 3. Ökologischer Fussabdruck in Millionen globaler Hektar für die gesamte, weltweite Produktion 2010 (siehe Tabelle 1) der Metalle Kupfer, Lithium und Platin (Daten aus ecoinvent (2010)). Für Neodym sind keine spezifischen Zahlen zur Weltjahresproduktion verfügbar.

### Flächenindikator in ReCiPe

ReCiPe ist eine umfassende Bewertungsmethode bei Ökobilanzen, die mehrere Indikatoren zur Abschätzung unterschiedlicher Umweltbelastungen zusammenführt (Goedkoop et al. 2009). Einer der in ReCiPe verwendeten Indikatoren bezeichnet die Umweltbelastung, die durch die Nutzung einer Fläche entsteht, indem der potentielle Anteil der durch die Nutzung verlorengegangenen Arten (gemessen als Arten mal Jahr) berechnet wird (De Schryver und Goedkoop 2009). Grundlage für die Berechnung des Artenverlustes ist die Landnutzung, welche nicht nur über den Nutzungstyp und die Fläche, sondern auch über die Zeitdauer definiert ist. Als Referenz dient die ungenutzte Fläche. ReCiPe als Methode wird weltweit angewendet, bislang stützt sich der Flächenindikator allerdings erst auf Daten der Pflanzenvielfalt von Landnutzungstypen in Grossbritannien.

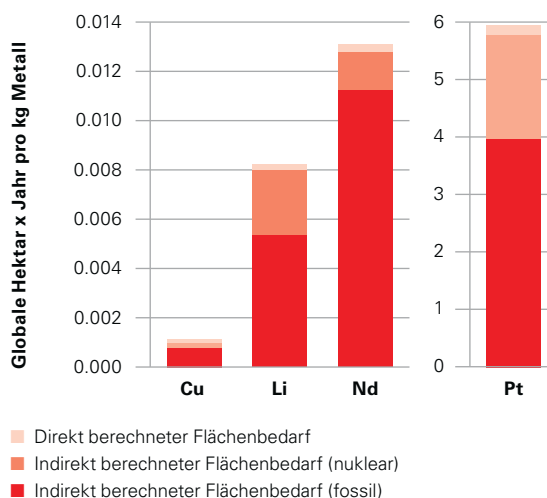


Abbildung 4. Ausmass der mit der Herstellung von jeweils 1 Kilogramm Metall einhergehenden Flächennutzung (Daten aus ecoinvent (2010)).

<sup>5</sup> Diese Einheit resultiert daraus, dass die Methode des Ökologischen Fussabdrucks auf eine Aktivität pro Zeitperiode (Jahr) ausgerichtet ist, hier aber eine zeitunabhängige Bezugsgrösse (1 kg Metall) verwendet wird.

<sup>6</sup> Analog zur fossilen Energie wurden bei der Implementierung des Ökologischen Fussabdrucks in die Ökobilanz-Datenbank ecoinvent auch der Verbrauch nuklearer Energie auf eine Fläche abgebildet. Die nuklear erzeugte Energiemenge wurde dazu über die Energiedichte von fossilen Energieträgern (Megawattstunden pro Kilogramm) in eine äquivalente Menge fossiler Treibstoffe umgerechnet.

Wie in Abbildung 5 ersichtlich, fällt der berechnete potentielle Artenverlust bei der Produktion von Kupfer und Lithium etwa gleich hoch aus, für Neodym liegt er eine Grössenordnung darüber<sup>7</sup>. Die Werte für Platin übertreffen die der anderen Metalle wiederum um zwei bis drei Grössenordnungen.

