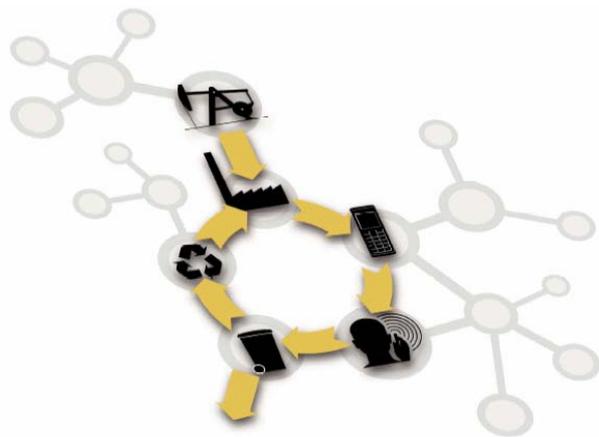


# Kolloquium der Umweltwissenschaften, Universität Koblenz-Landau 2007

## Ökobilanzierung – das Bewerten der Umweltwirkungen von Produkten über den Lebensweg

04. Dezember 2007



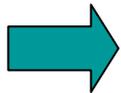
Sibylle Wursthorn

Institut für Technische Chemie  
Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme  
Forschungszentrum Karlsruhe

- Einführung
- Produkte und ihre Umweltauswirkungen
- Die Ökobilanz
  - Ziel und Rahmen
  - Sachbilanz
  - Methoden der Wirkungsabschätzung
  - Auswertung
- Anwendung

## Der Begriff: Umwelt

**Umwelt bezeichnet allgemein alle Beziehungen** eines Organismus zu seinen **Existenzbedingungen**



aus Sicht des Menschen, sind **Umwelt:**  
jene spezifischen Bestandteile der Umgebung,  
die seine physikalische Existenz sichern:

- Stoffe,
- Energie,
- Informationen,

die verändert wieder an die Umgebung abgegeben werden.

[SRU: Umweltgutachten 1987. Stuttgart: Kohlhammer 1987]

## (Aus)Wirkung auf die Umwelt

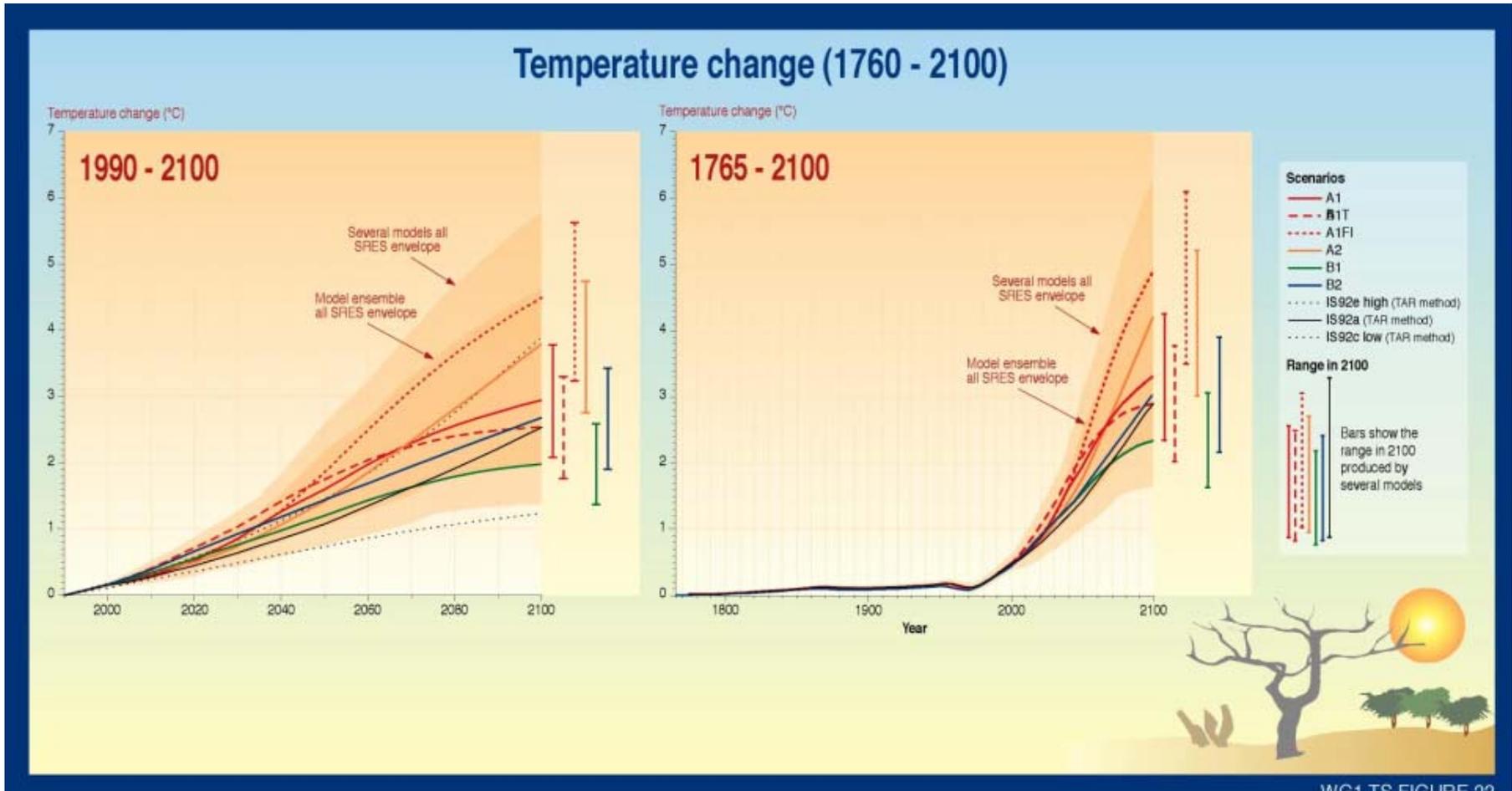
ist „jede Veränderung der Umwelt, ob günstig oder ungünstig, die vollständig oder teilweise das Ergebnis der menschlichen Tätigkeiten, Produkte und Dienstleistungen“ zu verstehen.

