

EXCERPT aus: Klöpffer, W. und B. Grahl (2009): Ökobilanz (LCA). Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf. Wiley-VCH Verlag, Weinheim

1) Was ist eine Ökobilanz?

Definition und Abgrenzung:

Heute eine über die Normen ISO EN 14040 und 14044 definierte Methode, um Umweltaspekte und Umweltwirkungen von Produktsystemen zu analysieren. Rahmenbedingungen und Methodenentwicklung werden in diesem Kapitel vorgestellt.

In der internationalen Rahmennorm ISO 14040 (ISO 1997) wird Ökobilanz so definiert: „Die Ökobilanz ist eine Methode zur Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potentiellen Umweltwirkungen... Die Ökobilanz-Studie untersucht die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebenswegs eines Produktes (d. h. von der Wiege bis zur Bahre) von der Rohstoffgewinnung, über Produktion, Anwendung bis zur Beseitigung.“

Ähnliche Definitionen gibt es von SETAC (Soc. Of Environmental Toxicology and Chemistry (im “Code of Practice”) und im Grundsatzpapier des DIN-NAGUS (S. 2) sowie in den “Nordic Guidelines” von Skandinavien.

Ökobilanz quantifiziert NUR Umweltwirkungen – nicht ökonomische oder soziale Faktoren, welche aber in der Entwicklung nachhaltiger Produkte mit berücksichtigt werden müssen!

Warum wurde die Ökobilanz entwickelt? → steigende Abfallprobleme (Verpackungsstudien) und Engpässe in der Energieversorgung, Endlichkeit der Ressourcen. Zunächst wurde die Energieanalyse oder Prozesskettenanalyse (zur Ermittlung des „kumulierten Energieaufwandes“) entwickelt, die auch ein wichtiger Teil der Sachbilanz ist.

Lebensweg eines Produkts

Lebensweg als Prozessbaum (sehr vereinfacht) (S. 3): Rohstoff- und Energieträgergewinnung – Transporte – Herstellung der Zwischenprodukte – Transporte – Herstellung des Endproduktes – Transporte – Ge- bzw. Verbrauch (Nutzungsphase) – Transporte – Beseitigung bzw. Verwertung

Nutzen eines Systems ist der Vergleichsmaßstab für Produktvergleiche.

Funktionelle Einheit

Bsp.: 1000 l Flüssigkeit kann unterschiedlich verpackt sein. Vergleich der Verpackungssysteme, die grob gesagt denselben Nutzen haben.

„Produkte“ sind in der Ökobilanz Güter und Dienstleistungen.

Ökobilanz als Systemanalyse

Ökobilanz dient dem Vergleich von Produktsystemen (nicht von Produkten) und basiert auf Systemanalyse. Oft äußerst komplexe Zusammenhänge werden mittels eigener Methoden behandelt. Auswahl und Definition von Systemgrenzen sind daher ganz wichtig!!! Bsp. Handtücher (Stoff vs. Papierhandtuchrolle)!!!

Ökobilanz (LCA) und betriebliche Umweltbilanz

Keine zu engen räumlichen oder zeitlichen Systemgrenzen wählen! Sonst besteht die Gefahr der Problemverschiebung (Beispiele sind Transporte, Auslagerung von Aktivitäten – out sourcing, Abfallentsorgung u. ä.). Bsp.: Auslagerung Kartoffeln waschen → Wasserverbrauch.

Betriebliche Umweltbilanzen sind die Basis für Produktökobilanzen. Könnten die Ergebnisse aus verschiedenen Betrieben zusammengefügt werden, entstünde eine produktbezogene Bilanz. Aus LCA könnte LCM (LC-Management) entstehen.

Historisches: s. S. 7 ff

PLA: Produktlinienanalyse durch das Öko-Institut (1987). Geht über LCA hinaus!

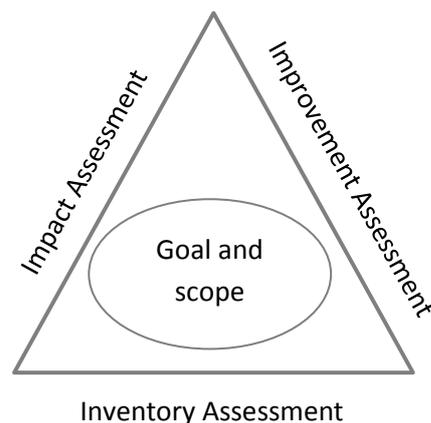
$PLA = BA + LCA + SA + ÖA$

BA = Bedarfsanalyse; SA = soziale Aspekte; ÖA = ökonom. Aspekte; LCA = Sachbilanz + Wirkungsabschätzung

Struktur der Ökobilanz:

LCA-Dreieck nach SETAC konzipiert: Abb. 1.2 – S. 11

SETAC 1993:



In der deutschen Fassung lauten die Begriffe: Sachbilanz (Stoff- und Energieanalyse) (inventory) – Wirkungsbilanz bzw. Wirkungsabschätzung (impact analysis) – Schwachstellen- und Optimierungsanalyse (improvement analysis).

Komponenten der Ökobilanz:

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
2. Sachbilanz
3. Wirkungsabschätzung
4. Auswertung

Die einzelnen Komponenten sind ISO-genormt (ISO 14040 bis 14044 – inkl. Handlungsanweisungen). Die Normen werden alle 5 Jahre überprüft (2006/2011/2016).

Einzig international genormte Methode zur Analyse der Umweltaspekte und potenziellen Wirkungen von Produktsystemen.

Beispiele für Anwendungen einer Ökobilanz nach ISO 14040:

Umweltrecht und Politik – Verpackungen, Altölverordnung, Landwirtschaft, GVO (gentechnisch veränderte Organismen)

Produktvergleich – Tenside, Verpackungen, Isolierungsmaterial, Fußbodenbeläge

Kommunikation – Konsumentenberatung, ökolog. Bauen, Carbon Footprinting, Akteurskettenmanagement

Abfallwirtschaft – Entsorgungskonzepte, Recycling (**Closed Loop** und **Open Loop Recycling** – CLR und OLR)

Betrieb – ökolog. Bewertung von Sparten (Umweltleistung eines Unternehmens)

2) Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Ökobilanz hat iterative Eigenschaft – d.h., der Untersuchungsrahmen ist während der Studie entsprechend zu konkretisieren!