<b>Material</b>	<b>Fläche</b>
<b>Wasser</b>	<b>Energie</b>

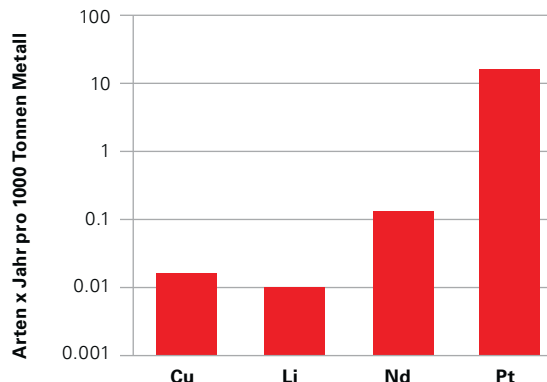
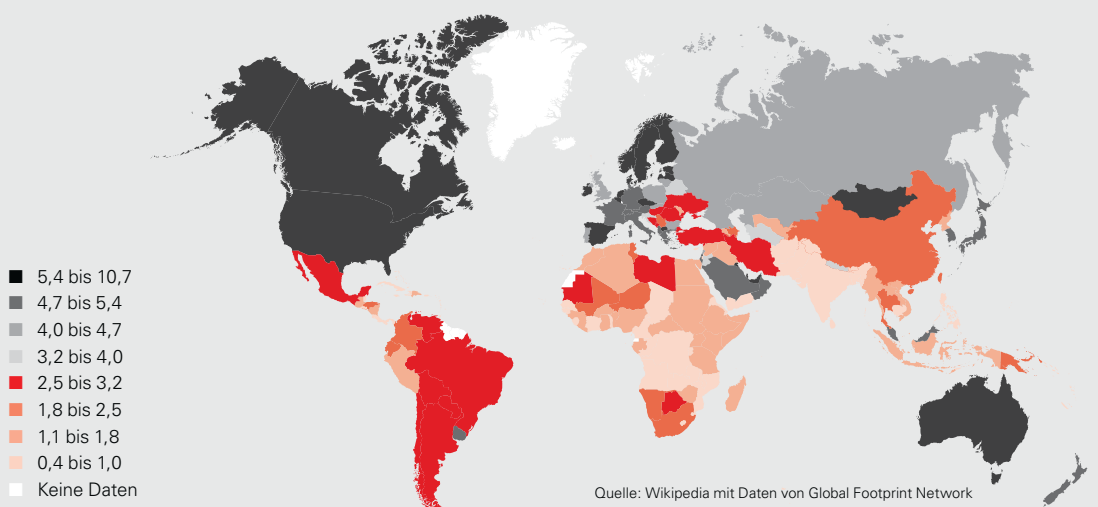


Abbildung 5 zeigt den Artenverlust, der auf die Herstellung jedes der vier Metalle zurückzuführen ist (logarithmische Darstellung, Daten aus ecoinvent 2010).

<sup>7</sup> Der ReCiPe-Flächenindikator ist in ecoinvent implementiert.

### Ökologischer Fussabdruck pro Person im Jahr 2007 (in globalen Hektaren)



Ein Mensch konsumiert während eines Jahres eine bestimmte, durchschnittliche Anzahl Produkte und Dienstleistungen. Der Ökologische Fussabdruck beschreibt, wie viele Hektaren biologisch produktiver Fläche zu deren Erzeugung erforderlich sind. Im Jahr 2007 betrug der Ökologische Fussabdruck pro Person weltweit 2,7 globale Hektaren (gha). Die Biokapazität, das heisst die Fähigkeit von Ökosystemen, biologisch nutzbringendes Material zu produzieren und von Menschen produzierten Abfall unter

heutigen Bedingungen aufzunehmen, lag allerdings bei nur 1,8 gha. Damit nutzen die Menschen heute 1,5 Planeten oder die Erde benötigt anders ausgedrückt rund ein Jahr und sechs Monate um den Jahresverbrauch der Menschheit zu decken.

Den grössten Ökologischen Fussabdruck verzeichneten 2007 die Vereinigten Arabischen Emirate mit fast 11 gha pro Person. Die Schweiz «verbraucht» pro Person 5 gha, China 2,2 gha und Indien etwa 1 gha.



## Energie

**Der globale Energieverbrauch wird heute zu rund 80 Prozent aus fossilen Quellen gedeckt (IEA 2010). Als geeigneter Indikator für die Bestimmung der Umweltbelastung durch die Nutzung fossiler Energieträger erweisen sich Kohlendioxidemissionen (CO<sub>2</sub>). Im Jahr 2007 belief sich der gesamte anthropogene CO<sub>2</sub>-Ausstoss gemäss IPCC<sup>8</sup> auf etwa 31 Gigatonnen oder gut 4 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Person. Als Standard für die Abschätzung des Treibhaus-effekts hat sich die Methode «GWP 100 Jahre» des IPCC etabliert.**

Das bei der Verbrennung von fossilen Energieträgern emittierte Kohlendioxid ist für knapp 60 Prozent der anthropogenen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Die restlichen 40 Prozent stammen von Kohlendioxid aus anderen Quellen, Methan, Lachgas, Fluorchlorkohlenwasserstoffen und weiteren Treibhausgasen (IPCC 2007a). Die Energienutzung ist folglich eng mit der Klimafrage gekoppelt. Als Indikator für den Energieverbrauch liefert die Methode «Global Warming Potential 100 Jahre» (GWP, zu Deutsch: Treibhauspotential) eine gute Grundlage, da sie unter anderem das Treibhauspotential der CO<sub>2</sub>-Emissionen beschreibt (IPCC 2007b).