Im gegenwärtigen Sprachgebrauch werden unter Umweltauswirkungen insbesondere die für die Umwelt als negativ zu bewertenden Auswirkungen verstanden.

Die Wirkungsanalyse stellt die Messbarkeit des Schadens gegenüber einem Vergleichszustand und die längerfristige bzw. irreversible Wirkung her.

[Erweitert nach Schmidt-Bleek, F.; Wieviel Umwelt braucht der Mensch?, Birkhäuser 1993, S. 283].

## Umweltwirkungen durch menschliches Handeln



[Quelle: IPCC – Intergovernmental Panel of Climate Change]

## Umweltschäden - Ökosysteme



Öl-Ver-  
schmutzung



[Quelle: Spiegel-Online.August 2006.]



Waldschäden



[Quelle: Bund für Naturschutz. 2004]

[Quelle: Spiegel-Online.August 2006]

## Umweltschäden - menschliche Gesundheit

Im letzten Jahrzehnt starker Anstieg der Hautkrebserkrankungen durch die gestiegene UV-Strahlung in der Troposphäre (insbesondere in Australien)

Basalinom



[Quelle: Deutsche Krebsgesellschaft e.V., 2006]

Melanom



[Quelle: Deutsche Krebsgesellschaft e.V., 2006]

## Umweltschäden - Erschöpfung der Ressourcen



## Umweltwirkungen von Produkten





Von der Wiege ...

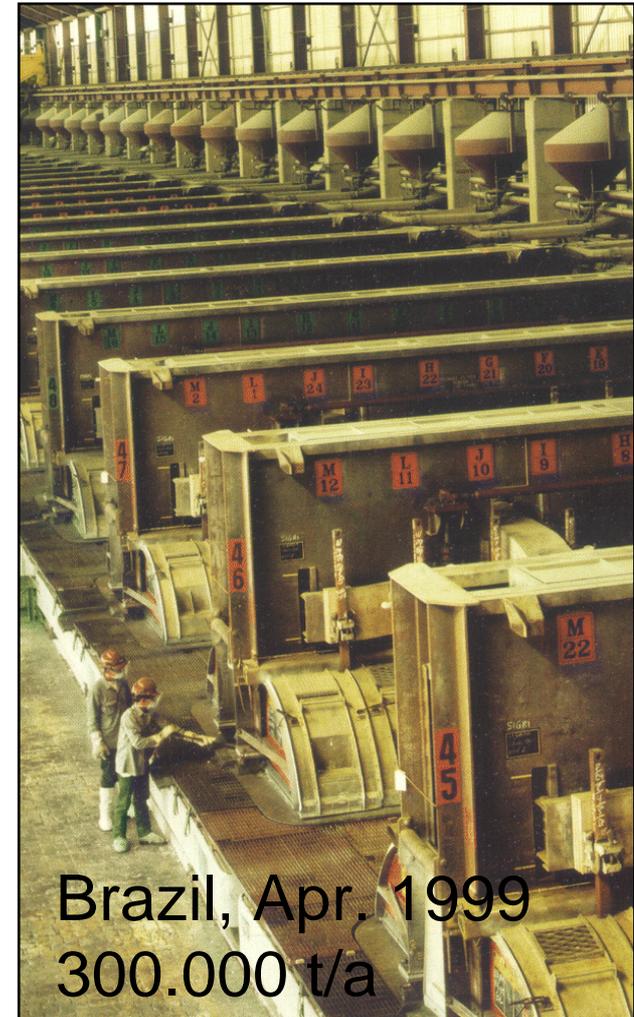
Porto Trombetas Brasilien 1998  
(Bauxittagebau)

[Quelle SFB525]

... über Produktion ...