Zieldefinition:

- Was wird untersucht?
- Warum eine Ökobilanz?
- Für wen wird sie durchgeführt?
- Sind vergleichende Aussagen vorgesehen?

Produktsystem muss genau und eindeutig beschrieben werden – Grundlage für die Definition einer funktionellen Einheit (siehe oben!). Darstellung eines Produktsystems – siehe S. 29.

Bei vergleichenden Studien auf Vergleichbarkeit achten!!! Wo ist die Systemgrenze? Z. B. können Bauteile weggelassen werden, wenn sie in allen verglichenen Varianten vorkommen – außer diese sind wirklich ein relevanter Abschnitt!

Systemgrenzen:

Bsp: ein Produkt wird zwar nur in einem Land erzeugt und vertrieben, die Emissionen betreffen aber auch Nachbarländer! Um die Systemgrenzen festzulegen, gibt es in der Normung gewisse Abschneideregeln (z. B., wenn der Masseanteil einer Substanz < 1% ist, kann dieser Bestandteil vernachlässigt werden. Eben solche Abschneideregeln gibt es für Energie und Umweltrelevanz bzw. für die Prozessmodule.) D.h., wenn eine Substanz (trotz geringer Masse) hoch umweltrelevant ist, kann sie nicht weggelassen werden.

Koppelprodukte und Sekundärrohstoffe sind wichtig bei der Festlegung der Systemgrenze (z. B. Stroh als Koppelprodukt von Getreide; nicht direkt brauchbare Nebenprodukte als Sek.rohstoffe – recyclingfähig – oder Abfälle) → Umweltlasten müssen aufteilt werden → alloziert.

Geographische und zeitliche Systemgrenzen: ergeben sich aus wirtschaftlichen Zusammenhängen der Produktdefinition. Wo wird produziert, woher kommen die Rohstoffe, wohin wird exportiert, wo wird entsorgt? Internationale Arbeitsteilung. Globale, regionale oder nur lokale Wirkungen?

Minimalangabe zur zeitlichen Begrenzung ist ein Jahr. Die zeitliche Systemgrenze zu bestimmen, ist jedoch eine komplizierte Sache (künftige Methoden von Recycling oder Abfallbeseitigung, Gebrauchsdauer...).

Festlegung einer geeigneten funktionellen Einheit:

Die Definition hat wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis der Studie (Vergleich Stoffwindeln – Zellstoffwindeln: ein 1:1 Vergleich hinkt – mit Zellstoff längere Dauer, bis das Kind trocken wird; andererseits mit Stoffwindeln mehr Windeln pro Tag, weil schneller nass und ungemütlich).

→ vergleichsbeeinträchtigende Faktoren, vernachlässigbarer Zusatznutzen (z. B. Stolz der Besitzer)

Datenverfügbarkeit und Tiefe der Studie: welche Daten sind zur Verfügung, woher. Mit geringerem Datenaufwand ist eine Überblicks-Ökobilanz oder eine vereinfachte Ökobilanz möglich (S. 45).

Weitere Festlegungen:

- Art der Wirkungsabschätzung
- Bewertung (Gewichtung), Annahmen und Werthaltungen
- Kritische Prüfung nach ISO 14040/44 (begleitend oder nachträglich)

Weitere Festlegungen zum Untersuchungsrahmen:

- Allokationsverfahren
- Methoden zur Auswertung
- Einschränkungen
- Art und Aufbau des vorgesehenen Berichts

3) Sachbilanz

Grundbegriffe

Nach ISO 14040 (2006) ist Sachbilanz der „Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines gegebenen Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“.

Sachbilanz ist eine Stoff- und Energieanalyse – d.h. detaillierte Ausarbeitung des bisherigen „Produktbaums“, der aus Prozessmodulen (kleinste Einheit der Bilanzierung) besteht.

Systemfließbild: besteht aus den einzelnen Prozessmodulen, die durch Pfeile miteinander verbunden sind. Ein Prozessmodul kann (wenn die Daten gut sind!) einem einfachen, nicht weiter zerlegbaren Prozessschritt entsprechen (z. B. Transport). Wenn die Datenlage schlecht ist, einer ganzen Produktionsstätte oder einer Nebenkette. Zuordnung z. B. des Stromverbrauchs zu einem einzigen Produkt ist oft kaum möglich. Für jedes Modul sollte eine vollständige Massen- und Energiebilanz durchgeführt werden.

Emissionen usw. müssen auf Folge- und Koppelprodukte aufgeteilt werden können (Allokation) oder diese müssen in ein erweitertes System hinein genommen werden. (S. 71)

Energieanalyse

Energieanalyse und Analyse des Materialflusses sind die zentralen Aufgaben der Sachbilanz (Ressourcenverfügbarkeit, Preis, Umweltprobleme). Die wichtigsten Energieformen

- Kinetische Energie
- Potenzielle Energie
- Wärme
- Elektrischer Strom
- Licht
- Chemische Energie
- Kernenergie

Wieviel Primärenergie zur Bereitstellung der Endenergie? Förderung, Transport, Wirkungsgrad von Anlagen zur Energieumwandlung, Netzverluste

Der kumulierte Energieaufwand (= KEA) (früher: Energieäquivalenzwert) gibt die Gesamtheit des primärenergetisch bewerteten Aufwands an, der im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Beseitigung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entsteht bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden kann. Dieser Energieaufwand stellt die Summe der kumulierten Energieaufwendungen für die Herstellung, die Nutzung und die Entsorgung des ökonomischen Gutes dar, wobei für diese Teilsommen anzugeben ist, welche Vor- und Nebenstufen mit einbezogen sind. (VDI-Richtlinie 4600)

$KEA = KEA_H + KEA_N + KEA_E$ (H = Herstellung; N = Nutzung; E = Entsorgung)

Infrastruktur: Errichtung von Anlagen (Kraftwerke usw.) wird oft weggelassen – macht meist < 1% der Gesamtenergie aus (lange Nutzungsdauer!).