### GWP 100 Jahre

Die Methode «GWP 100 Jahre» beschreibt, wie gross der Klimaeffekt einer bestimmten Menge eines Treibhausgases über einen Zeitraum von 100 Jahren ist. Als Referenzwert dient das Treibhauspotential von einem Kilogramm Kohlendioxid, weshalb der mittlere Klimaeffekt aller anderen Treibhausgase in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>e) angegeben wird. Für Methan beispielsweise gibt das IPCC ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent von 21 an. Dies bedeutet, dass die Emission von einer Tonne Methan über 100 Jahre

betrachtet denselben Treibhauseffekt hat wie der Ausstoss von 21 Tonnen Kohlendioxid. Liegt der Fokus, wie hier, auf der Energiefrage, dann interessieren jedoch primär die CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Kohlendioxid macht über 90 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen der Herstellung der vier Metalle aus (siehe Abbildung 6). Platin liegt mit einem CO<sub>2</sub>-Ausstoss von knapp 15 Tonnen pro Kilogramm Metall drei bis vier Grössenordnungen über den Emissionsmengen von Kupfer, Lithium und Neodym. Auffallend ist, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Kilogramm Kupfer mit 2,8 Kilogramm etwa eine Grössenordnung niedriger liegen als die von Lithium, und diese wiederum etwa halb so gross sind wie die von Neodym.

Die Methode «GWP 100 Jahre» ist wissenschaftlich gut abgesichert und wird weltweit verwendet. Ihre Anwendung ist durch verschiedene Standards geregelt (zum Beispiel der britische Standard PAS 2050<sup>9</sup>).

Material	Fläche
Wasser	Energie

<sup>8</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change; siehe <http://www.ipcc.ch/>.

<sup>9</sup> Nähere Informationen zum Standard finden sich unter <http://www.bsigroup.com/Standards-and-Publications/How-we-can-help-you/Professional-Standards-Service/PAS-2050>.

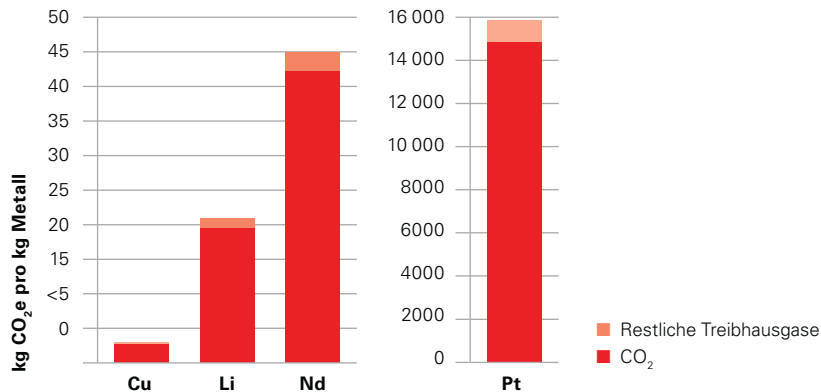
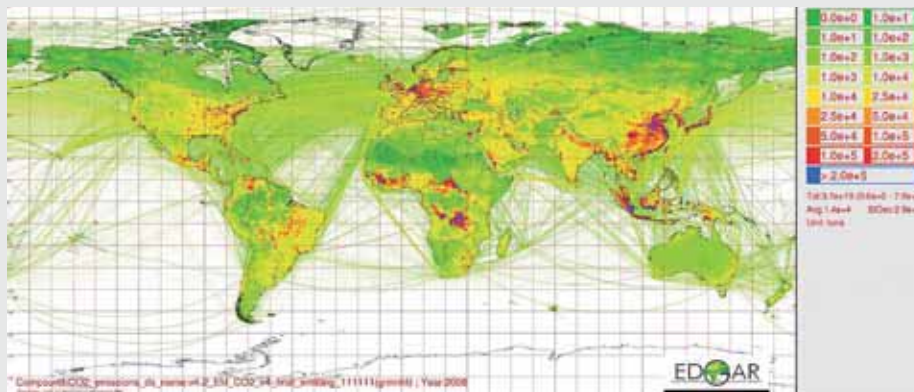


Abbildung 6. Treibhausgasemissionen in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (CO<sub>2</sub>e) pro Kilogramm produzierter Metalle gemäss der Methode «GWP 100 Jahre» nach IPCC (2007b). Daten aus ecoinvent (2010).

### Wo wird wie viel Kohlendioxid ausgestossen?



Quelle: European Commission, Joint Research Centre (JRC)/Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL). Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), release version 4.2. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>, 2011.

Die Abbildung zeigt die globalen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen für das Jahr 2005, die vom europäischen Forschungsprojekt EDGAR<sup>10</sup> ermittelt wurden. Auffallend sind die Gebiete in Nordamerika, Westeuropa, China und Japan, welche grossflächig einen CO<sub>2</sub>-Ausstoss von über 50 000 Tonnen pro Jahr und Zelle auf-

weisen (zum Vergleich: Pro Kopf wurden in der Schweiz im Jahr 2009 ca. 5,6 Tonnen CO<sub>2</sub>-emittiert<sup>11</sup>). Eine Zelle misst 0,1° x 0,1°, was ungefähr 10 km x 10 km entspricht. Die Karte zeigt auch deutlich die Emissionen, welche durch den marinen Güterverkehr verursacht werden.