[Quelle SFB525]



# Produkte und ihre Umweltauswirkungen

.... die Nutzung und das Recycling ...



[Quelle FZKA]

... zur Bahre



[Quelle SFB525]

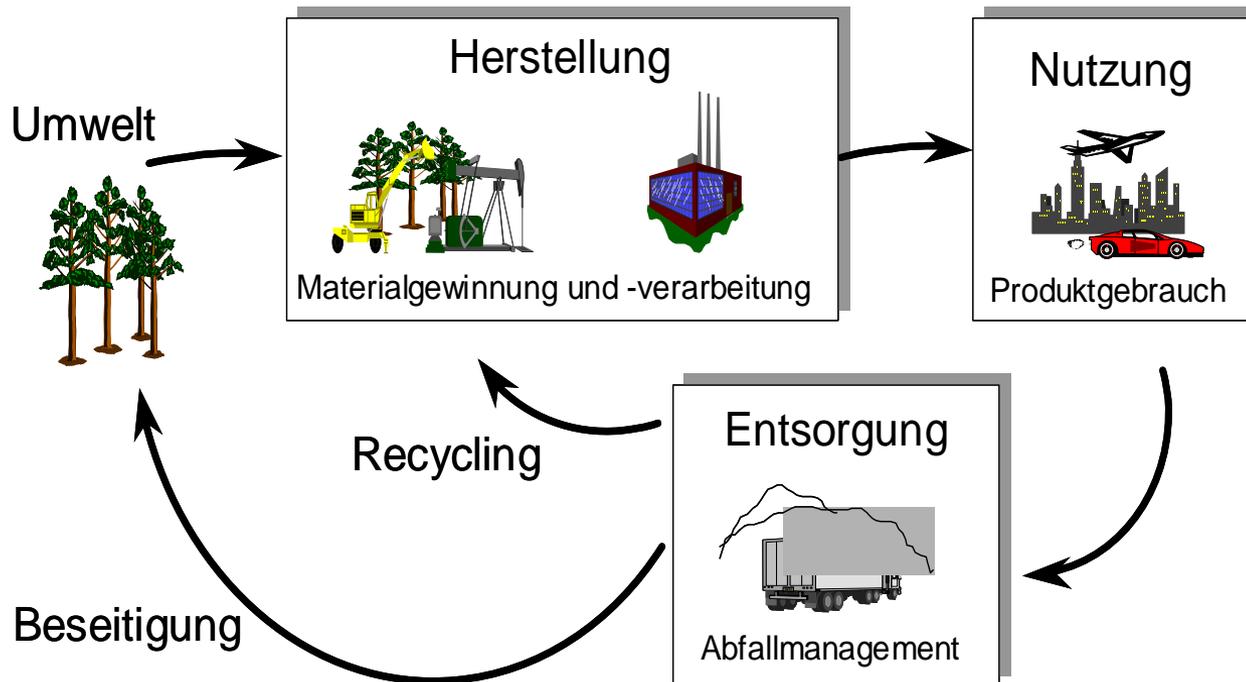
Sao Luis, Brasilien 1999 (Rotschlammdeponie)

## Lebenszyklusansatz

Bewertung der Umweltauswirkungen über den Produktlebensweg

- Von der Wiege bis zur Bahre  
oder
- Von der Wiege bis zur Wiege

DIN ISO 14040 und 14044  
zur Ökobilanz  
(Life Cycle Assessment)