Bereitstellung elektrischer Energie: meist ein Energie- bzw. Strommix für das nationale Stromnetz, bestehend aus fossilen Energieträgern, Kernenergie, Wasserkraft, regenerative Energieträger (Biomasse, Wind-, Solarenergie...), Import. (gewichteter Mix der in das betreffende Land exportierenden Länder).

Europäischer Strommix: westeuropäisches Stromverbundsystem (Union for the Coordination of Transmission of Electricity – UCTE). Einer der größten Stromverbünde der Welt. Siehe Tabelle 3.6, S. 88, Strommix EU-27 2005, D, F, CH, A

Für Ökobilanzzwecke sollte die Aufschlüsselung nach regenerativ/nicht regenerativ und fossil gegeben sein, für eine spätere Wirkungsabschätzung, speziell für die Berechnung des Treibhausgaspotenzials (GWP – Global Warming Potential).

Wasserkraft – Auswirkungen auf natürliche Ökosysteme! Kernenergie – radioaktive Emissionen, usw.

Transportprozesse: oft keine eigenen Prozessmodule, sondern zu den jeweiligen PM dazugezählt. Quantifizierung auf Sachbilanzebene:

Personenkilometer (Pkm) und Tonnenkilometer (tkm): 1 Person bzw. eine Masse von 1 t wird jeweils über die Distanz von 1 km transportiert. Berücksichtigt werden neben der Entfernung die verschiedenen Transportmittel und der Auslastungsgrad der Fahrzeuge ebenso wie deren Alter (Treibstoffbedarf! Emissionen – auch Lärm!).

Übung: Was ist bei der Berechnung von Umweltlasten durch Transport einzubeziehen (ohne Vorkette des Treibstoffs)? Transportmittel und dessen Alter, zul. Gesamtgewicht, Nutzlast, Treibstoffverbrauch (abhängig vom Auslastungsgrad), Transportkapazität.

Allokation

Ist die (gerechte) Zuordnung der über den Lebensweg auftretenden Umweltbelastungen (Input und Output) bei Koppelproduktion, Recycling und Abfallentsorgung. D.h., „wer ist woran schuld“.

Lösung: Allokation nach Masse (Koppelprodukte werden „abgeschnitten“, Abb.3.10, S. 97) oder Systemerweiterung (Koppelprodukte werden ins System der Prozessmodule einbezogen – Abb. 3.11, S.100). Abb. 3.10 → Beginn der Allokation beim Endprodukt entsprechend dem Masseverhältnis des Produktoutputs. Systemerweiterung verursacht u. U. unübersichtlich große Systeme; unterschiedliche Zusatznutzen müssen berücksichtigt werden; es ist komplizierter, Symmetrie herzustellen, höherer Rechercheaufwand, nicht wissenschaftlich.

Übung: Wo in der Landwirtschaft gibt es Koppelprodukte? (Getreide/Stroh z.B.)

Resümee über Allokation: Lösung für „kleine“ Ökobilanzen liegt in einer Konvention über geeignete Allokationsregeln, die angestrebt werden muss. Transparenz!

Datenerfassung, Datenherkunft und Datenqualität

Sind oft kompliziert. Relativ einfach zu ermitteln sind die Daten zu Materialeinsatz, Energie und Energieform, Koppelprodukte, Produktionsabfälle, Betriebs- und Hilfsstoffe sowie zu Transporten. Schwieriger ist es aber bei den Emissionen in Luft und Wasser (Filter bzw. Klärung), Verunreinigungen in Boden und Grundwasser, Gebrauch von Pestiziden und Düngemitteln (welche genau, wieviel?) sowie bei Angaben über ionisierende Strahlung, biologische Emissionen und Belästigungen (Geruch, Lärm).

Was sind „generische Daten“: „allgemein, die Gattung betreffend“. Es sind Mittelwerte oder repräsentative Einzelwerte für z. B. Umweltlasten, die aus einem bestimmten Typ von Kunststoff resultieren. Es gibt bestimmte Quellen für generische Daten, die in solchen Fällen verwendet werden (S. 136 ff) (auch kostenpflichtige Datenbanken und Softwaresysteme; Bsp. Ecoinvent 2000, SimaPro = Ökobilanz-Software). Z. B.: GEMIS – Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme, BUWAL (Schweizerisches Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft) u.v.a.

Datenaggregation und Einheiten

Nur Daten mit derselben Einheit addieren!!! Dzt. gibt es keine Konvention, welche Einheiten verwendet werden dürfen.

Arbeitsschritte bei der Sachbilanz: in Ökobilanz-Software-Tools oft integriert (S. 144 ff.)

- Differenzierte Beschreibung des untersuchten Produktsystems – welche Materialien, welche Transporte, Abfallströme sind zu berücksichtigen?
- Analyse der Herstellungsverfahren, Verwertungsverfahren und sonstiger im Produktsystem relevanter Prozesse
- Ausarbeitung eines differenzierten Systemfließbildes mit Referenzflüssen
- Allokationsregeln (auf Prozess- und Systemebene) und Festlegung von Regeln zur Herstellung der Nutzengleichheit bei der Abfallbehandlung
- Modellierung des Systems
- Berechnung der Sachbilanz

4) Wirkungsabschätzung (LCIA – Life Cycle Impact Assessment)

Wirkungsabschätzung ist ein Analyseinstrument im Rahmen der Ökobilanz. Ergebnisse basieren z.T. auf Modellannahmen und bisherigen Kenntnissen. D.h., es sind KEINE Voraussagen!!!