<sup>10</sup> Das Forschungsprojekt EDGAR (<http://edgar.jrc.ec.europa.eu/index.php>) ermittelt räumlich aufgelöst die Emissionen von verschiedenen anthropogenen Schadstoffen. Die Berechnung erfolgt anhand von räumlichen Daten über die Bevölkerungsdichte, die marinen und terrestrischen Verkehrsnetze, die Landwirtschaft, etc.

<sup>11</sup> Diese und weitere Zahlen zu Treibhausgasemissionen in der Schweiz finden sich unter <http://www.bafu.admin.ch/umwelt/status/03985/index.html?lang=de>.





## Wasser

**Schätzungen zufolge liegt die aktuelle globale Süsswassernutzung bei 2600 und die vorge-schlagene Nutzungsobergrenze bei 4000 Kubikkilometern pro Jahr (Rockstrom et al. 2009). Ungeachtet dieser scheinbaren «Wasserreserve» ist die ganzjährige Wasserverfügbarkeit in verschiedenen Regionen der Erde schon heute nicht mehr gesichert. Indikatoren, welche die Wassernutzung und seine Auswirkungen adäquat beschreiben, sind noch in Entwicklung.**

Wie bei den Flächenindikatoren ist es auch für Wasserindikatoren entscheidend, die Auswirkungen der Ressourcennutzung richtig zu beschreiben. Dies geschieht mit Hilfe von Kriterien, die über reine Mengenerfassung hinausgehen, wie zum Beispiel Wasserverschmutzung, Wasserverfügbarkeit oder Herkunft des Wassers.

In den vergangenen Jahren sind verschiedene Initiativen lanciert worden, um geeignete Indikatoren zur Bestimmung der Wassernutzung und ihrer Auswirkungen zu entwickeln und zu etablieren<sup>12</sup>. Einige Konzepte und Indikatoren befinden sich noch in Entwicklung, die Anwendungsmöglichkeiten der bestehenden Indikatoren sind heute noch begrenzt.

### Wasser-Fussabdruck

Einer der bekanntesten Indikatoren für die Süsswassernutzung ist der Wasser-Fussabdruck (Englisch: Water Footprint) von Hoekstra et al. (2011). Die Bezugsgrösse ist das Wasservolumen, zu des-

sen Berechnung und Beschreibung der Indikator mehrere quantitative und qualitative Dimensionen erfasst:

- Direkte und indirekte Wassernutzung: Berücksichtigt werden sowohl Wassermengen, die sich unmittelbar im Produkt befinden, als auch indirekte Flüsse («virtuelles Wasser»). In einer 1l-Flasche Mineralwasser steckt gemäss der Methode also nicht nur das Mineralwasser selbst (direkte Wassernutzung), sondern auch das Wasser zur Reinigung der Flasche (indirekte Wassernutzung).
- Wasserverbrauch (Quantität) und Wasserverschmutzung (Qualität): Es werden drei Wassertypen unterschieden. Grünes Wasser bezieht sich auf Regenwasser, blaues Wasser auf Oberflächen- oder Grundwasser, das verdunstet ist, im Produkt steckt oder dem betrachteten Einzugsgebiet entzogen wird. Das graue Wasser beschreibt den Verschmutzungsgrad des Was-

<sup>12</sup> Siehe zum Beispiel die Arbeitsgruppe der ISO zum Wasser-Fussabdruck (siehe [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=43263](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=43263)) oder die Arbeitsgruppe WULCA (Water Use and Consumption in Life Cycle Assessment) von UNEP/SETAC (siehe [http://lcinitiative.unep.fr/sites/lcinit/default.asp?site=lcinit&page\\_id=2AAEA21D-4907-4E16-BF28-A63C072B6BF7](http://lcinitiative.unep.fr/sites/lcinit/default.asp?site=lcinit&page_id=2AAEA21D-4907-4E16-BF28-A63C072B6BF7)).



sers und symbolisiert die Wassermenge, die notwendig ist, um das verunreinigte Wasser so zu verdünnen, dass ein gegebener Grenzwert eingehalten wird.

Um für eine Region (zum Beispiel für ein Einzugsgebiet eines Baches) zu beurteilen, wie kritisch die Nutzung eines bestimmten Wasservolumens ist, wird letztere mit der Wasserverfügbarkeit verglichen. Weil beide Grössen Schwankungen unterliegen, müssen diese zeitlich und räumlich detailliert erfasst werden.