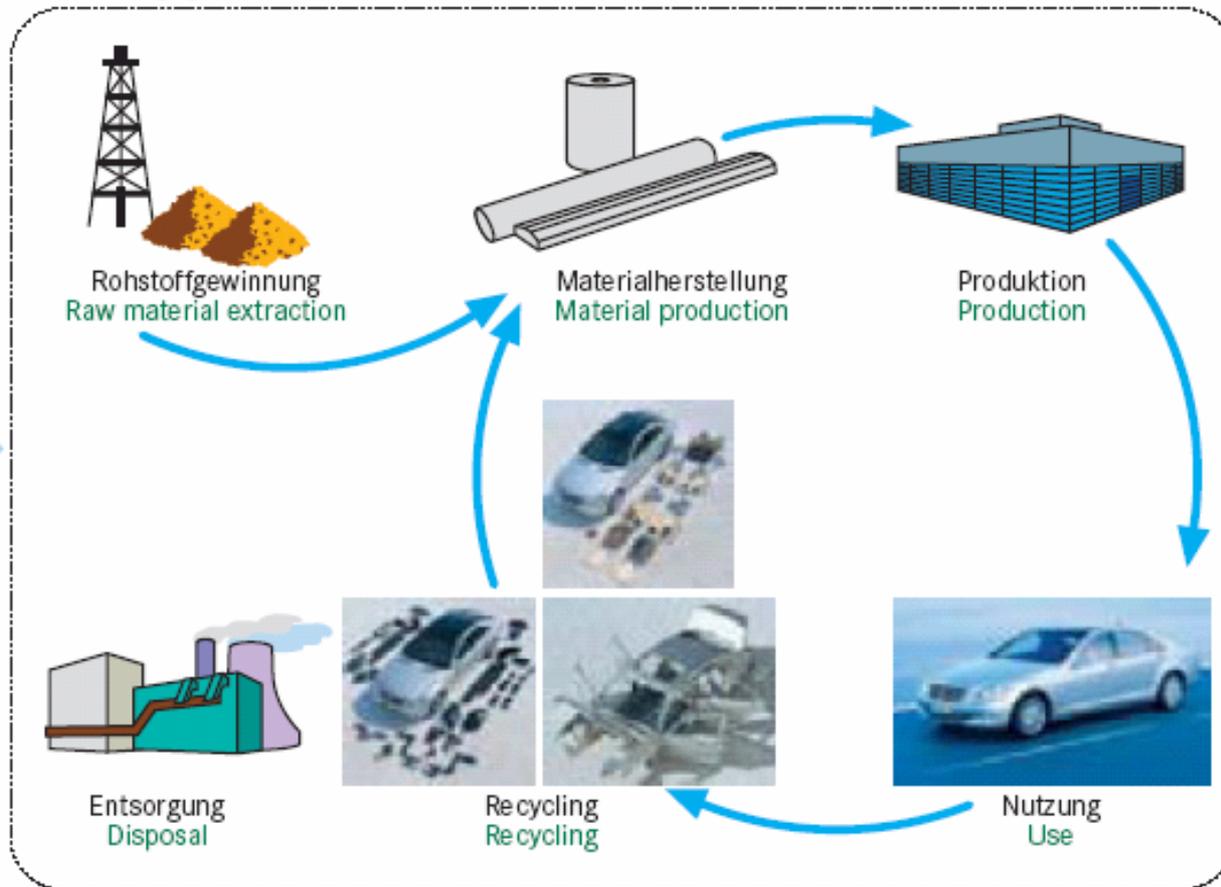


# Die Ökobilanz – Life Cycle Assessment

- Energie
  - elektrisch
  - mechanisch
  - thermisch
- Betriebsstoffe
- Hilfsstoffe
- Zusatzstoffe

## Input

- Energy
  - electric
  - mechanical
  - thermal
- Service fluids
- Aux. materials
- Additives



- Abfall
- Abwasser
- Abwärme
- Reststoffe
- Nebenprodukte
- Emissionen in
  - Luft
  - Wasser
  - Boden
- Abraum

## Output

- Waste
- Wastewater
- Waste heat
- Residues
- Byproducts
- Emissions to
  - air
  - water
  - soil
- Overburden