Grundprinzip der Wirkungsabschätzung

Ökobilanz soll die wesentlichen Umwelteinflüsse (-aspekte) und potenziellen Umweltwirkungen, die mit einem Produktsystem zusammenhängen, erfassen und, soweit möglich, quantifizieren. Die Sachbilanz liefert (mit den erfassten Inputs und Outputs) die Umwelteinflüsse des definierten Produktsystems.

Wirkungsbezogene Aggregation von Daten muss über den KEA aus der Sachbilanz hinausgehen! (S. 196)

Normung der Ökobilanz in ISO 14040/44:

Wirkungsabschätzung: „Bestandteil der Ökobilanz, der dem Erkennen und der Beurteilung der Größe und Bedeutung von potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlaufe des Lebensweges des Produktes dient.“

Wirkungsabschätzung ist NICHT GLEICH Risikoanalyse!!!

Umweltwirkungen haben ihre Ursache in den Verbräuchen (Inputs) und Emissionen (Outputs) eines Produktsystems. Verbrauch und Emissionen sind aber selten nur einem einzigen Ort zuzuordnen – demnach lässt sich auch das Schadensausmaß kaum je an einem bestimmten Ort quantifizieren. Daher wird in der Ökobilanz von „potenziellen Umweltwirkungen“ gesprochen. S. 197 (Beispielkasten)

Methode der kritischen Volumina

Aus der Schweiz stammende Methode. Später abgelöst durch Entwicklung der Methode der Umweltproblemfelder oder Wirkungskategorien (bspw. Versauerung oder Klimaänderung). Vorhandene Grenzwerte bestimmen die Größe des kritischen Volumens (z.B. Luft oder Wasser). Methode inzwischen aus mehreren Gründen kaum mehr in Anwendung – u. a. schwankende Grenzwerte (siehe S. 200/201 – ev. scannen!). Meist wird nur menschliche Gesundheit berücksichtigt, nicht aber die Ökotoxizität.

Struktur der Wirkungsabschätzung nach ISO 14040 und 14044

Aus verbindlichen und optionalen Bestandteilen zusammengesetzt.

- Verbindlich: Auswahl von Wirkungskategorien, -indikatoren und Charakterisierungsmodellen; Zuordnung der Sachbilanzergebnisse (Klassifizierung); Berechnung der Wirkungsindikatorwerte (Charakterisierung). Hieraus ergeben sich die Wirkungsindikatorwerte.
- Optional: Berechnung des Betrages von Wirkungsindikatorwerten im Verhältnis zu einem oder mehreren Referenzwerten (Normierung); Ordnung; Gewichtung. Ergebnis: gewichtete Daten.

ISO 14044:

1. Wirkungskategorie: Klasse, die wichtige Umweltthemen repräsentiert und der Sachbilanz-ergebnisse zugeordnet werden können.
2. Wirkungsindikator: Quantifizierbare Darstellung einer Wirkungskategorie
3. Charakterisierungsfaktor

Verbindlich:

- Auswahl der **Wirkungskategorien** und ihrer Umweltrelevanz obliegt den Erstellern der jeweiligen Ökobilanz. Beispiele für Wirkungskategorien: Humantoxizität, Ökotoxizität, Eutrophierung (aquatisch oder terrestrisch), Ozonbildung, Ozonabbau, Naturraumbeanspruchung, Treibhauseffekt, Versauerung, Ressourcenbeanspruchung, Geruch, Lärmbelastung, harte Strahlung (S. 204 und Tab. 4.4 auf S. 220).
- Klassifizierung: z. B: werden fossile Rohstoffe der Wirkungskategorie Ressourcenbeanspruchung zugeordnet. Manche Sachbilanzergebnisse sind auch mehreren Wirkungskategorien zuzuordnen.
- Charakterisierung: ist das Kernstück der Wirkungsabschätzung und nach ISO 14044 definiert.

Optional:

- Normierung (eines Wirkungsindikatorwertes; Normierung der Jahresproduktion über Einwohnerdurchschnittswerte des Wirkungsindikatorwertes CO₂-Äquivalente bspw. – S. 211 unten). Vor einem Vergleich von Zahlenwerten aus unterschiedlichen Ökobilanzen muss geprüft werden, ob eine gemeinsame Basis vorhanden ist!!!
- Ordnung: Einordnung (nominal) und eventuelle Rangbildung der Wirkungskategorien (Prioritätenreihung). Ordnung beruht auf Werthaltungen → Transparenz ist wichtig! In Softwaretools häufig schon integriert. Reversible/irreversible Wirkungen, Prognosemöglichkeiten ja/nein, räumlich begrenzte Wirkung oder ubiquitär... Rangbildung orientiert sich an ökologischer Gefährdung, Abstand zum Schutzziel und spezifischem Beitrag.
- Gewichtung: Verfahren zur Umwandlung der Indikatorwerte verschiedener Wirkungskategorien unter Verwendung numerischer Faktoren, die auf Werthaltungen beruhen.

Methode der Wirkungskategorien (Umweltproblemfelder)

Grundidee: über Klassifizierung und Charakterisierung eine (möglichst quantitative) Verbindung herzustellen zwischen den in der Sachbilanz vorhandenen Daten und einer Liste von Umweltproblemfeldern oder Wirkungskategorien. So sollen potenzielle Schadwirkungen des untersuchten Produktsystems erkannt und näherungsweise quantifiziert werden. Basiert auf jeweiligem Kenntnisstand und Rezeption der Umweltprobleme in der Öffentlichkeit (Umweltbewusstsein?). (S. 218).

Nicht jeder Indikator eignet sich als Wirkungskategorie (Bsp. nicht verwertbare Abfallmenge – berührt abhängig von der Art der Deponierung unterschiedliche Umweltproblemfelder).