Der Indikator wurde zunächst auf landwirtschaftliche Produkte und Volkswirtschaften angewendet. Für die industrielle Produktion sowie den Bergbau mangelt es noch an spezifischen Daten. Hier kann deshalb lediglich die Summe der direkten und indirekten Wasserinputs für die Herstellung der Metalle gemäss ecoinvent ausgewiesen werden (siehe Abbildung 7). Die Herstellung von je einem Kilogramm Kupfer, Lithium oder Neodym benötigt ungefähr 100 Kubikmeter Wasser. Für ein Kilogramm Platin hingegen wird eine Wassermenge, die um drei Grössenordnungen höher liegt (90 000 m<sup>3</sup>), verbraucht.

Obwohl die methodischen Grundlagen für Indikatoren zur Wassernutzung vorhanden sind, scheitert ihre Anwendung in Bereichen wie der industriellen Produktion häufig an Datenlücken, beispielsweise für den Bergbau. In bestehenden Ökobilanz-Datenbanken wurden bisher keine detaillierten Wasserdaten erfasst. Dies wird sich jedoch mit der neuen Version von ecoinvent, ecoinvent 3.0, ändern.

Material	Fläche
Wasser	Energie

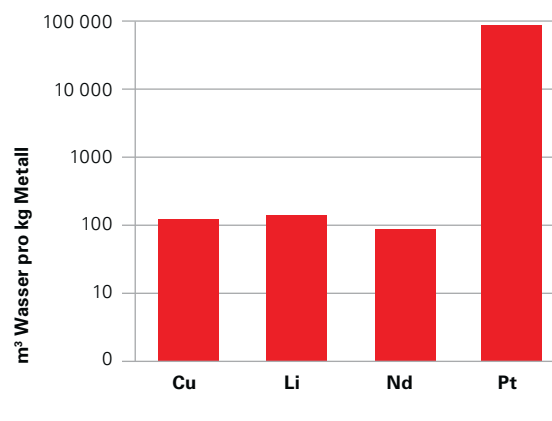
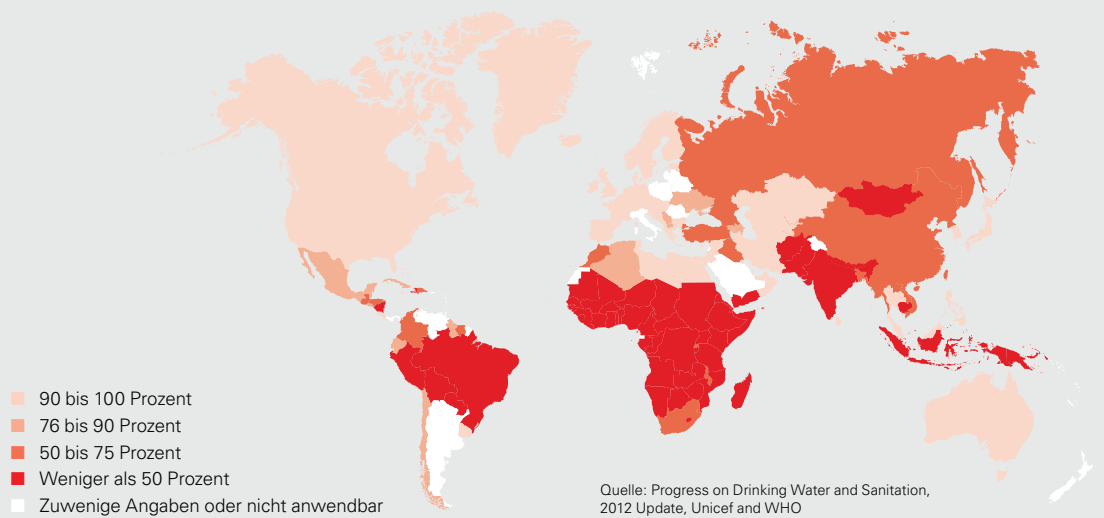


Abbildung 7. Logarithmische Darstellung der benötigten Wassermenge gemäss ecoinvent (2010).



### Sanitäre Anlagen auf dem Land



Der Zugang zu sauberem Trinkwasser und zu sanitären Anlagen ist ein wichtiger Faktor für die Hygiene und Gesundheit des Menschen. In vielen Entwick-

lungsländern haben weniger als 50 Prozent der Landbevölkerung Zugang zu sanitären Anlagen (Angaben aus dem Jahr 2010).

## Fazit

Je intensiver und globaler die menschlichen Eingriffe in die Natur, desto komplexer und unübersichtlicher sind die Wechselwirkungen zwischen Mensch und Umwelt. Geeignete Indikatoren helfen, die Auswirkungen menschlichen Tuns zu verstehen und zu beurteilen, um schliesslich Massnahmen für einen nachhaltigeren Umgang mit der Umwelt zu finden.