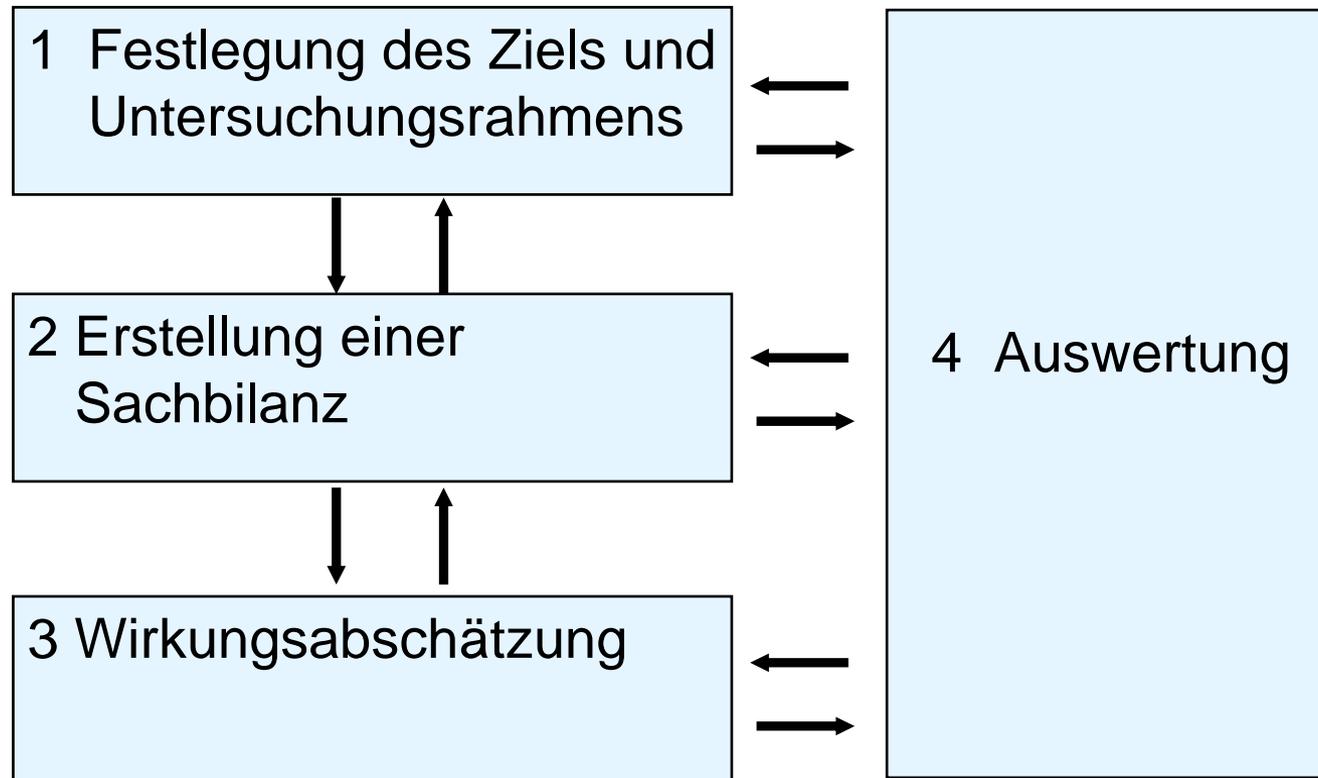
[Quelle Daimler Chrysler]

## Warum werden Ökobilanzen gemacht ?

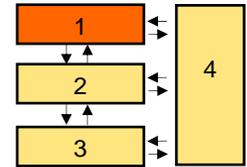
- Möglichste umfassende Erfassung der Umweltauswirkungen von Produkten, Prozessen, Dienstleistungen unter Betrachtung des gesamten Lebenswegs
- Aufzeigen von Potentialen zur Verbesserung der Umwelteigenschaften von Produkten, Verfahren und Dienstleistungen
- Transparenz und Objektivierung durch modulares Vorgehen
- Umweltmedienübergreifende Betrachtung
- Bereitstellung von Entscheidungshilfen in der Industrie, Politik, Non-Profit Organisationen sowie bei der Umweltproduktdeklaration



## Aufbau einer Ökobilanz (nach DIN ISO 14040)



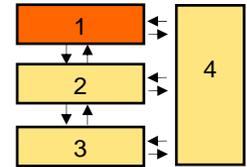
## Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens



- Das Ziel einer Ökobilanz-Studie muss eindeutig die beabsichtigte Anwendung festlegen sowie die angesprochenen Zielgruppen aufführen.
- Die wichtigsten Festlegungen des Untersuchungsrahmens sind
  - die Funktion und funktionelle Einheit des Untersuchungsgegenstandes,
  - die Systemgrenzen (räumlich und zeitlich), die Annahmen, die Abschneidekriterien
  - sowie die Anforderungen an Daten und ihre Qualität

## funktionelle Einheit

⇒ Quantifizierter Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit in einer Ökobilanzstudie

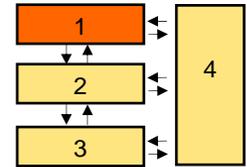


## Elementarfluss

- ⇒ Stoff oder Energie, der bzw. die dem untersuchten System zugeführt wird und der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen wurde
- ⇒ Stoff oder Energie, der bzw. die das untersuchte System verlässt und ohne anschließende Behandlung durch den Menschen an die Umwelt abgegeben wird

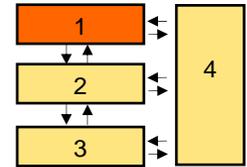
## Produktsystem

- ⇒ Produktsysteme werden in eine Gruppe von Modulen unterteilt.  
Module sind:
- untereinander durch Zwischenprodukte und/oder Abfälle,
  - mit anderen Produktsystemen durch Produktflüsse
  - mit der Umgebung durch Elementarflüsse verbunden.