3 weitere Effekte:

1. Hormon-disrupters: Substanzen, die Hormone nachahmen oder verdrängen (ökotoxische, humantoxisch)
2. Gentechnisch veränderte Organismen – mögliche schädliche Auswirkungen auf die Umwelt
3. Invasive Arten (Neophyten, Neozoa)

Hierarchie der Effekte am Beispiel **Versauerung** (S. 225)

1. Primärwirkung: Deposition luftgetragener Säuren auf Seen, Böden, Bäumen usw.
2. Sekundärwirkung: Änderung des pH-Wertes bei ungenügender Pufferung
3. Tertiärwirkung: Fischsterben durch die Säure oder durch freigesetzte Al^{3+} -Ionen; neuartige Waldschäden bzw. Beitrag zu denselben, Vegetationsschäden durch Verarmung der Böden an Nährsalzen (z.B. Na^+ , K^+ , Mg^{2+}), Grundwasserkontamination durch remobilisierte Schwermetalle usw.

Siehe Abb. 4.3, S. 224!!! → Sachbilanzdaten werden einer Wirkungskategorie zugeordnet. Es erfolgt eine quantitative Modellierung des Wirkungsindikators, Wahl des „Midpoint Indicator´s“ (näher an den Sachbilanzdaten oder näher an den einzelnen Endpunkten). Daraus entstehen Wirkungsendpunkte.

Potenzielle versus tatsächliche Effekte: laut ISO 14040

Die Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen (...) im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d. h. „von der Wiege bis zur Bahre“).

Die „potenzielle Umweltwirkung“ ist eine relative Aussage, da sie sich auf die funktionelle Einheit eines Produktsystems bezieht.

Zuordnung der Wirkungen zu Ort und Zeit ist über den gesamten Lebensweg meist nicht möglich → Grenzen der Wirkungsabschätzung. Für eine Risikoanalyse müsste man z. B. den jährlichen Verbrauch (z.B. eines Tensids) in einem Land bei Kenntnis des Abbaugrades in der Kläranlage in eine mittlere Konzentration in den Gewässern umrechnen und diesen Wert mit Wirkungsschwellen vergleichen.

Oder: wenn Produktionsstätte des untersuchten Produktes eindeutig lokalisierbar ist → ortsspezifische Risikoanalyse möglich. Wenn dies nicht möglich ist, lautet die Empfehlung: „Weniger ist besser“ (also: Minimierung von Schadstoffemissionen).

2 Denkschulen (S. 228 unten):

- | |
|--|
| <ol style="list-style-type: none">1. Die Wirkungsabschätzung bezieht sich auf potenzielle Wirkungen und stützt sich auf das Vorsorgeprinzip.2. Die Wirkungsabschätzung sollte soweit als möglich auf tatsächlichen Wirkungen beruhen und der Beurteilung naturwissenschaftlich abgeleitete bzw. gesetzlich festgelegte Grenz- oder Schwellenwerte zugrunde legen. |
|--|

Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsfaktoren

Sind in vielen Ökobilanz-Software-Tools so integriert, dass die Hintergründe nicht offensichtlich sind.

Generelle Einteilung von Ressourcen:

- Deposits (Lagerstätten): keine Regeneration in „menschlichen“ Zeiträumen (Mineralien, fossile Energieträger, Rohstoffe)
- Funds: regenerieren sich in relativ kurzen Zeiten (1 Menschenleben) (Wildtiere z.B.; kultivierte Wälder gehören zur Technosphäre!)
- Flows: regenerieren sich dauernd (Wind, Sonnenstrahlung)

Wasser kann zu allen 3 Kategorien gehören (fossiles Tiefenwasser, Grundwasser, Oberflächenwasser). Unterschiedliche Nutzung – am Ende steht oft die Reinigung und damit Regeneration.

Naturraumbeanspruchung und deren Charakterisierung (Quantifizierung): → Artenschutz, Natur- und Landschaftsschutz, Boden- und Grundwasserschutz. Flächen werden nach den Hemerobiestufen (Brentrup et al. 2002b, zit. in Klöpffer & Grahl 2009: 246) beurteilt. 11 Stufen von natürlich über halbnatürlich, naturfern bis künstlich. Müssten jedoch global vergleichbar sein, sonst unzulässig. Zudem sind geringe Artenvielfalt und geringe Produktivität kein Zeichen für ein minderwertiges Ökosystem (siehe hochalpiner, arktischer Raum, Steppen usw.).

Der gemeinsame Nenner der Wirkungskategorie Naturraumbeanspruchung ist: die Knappheit.

A) Input-bezogene Ressourcen: nach SETAC Europe gehören dazu: *abiotische und biotische Ressourcen sowie Naturraumbeanspruchung.*

Siehe S. 230: Input-bezogene Ressourcen:

1. Abiotisch endlich: Mineralien, fossile Rohstoffe
2. Abiotisch regenerierbar: Grundwasser, Oberflächen(süß)wasser, Sauerstoff; nicht jedoch: fossiles Grundwasser
3. Biotisch endlich: Tropenholz aus Primärwäldern, vom Aussterben bedrohte Arten
4. Biotisch regenerierbar: Wildpflanzen, Wildtiere (z. B. Meeresfische); nicht jedoch: Agrar- und Forstprodukte und Fischfarmen, da diese im Rahmen der Technosphäre generiert werden

Bzgl. der Wirkungsindikatoren muss beachtet werden, dass manche Ressourcen praktisch unerschöpflich sind bzw. sich wieder regenerieren können, andere aber nicht. Beim Verbrauch mancher Ressourcen ist „nur“ der Mensch betroffen, bei anderen das ganze Ökosystem Erde. Unterscheidung in abiotische (fossile Brennstoffe, mineralische Rohstoffe, Wasser, Luft) und biotische Ressourcen (Pflanzen, Tiere, NICHT aber Produkte/Tiere der Land- und Forstwirtschaft). Biotische Ressourcen sind meistens – nicht immer! – regenerierbar. Es kann jedoch die Verknappung berechnet werden (Abstand zwischen Weltjahresverbrauch und Neubildungsrate bezogen auf die Weltreserven).

Nutzung von (Süß-)Wasser: Regenerierbar, abiotisch. Nur in wenigen Prozessen irreversibel verbraucht (für Beton, Hydrolysen)

B) Output-bezogene Ressourcen: globale und regionale Wirkungen → Beeinträchtigung der Umwelt durch Emissionen im weiteren Sinne (auch Gefährdung der Gesundheit und Belästigungen): S. 251 ff.