In der vorliegenden Broschüre wurden gängige Methoden und Indikatoren für die vier natürlichen Ressourcenkategorien Material, Fläche, Wasser und Energie vorgestellt und beispielhaft auf die Herstellung je eines Kilogramms der Metalle Kupfer, Lithium, Neodym und Platin aus primären Ressourcen angewendet. Die Anwendung der Indikatoren auf die vier genannten Metalle führte zu ähnlichen Rangordnungen bezüglich Ressourcenverbrauch und Umweltauswirkungen: Die mit Abstand grössten Ressourcenverbräuche beziehungsweise Umweltauswirkungen sind mit der Produktion eines Kilogramms Platin verbunden. Wird hingegen – wie am Beispiel des Ökologischen Fussabdrucks gezeigt – die Weltjahresproduktion der jeweiligen Metalle betrachtet (siehe Tabelle 1 auf Seite 5), zieht nicht Platin, sondern Kupfer die grössten Ressourcenverbräuche beziehungsweise Umweltauswirkungen nach sich (siehe dazu auch Hertwich et al. (2010)).

Grundsätzlich gilt es bei Indikatoren zur Beurteilung der Nutzung natürlicher Ressourcen Folgendes zu beachten: Die Indikatoren fokussieren jeweils auf einen anderen Aspekt der Wirklichkeit, als würde man eine Szene aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten. Sie beruhen zudem auf unterschiedlichen Methoden mit spezifischen Annahmen und Vereinfachungen, wodurch sie den Anforderungen bezüglich Gültigkeit, Repräsentativität, Zuverlässigkeit, Richtungssicherheit, Transparenz, Zugänglichkeit, Nachvollziehbarkeit und Anwendbarkeit in unterschiedlichem Masse gerecht werden (siehe zum Beispiel Wäger et al. (2010)).

Der Indikator **MIPS** erfasst ausschliesslich den Materialverbrauch und nicht dessen Umweltauswirkungen. Die ihm zugrunde liegende Idee des **«ökologischen Rucksacks»** lässt sich einfach interpretieren und seine Anwendung ist vergleichsweise einfach. Allerdings darf MIPS nicht pauschal als Indikator für die Umweltauswirkungen des Materialverbrauchs verstanden werden.

Der **Ökologische Fussabdruck** berücksichtigt erneuerbare Ressourcen, ausgedrückt als Nutzung biologisch aktiver Fläche. Ein grosser Vorteil der Metapher des Fussabdrucks ist, dass sie einem breiten Publikum intuitiv zugänglich ist. Angewendet auf Regionen und Länder lassen sich zeitliche Entwicklungen gut abbilden. Die Methode erfordert jedoch ein gewisses Mass an Abstraktionsfähigkeit, weil sie zwischen direkt und indirekt berechneten Flächen unterscheidet. Kompensationsflächen für CO<sub>2</sub>-Emissionen tragen bei den vier untersuchten Metallen rund 90 Prozent und mehr zum Ergebnis bei.

Der in der speziell für Ökobilanzierungen entwickelten **ReCiPe-Bewertungsmethode** enthaltene Flächenindikator beschreibt explizit die Umweltauswirkung Biodiversitätsverlust durch Flächennutzung. Die Datengrundlage der Methode ist geografisch limitiert, was die weltweite Anwendung in Frage stellt. Mangels Alternativen greifen Ökobilanzexperten dennoch häufig auf den ReCiPe-Flächenindikator zurück – und nehmen seine Schwächen in Kauf.

Der Zweck des Indikators **«GWP 100 Jahre»** ist die Abschätzung des Erderwärmungspotentials von Treibhausgasen über einen Zeitraum von 100 Jahren. Weil der Indikator auf CO<sub>2</sub>-Emissionen normiert ist, wird er häufig speziell für die fossile Energienutzung angewendet. «GWP 100 Jahre» misst allerdings ausschliesslich den fossilen, nicht jedoch den regenerativen Anteil. Die Methode ist wissenschaftlich sehr gut fundiert, zuverlässig und einfach anwendbar.



Der Indikator **Wasser-Fussabdruck** zielt auf die konsumierte und die verschmutzte Wassermenge. Der Zweck des Indikators ist die Beurteilung der Wasserverfügbarkeit in Einzugsgebieten. Der Indikator ist zwar leicht nachzuvollziehen, die Umweltauswirkungen sind jedoch nur implizit enthalten (als «graues» Wasser). Aufgrund fehlender Daten ist seine Anwendung zum Beispiel im Bergbausektor noch nicht möglich.