## Referenzfluß

- ⇒ Maß für die Outputs von Prozessen eines vorhandenen Produktsystems, die zur Erfüllung der Funktion, ausgedrückt durch die funktionelle Einheit, erforderlich sind.



## Systemgrenze

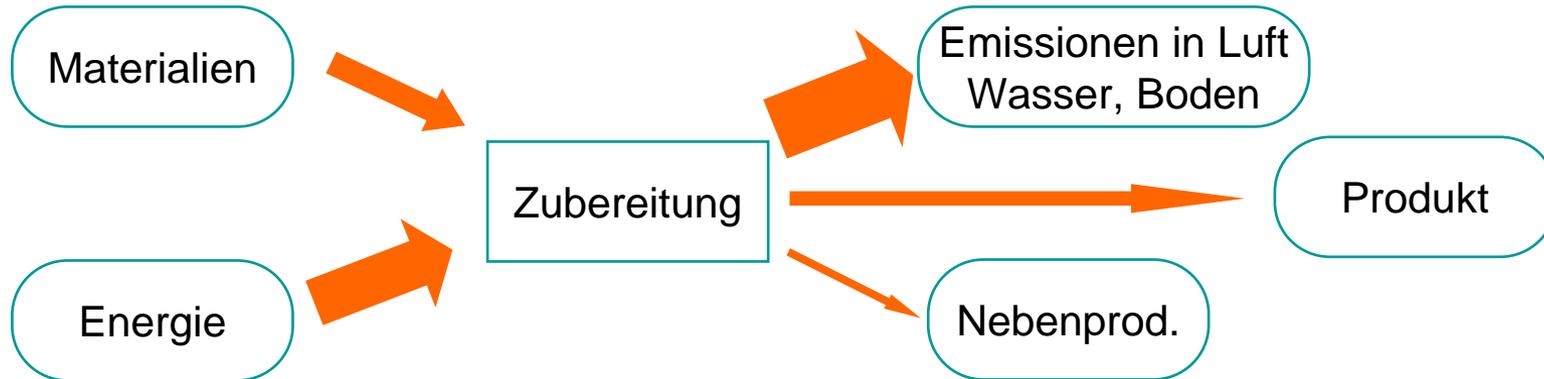
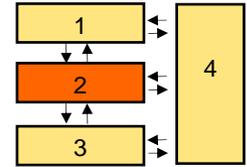
⇒ Satz von Kriterien zur Festlegung, welche Prozessmodule Teil eines Produktsystems sind

## Abschneidekriterien

⇒ Festlegung der Stoffmenge, eines Energieflusses oder des Grades von Umweltrelevanz, die/der mit Prozessmodulen oder Produktsystemen verbunden sind, welche von einer Studie auszuschließen sind