1. Klimaänderung (global) (Treibhauseffekt)
2. Stratosphärischer Ozonabbau (global) („Ozonloch“)
3. Bildung von Photooxidantien (kontinental/regional/lokal) (Sommersmog)
4. Versauerung (kontinental/regional/lokal)
5. Eutrophierung (kontinental/regional/lokal)

Ad 1) Klimaänderung: Treibhauseffekt – natürlicher Treibhauseffekt durch die Gase Kohlendioxid und durch Wasser(dampf) in vorindustriellen Konzentrationen. Zusätzlicher anthropogener Treibhauseffekt durch die gleichen Gase, jedoch zusätzlich Methan, Lachgas, Ozon, synthet., persistente Chemikalien (siehe S. 253). Infrarotstrahlung wird absorbiert, gemessen und berechnet als Strahlungsleistung pro Fläche [W/m^2]. Das ist der Primäreffekt, der mehrere Sekundär- und Tertiäreffekte bewirken kann.

Die relevanten gasförmigen Emissionen werden in der Sachbilanz als Masse pro funktionelle Einheit erfasst und stammen bspw. aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe, industriellen Prozessen, der Landwirtschaft, der Mülldeponierung, privatem Gebrauch (chlorierte Lösungsmittel z. B.). Ökobilanzen benötigen einen Zeitraum (meist 100 Jahre – je nach Fragestellung) als Vorgabe. Eine Vorhersage der Temperaturzunahme kann immer nur eine Annäherung sein.

Ad 4) Versauerung: v.a. 3 Umweltprobleme – a) Versauerung ungepufferter Gewässer, b) neuartige Waldschäden („Waldsterben“) durch Luftschadstoffe und c) Versauerung von Böden.

Saure Niederschläge lösen Al^{3+} -Ionen aus den Gewässern, die (gemeinsam mit anderen Lösungsprodukten) die meisten Lebewesen in den (flachen Oberflächen-)Gewässern töten. Zusammenhang: Europäische Kraftwerke und Schadstoffe – Windrichtung – Niederschläge!

Versauerung verursacht auch Auswaschung von Nährstoffen (K, Na, Mg) und die Mobilisierung von Schwermetallen. Beides führt zu Vegetationsschäden.

Luftschadstoffe: SO_2 , NO_x , NH_3 , HF (Flusssäure), HCl, Photooxidantien, organ. Verbindungen (Reaktionen mit OH und NO_x in der Troposphäre)

Versauerungspotenzial ist relativ eindeutig und einfach zu bestimmen – gut geeignet für Wirkungsabschätzung.

In vielen Fällen wurde entdeckt, dass die „less is better“-Theorie empfehlenswerter ist. Zu warten bis die Wissenschaft konkrete verifizierte Studien bringt, dauert zu lange – entsprechende Maßnahmen können erst spät gesetzt werden.

Ad 5) Eutrophierung:

Ist die Überdüngung oder das Überangebot an Nährstoffen. Dadurch (durch reduzierten Sauerstoffgehalt) ändert sich das Artenspektrum (z. B. Algenwachstum!) in Gewässern. Extremfall: ein anaerobes Ökosystem.

Aquatische und terrestrische (Überdüngung) Eutrophierung. Für Pflanzen am wichtigsten sind N und P. Andere werden nicht in der Wirkungsabschätzung berücksichtigt. Ungewollte Nährstoffzufuhr

(oder Schadstoffe) führen zu Umweltbelastungen, Algenwachstum... Vor allem in den Meeren hat dies unkontrollierbare Wirkungen zur Folge.

Wirkungsindikator der aquatischen Eutrophierung ist die unerwünschte Bildung von Biomasse in Seen oder in marinen Ökosystemen. Mittels einer Formel wird – wie auch bei den anderen Wirkungen die Eutrophierung charakterisiert und quantifiziert.

C) Toxizitätsbezogene Wirkungskategorien

1. Humantoxizität
2. Ökotoxizität (schließt den Schutz der menschlichen Gesundheit und somit der menschlichen Lebensgrundlagen mit ein)

Zu beachten – wie immer – welche Kategorien werden in die Wirkungsabschätzung der Ökobilanz hineingenommen und welche Methode wird dafür angewendet.

Humantoxizität – wissenschaftlich höchst schwierige Wirkungsabschätzung, aufgrund der unterschiedlichen Wirkmechanismen der Substanzen und Zusammenhängen mit anderen Stoffen. Große Unterschiede in der Exposition-Wirkungs-Beziehung! Sichere (einheitliche!) Grenz- und Richtwerte für die Gewichtung der toxischen Emissionen in die Luft aus der Sachbilanz??? MAK (maximale Arbeitsplatzkonzentration)-Werte sind grundsätzlich als Midpoint-Charakterisierungsfaktoren geeignet.

Charakterisierung mit zusätzlicher Expositionsabschätzung – auch hochtoxische Stoffe werden in der Umwelt meist so verdünnt, dass die Wirkschwellen für akute Vergiftungen nicht erreicht werden. Und sie sind rascher abbaubar als reaktionsträge Stoffe.

Hingegen sind weniger toxische Stoffe, die persistent sind, auch bei geringer Konzentration oft eher als potenzielle Umweltgifte einzustufen, v. a. bei Exposition über die Umweltmedien und die Nahrungskette (siehe S. 295). Genaueres zur Ermittlung der Expositions-faktoren und zum vereinheitlichten LCIA-Toxizitäts-Modell ab S. 298 ff. – welche Detailtiefe in der Ökobilanz?

Schutzziel bei der Ökotoxizität ist die Funktionsfähigkeit der Systemgemeinschaften von Ökosystemen als Ganzes sowie die Vielfalt der Arten (nicht einzelner Individuen – mit Ausnahmen!).