Die in der Broschüre beschriebenen Indikatoren werden schon heute in Entscheidungsprozessen eingesetzt. Beispielsweise hat «GWP 100 Jahre» eine praktische Anwendung in der schweizerischen Gesetzgebung<sup>13</sup> zur Besteuerung von Treibstoffen gefunden. Gemäss der Mineralölsteuerverordnung

sind Treibstoffe aus erneuerbaren Rohstoffen (Biotreibstoffe) von der Mineralölsteuer befreit, sofern sie gewisse Nachhaltigkeitskriterien erfüllen. Das erste Kriterium für eine Steuerbefreiung besagt, dass ein Biotreibstoff im Vergleich zu Benzin vom Anbau bis zum Verbrauch mindestens 40 Prozent weniger Treibhausgasemissionen verursachen muss. Gemäss den beiden weiteren Kriterien darf ein Biotreibstoff die Umwelt vom Anbau bis zum Verbrauch ausserdem nicht erheblich mehr belasten als fossiles Benzin (<125%<sup>14</sup>) und die Erhaltung der Regenwälder sowie die biologische Vielfalt nicht gefährden. Grundlage für diese Gesetzgebung war eine Studie im Auftrag von mehreren involvierten Bundesämtern, in welcher existierende Biotreibstoffe ökologisch bewertet wurden (Zah 2007).

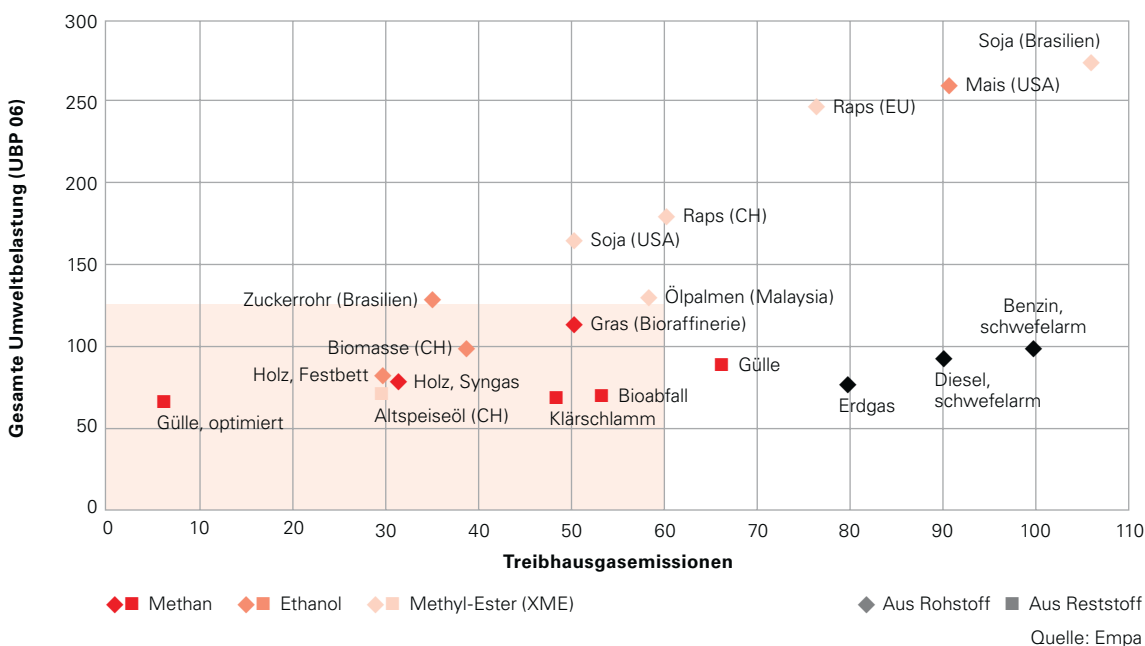


Abbildung 8. Treibhausgasemissionen und Umweltbelastung von Biotreibstoffen gegenüber Benzin. Treibstoffe im rot unterlegten Bereich erfüllen die Mindestanforderungen zur Mineralölsteuerbefreiung sowohl für Treibhausgasemissionen als auch für die gesamte Umweltbelastung, gemessen in Umweltbelastungspunkten UBP (Zah et al., 2007).

<sup>13</sup> Nähere Informationen dazu sind im Mineralölsteuergesetz (MinöStG), in der Mineralölsteuerverordnung (MinöStV) und in der Treibstoff-ökobilanz-Verordnung, (TrÖbiV) zu finden.  
<sup>14</sup> Diese Bewertung wurde mit Hilfe der für Ökobilanzierungen entwickelten Methode der Umweltbelastungspunkte (UBP) vorgenommen (siehe <http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01031/index.html?lang=de>).



Nicht nur die Politik bedient sich der Indikatoren zur Nutzung natürlicher Ressourcen. Das Spektrum der Anwender reicht heute schon von Einzelpersonen (zum Beispiel bei Kaufentscheiden) über Unternehmen (zum Beispiel bei der Verbesserung von Produktionsprozessen) bis zu Nationen oder Staatengemeinschaften (zum Beispiel bei politischen Entscheidungen zur Förderung neuer Technologien).