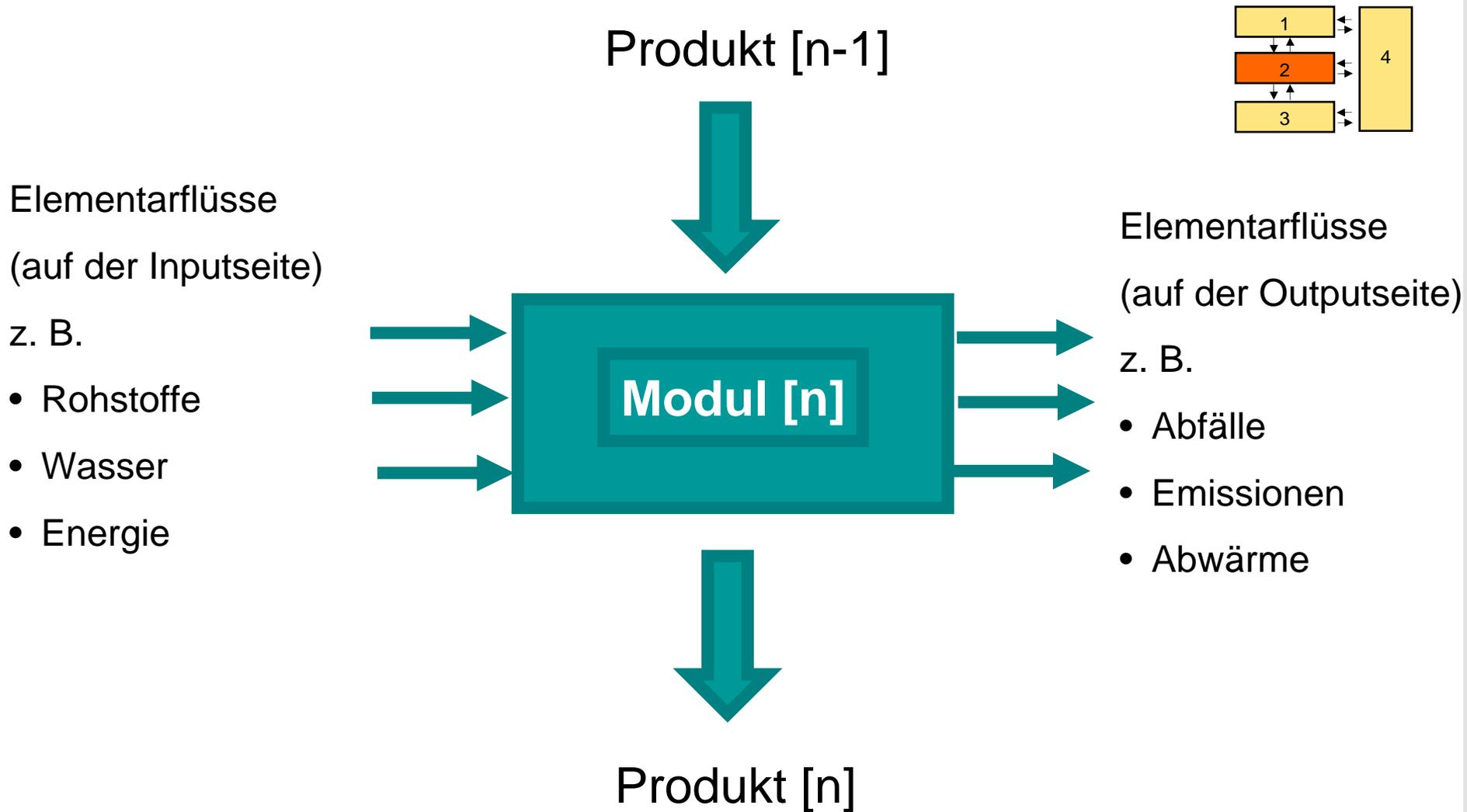
## Erstellung einer Sachbilanz

Erfassung aller relevanten Stoff- und Energieströme, die zur Produktion der funktionellen Einheit erforderlich sind und mit der Umwelt als Systemgrenze in Beziehung stehen.