Im Ökosystem stehen einerseits biotische und abiotische (Temperatur, Strahlung, pH-Wert, Strömung...) Faktoren miteinander in Wechselwirkung, andererseits steht das Ökosystem (als offenes System) mit seiner Umgebung in Wechselwirkung. In der Ökobilanz stark vereinfacht – definierte Randbedingungen, einzelne ausgewählte Testorganismen. Ökosysteme können empfindlicher (oder auch unempfindlicher!) reagieren als Individuen einer Art! Ökosysteme durchlaufen eine Entwicklung von einem Jugend- zu einem Reifestadium (Klimaxstadium). Die Empfindlichkeit bei großen und kleinen Störungen ist dementsprechend unterschiedlich (S. 303 ff).

Werden Human- und Ökotoxizität in die Ökobilanz einbezogen, stellt dies höhere Anforderungen an die Sachbilanz.

D) Belästigungen durch chemische und physikalische Emissionen

1. Geruch (jeder ungewollte Geruch ist eine Umweltimmission!) – eine Quantifizierung besser nur bei solchen Produktsystemen, bei denen Geruchsbelästigungen eine Rolle spielen.
2. Lärm: Verkehrsbedingt, stationäre Anlagen, Dienstleistungsbetriebe. Physikalische Emission, physiologisch-psychologischer Effekt beim Empfänger. Für die Quantifizierung/den Vergleich Standardentfernung festlegen. Schwierig bei diffusem Lärm (Verkehr). Zeiten der Lärmbelastung sowie Personenkilometer und Tonnenkilometer (s. S. 311) ermitteln, wie viele Menschen sind dadurch gestört (Anwohnerdichte), tagsüber/nachts, Fahrzeugtypen.

E) Unfälle und Radioaktivität

Unfälle wurden als Wirkungskategorie in die Kategorienliste aufgenommen, aber keine Methode der Charakterisierung (Quantifizierung). Würde ev. besser zur „produktbezogenen Sozialbilanz“ im Rahmen einer Nachhaltigkeitsanalyse passen.

Radioaktivität: Risiko = Schadenshöhe x Eintrittswahrscheinlichkeit

Schadenshöhe hoch, aber nicht zu beziffern; Eintrittswahrscheinlichkeit sehr gering, aber doch vorhanden. Endlagerung ungelöst. Wirkungsabschätzung anhand von Störfällen und Leckagen bei Kernkraftwerken. Zur Aggregation: der ungewichtete Sachbilanzposten Becquerel pro funktionelle Einheit.

Praxisbeispiel – WIE wird eine Wirkungsabschätzung erstellt?

Verbindliche Bestandteile der Wirkungsabschätzung:

1. Auswahl von Wirkungskategorien und Wirkungsindikatoren sowie Charakterisierungsfaktoren
2. Klassifizierung (Sachbilanzdaten werden Klassen zugeordnet)
3. Charakterisierung (Sachbilanzdaten werden mittels Charakterisierungsfaktoren in Wirkungsindikatoren übergeführt)

Optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung:

1. Normierung
2. Ordnung (nach Relevanz)
3. Gewichtung
4. Zusätzliche Analyse der Datenqualität

z. B. Wirkungskategorie „Ressourcenbeanspruchung“ Flächennutzung bzw. Naturraumbeanspruchung: alle flächenbezogenen Umweltbelastungen – bspw. Verringerung der Biodiversität, Landerosion, Beeinträchtigung der Landschaft usw. – Methode der Wirkungsabschätzung mittels Beschreibung des „Natürlichkeitsgrades“ von Naturräumen (Hemerobiestufen).

5) Auswertung, Berichterstattung und kritische Prüfung

In der Auswertung werden aus Sachbilanz und Wirkungsabschätzung Schlussfolgerungen gezogen, Einschränkungen erwähnt und Empfehlungen abgegeben, die der festgelegten Zielsetzung und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz entsprechen (s. S. 357 ff, Abb. 5.1)

Auch reine Sachbilanzstudien erfordern eine Phase der Auswertung.

Zum Teil erfolgt Ergebnisgewichtung auf der Basis von Werthaltungen bereits in der Phase Wirkungsabschätzung.

WIE erfolgen Auswertung, Berichterstattung und kritische Prüfung:

Auswertung:

- Identifizierung signifikanter Parameter
- Beurteilung: klarer und verständlicher Überblick über das Resultat der Studie; Vollständigkeitsprüfung oder Sensitivitätsprüfung (Einschätzung der Unsicherheit von Ergebnissen aufgrund der Datenqualität o.a.) oder Konsistenzprüfung (z. B. bez. Datenqualität, Allokationsregeln; v.a. bei vergleichenden Ökobilanzen) erforderlich.

Methoden der Ergebnisanalyse: Ergebnisanalyse nach wissenschaftlichem Hintergrund, mathematischen Methoden und nicht-numerischen Verfahren (unterschiedl. Werthaltungen – daher verbal-argumentative Auswertung der Ergebnisse), da die Ökobilanz oft als entscheidungsunterstützendes Element bei Produktvergleichen und –optimierungen gesehen wird.

Direkte Anwendungen der Ökobilanz:

- Entwicklung und Verbesserung von Produkten
- Strategische Planung
- Politische Entscheidungsprozesse
- Marketing

Berichterstattung

Bericht sollte auf die verschiedenen Phasen der Studien eingehen, alle Daten, Verfahren, Annahmen und Einschränkungen dazu angeben und die Ergebnisse und Schlussfolgerungen in geeigneter Form weiterleiten an die Zielgruppe.

Kritische Prüfung

Ziele:

1. Verbesserung der wissenschaftlichen und technischen Qualität
2. Erhöhung der Glaubwürdigkeit

Kritische Prüfung (nach ISO) durch

- interne oder externe Sachverständige
- einen Ausschuss interessierter Kreise (bzw. sachkundige VertreterInnen der zuständigen Fachverbände) (zwingend vor Veröffentlichung einer Studie mit vergleichenden Aussagen)

Der Bericht zur kritischen Prüfung ist Teil des Schlussberichts der Ökobilanzstudie.