Der Anwender eines Indikators muss sich bewusst sein, dass jeder Indikator methodisch bedingt seine eigenen Stärken und Schwächen beziehungsweise Möglichkeiten und Grenzen aufweist. Für die Wahl eines geeigneten Indikators oder einer Kombination von Indikatoren ist letztlich immer der jeweilige, spezifische Anwendungskontext ausschlaggebend. Wesentliche Voraussetzung für eine sinnvolle Auswahl ist in jedem Fall eine fundierte, präzise Definition der im Hinblick auf eine nachhaltigere Nutzung unserer natürlichen Ressourcen zu erreichenden (Zwischen-)ziele, die wir auf dem Weg zu einer nachhaltigeren Nutzung unserer natürlichen Ressourcen erreichen wollen.

### **Impressum**

Autoren: Fabian Blaser, Patrick Wäger und Heinz Böni, Empa

Redaktionelle Mitarbeit: Bert Beyers, Beatrice Huber

Review: Hans Hänni, Christian Ludwig, Sonja Studer, Ulrich W. Suter, Urs von Stockar, Andreas Zuberbühler

Bilder, Illustrationen: Fotolia, Andy Braun

Akademien der Wissenschaften Schweiz

c/o Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften SATW

1. Auflage, Juni 2012

# Literatur

ecoinvent 2010, ecoinvent data v2.2, ecoinvent reports No.1-25, St. Gallen: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org)

Fischer-Kowalski, M., Haberl, H., Hüttler, W., Payer, H., Schandl, H., Winiwarter, V. und Zangerl-Weisz, H., 1997, Gesellschaftlicher Stoffwechsel und Kolonisierung von Natur, G+B Verlag

Fullana P., Betz M., Hirschier R. und Puig R., 2009. Life Cycle Assessment Applications: results from COST action 530. AENOR/Emerald Group Publishing, Madrid.

Gabrielsen, P. und Bosch, P., 2003, Environmental Indicators: Typology and Use in Reporting, European Environment Agency EEA

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregt, M., De Schryver, A., Struijs, J. und van Zelm, R., 2009, ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation, VROM – Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, [www.lcia-recipe.net](http://www.lcia-recipe.net)

Hertwich, E., van der Voet, E., Suh, S. und Tukker, A., 2010, Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials, New York: United Nations Environment Programme

Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M. und Mekonnen, M.M., 2011, The Water Footprint Assessment Manual – Setting the Global Standard, Earthscan, [www.waterfootprint.org/?page=files/WaterFootprintAssessmentManual](http://www.waterfootprint.org/?page=files/WaterFootprintAssessmentManual)

IEA, 2010, Key World Energy Statistics 2010, Paris, France: International Energy Agency

IPCC, 2007a, Climate Change 2007: Synthesis Report, Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC

IPCC 2007b, Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge, UK and New York, USA, Cambridge University Press

Journard, R. und Gudmundsson, H., 2010, Indicators of environmental sustainability in transport: An interdisciplinary approach to methods, Les Collections de l'INRETS

Rockstrom, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F.S., Lambin, E.F., Lenton, T.M., et al., 2009, «A safe operating space for humanity», *Nature* 461 (7263): 472-475, doi:10.1038/461472a

Schmidt-Bleek, F., 1994, «Wie viel Umwelt braucht der Mensch – MIPS, das ökologische Mass zum Wirtschaften», Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser

Schmidt-Bleek, F., 2007, «Nutzen wir die Erde richtig?», Forum für Verantwortung, Frankfurt a.M.: Klaus Wiegandt  
De Schryver, A. und Goedkoop, M., 2009, Impacts of Land Use, In ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level; First edition Report I: Characterisation, VROM – Ruimte en Milieu, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer, [www.lcia-recipe.net](http://www.lcia-recipe.net)

SERI, 2010, Global resource extraction by material category 1980-2007, [www.materialflows.net](http://www.materialflows.net)

UBA, 2012, Glossar zum Ressourcenschutz, Umweltbundesamt, Dessau-Rosslau, Deutschland, [www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4242.pdf](http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/4242.pdf)

USGS, 2010, Mineral commodity summaries 2011, Reston, Virginia, U.S. Geological Survey

Wackernagel, M., Monfreda, C., Moran, D., Wermer, P., Goldfinger, S., Deumling, D. und Murray, M., 2005, National Footprint and Biocapacity Accounts 2005: the Underlying Calculation Method, Global Footprint Network, Oakland, USA

Wäger, P., Calderon, E., Arce, R., Kunicina, N., Journard, R., Nicolas, J.-P., Tennøy, A., et al., 2010, Methods for a joint consideration of indicators, In Indicators of environmental sustainability in transport, Bron, France: Les Collections de l'INRETS

Wuppertal Institut, 2011, Materialintensität von Materialien, Energieträgern, Transportleistungen, Lebensmitteln, [www.wupperinst.org](http://www.wupperinst.org), Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH

Zah, R., Boeni, H., Gauch, M., Hirschier, R., Lehmann, M. und Wäger, P. 2007. Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen. Empa, BfE, BLW, Bafu, Bern