6) Von der Ökobilanz zur Nachhaltigkeitsanalyse

Nachhaltigkeitsanalyse: bezieht sich nicht nur auf Umweltauswirkungen, sondern muss sozioökonomische Dimension mit berücksichtigen. Weltweite Verantwortung für künftige Generationen.

Nachhaltigkeit in wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Entwicklung braucht quantifizierte Ziele und Indikatoren, um die natürlichen Lebensgrundlagen zu erhalten und wirtschaftliches und soziales Wohlergehen für gegenwärtige und künftige Generationen zu erreichen (weltweit).

Die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit: ökologische, ökonomische und soziale Aspekte

Lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsanalyse (Life Cycle Sustainability Assessment – LCSA):
 $LCSA = LCA + LCC + SCLA$

- LCA: Life Cycle Assessment=Ökobilanz
- LCC: Life Cycle Costing=Lebenszykluskostenrechnung
- SLCA: social LCA=produktbezogene Sozialbilanz

Konsistente Systemgrenzen! Konsensfähige Begriffe verwenden.

Wesentliche Voraussetzung für Nachhaltigkeit: Vermeiden von Problemverlagerungen in die Zukunft oder in andere Regionen der Welt.

Entwicklungsstand der Methoden

Ökobilanz (LCA) ist die einzige international genormte Methode zur umweltorientierten Analyse von Produktsystemen.

Dzt. relative Einfachheit und Robustheit der Methode – jedoch schwach ausgeprägter Orts- und Zeitbezug. Wirkungsabschätzung ist verbesserungswürdig – inhaltliche Ausgestaltung wird von ISO nicht festgelegt (siehe S. 387 ff.).

Ungleichgewicht bei den Wirkungskategorien durch die unterschiedliche Anzahl von Unterkategorien:

1. A Ressourcenverbrauch
2. B Wirkungen durch chemische Emissionen
3. C Wirkungen durch physikalische Emissionen
4. D Wirkungen durch biologische Emissionen
5. E weitere Kategorien

A Ressourcenverbrauch:

- A1: Verbrauch abiotischer Ressourcen (inkl. Wasser)
- A2: Verbrauch biotischer Ressourcen
- A3: Naturraumbeanspruchung (land use)

B Wirkungen durch chemische Emissionen

- B1: Klimaänderung
- B2: stratosphärischer Ozonabbau
- B3: Bildung von Photooxidantien
- B4: Versauerung
- B5: Eutrophierung
- B6: Humantoxizität
- B7: Ökotoxizität
- B8: Geruch

C Wirkungen durch physikalische Emissionen

- C1: Lärm
- C2: ionisierende Strahlung (Radioaktivität)
- C3: Abwärme

D Wirkungen durch biologische Emissionen

- D1: Effekte auf Ökosysteme, Änderung des Artenspektrums und der Artenvielfalt
- D2: Effekte auf Menschen (z. B. durch pathogene Organismen)

E weitere Kategorien

- E1: Unfälle
- E2: Gesundheitseffekte am Arbeitsplatz (Technosphäre; Exposition über die Umwelt siehe B6)
- E3: Austrocknung, Erosion und Versalzung von Böden (siehe auch A3)
- E4: Zerstörung von Landschaften (siehe auch A3)
- E5: Störung von Ökosystemen und Artenvielfalt (Biodiversität) (siehe auch A3, B7 und D1)

- E6: (fester) Abfall

Teilweise überlappen sich die Kategorien!

LCC – Lebenszykluskostenanalyse – diese Berechnung muss auf realen Geldflüssen basieren, sonst gibt es Überlappungen mit LCA.

LCC + LCA = Ökoeffizienzanalyse (Saling et al. 2002 u. a., zit. nach Klöpffer & Grahl 2009: 391)

LCC umfasst gesamten Lebenszyklus eines Produktes einschließlich Gebrauchs- und Nachnutzungsphase und lehnt sich an die LCA gemäß ISO 14040 an. Umweltschäden werden nicht in der LCC sondern in der LCA beziffert. LCC hat keine eigene Wirkungsabschätzung, es werden nur die realen Kosten angegeben. Unterscheidet sich von der „normalen“ ökonomischen Kostenrechnung.

SLCA – ist das Korrektiv zu LCA und LCC, weil es hier um das Wohlbefinden des Menschen geht. Ist ein Produkt umweltverträglich und kostengünstig, aber durch unmenschliche Arbeitsbedingungen hergestellt, so ist es nicht nachhaltig. Dzt. viele methodische Ansätze für eine SLCA (z.B. Bezug auf anteilige Arbeitszeit pro funktioneller Einheit des Zielproduktes führt zur Quantifizierung der sozialen Komponente und einer sozialen Wirkungsabschätzung – aber wie quantifiziert man die Wirkungen korrekt?). SLCA ist noch nicht standardisiert.

Ein Life Cycle Assessment oder drei?

Option 1: LCSA = LCA + LCC + SCLA

Option 2: LCSA = „LCA neu“ (einschließlich LCC und SLCA als zusätzliche Wirkungskategorien in der Wirkungsabschätzung der Ökobilanz)

Schlussfolgerungen

Denken in Lebenszyklen ist gut, aber nicht genügend für die Nachhaltigkeit. Quantitative Methoden ergänzt durch ökonomische und soziale Aspekte sind unabdingbar. Ökobilanz muss laufend verbessert werden (Mittelweg zwischen wissenschaftlicher Genauigkeit und praktischer Machbarkeit).

Hilfreiche Links

www.swisseduc.ch/chemie/wbd/docs/einfuehrung.pdf - Einführung in die Ökobilanz

https://www.zebis.ch/download/unterrichtsmaterial/der_kluge_einkaufswagen_lehrerheft.pdf

<https://www.zebis.ch/unterrichtsmaterial/der-kluge-einkaufswagen-unterrichtseinheit-zu-den-themen-umwelt-konsum>

http://www.going-green.info/fileadmin/dateiupload/KonsUmwelt/Bildungsmappe_III_Verpackung_und_Muellervermeidung.pdf