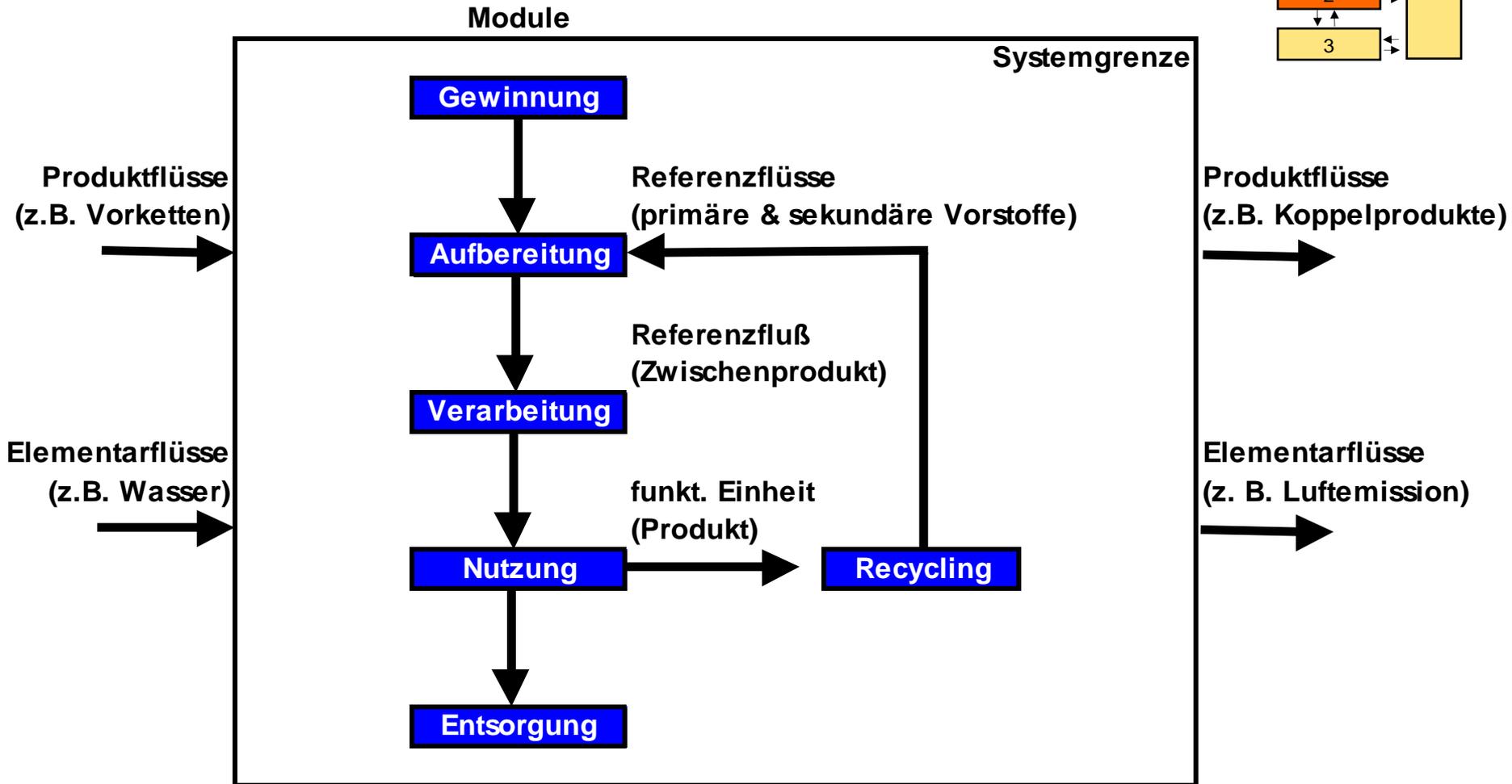


Input	Menge	Output	Menge
Material A	kg	Produkt	kg
Energieträger A	kg	Emission in Luft Stoff X	kg
...		Emission in Wasser Stoff Y ...	kg

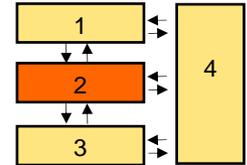
# Die Ökobilanz – Life Cycle Assessment



## Prozesskette



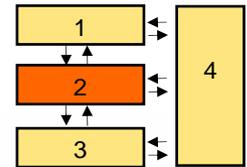
## Rohstoffbilanz



Ressourcen (stofflich) Resources (material)	Neue S-Klasse New S-Class	Vorgängermodell Previous model	Delta Delta	Kommentar Comment
Bauxit [kg] Bauxite [kg]	1169	683	71 %	höherer Primäraluminium-Einsatz Higher primary aluminum input
Eisenerz [kg] Iron ore [kg]	2010	2096	- 4 %	
Kupfererz [kg] Copper ore [kg]	52	42	23 %	Elektronik/Leitungssätze Electronics/wiring harnesses
Zinkerz [kg] Zinc ore [kg]	12,2	13,0	- 6 %	Verzinkung Stahlblech Anbauteile Galvanizing sheet steel attached parts
Seltene Erden Erz [kg] Rare earths [kg]	82,4	130	- 36 %	Edelmetalle (Katalysator) Precious metals (catalyst)
Dolomit [kg] Dolomite [kg]	79,4	17,5	355 %	höherer Magnesium-Einsatz (Leichtmetall) Higher magnesium use (light alloy)

[Quelle Daimler Chrysler]

## Rohstoffbilanz (2)

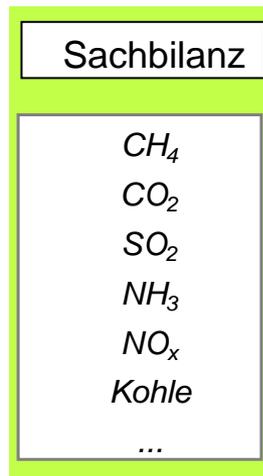
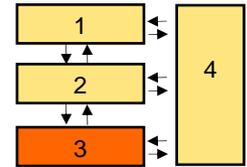


Ressourcen (energetisch) Energieträger	Neue S-Klasse	Vorgängermodell	Delta	Kommentar
Resources (energy) energy sources	New S-Class	Previous model	Delta	Comment
Primärenergie gesamt [GJ]	1360	1445	- 6 %	Einsparung aus geringerem Kraftstoffverbrauch überwiegt Mehraufwand aus Pkw-Herstellung
Total primary energy [GJ]	1360	1445	- 6 %	Savings from reduced fuel consumption outweigh additional input for car manufacture
Anteil aus Share from				
Braunkohle [GJ]	24,1	21,7	11 %	höhere Energiebereitstellung (Pkw-Herstellung)
Brown coal [GJ]	24.1	21.7	11 %	More energy provided for car manufacture
Erdgas [GJ]	88,8	88,9	0 %	
Natural gas [GJ]	88.8	88.9	0 %	
Erdöl [GJ]	1138	1239	- 8 %	geringerer Kraftstoffverbrauch
Crude oil [GJ]	1138	1239	- 8 %	Less fuel consumption
Steinkohle [GJ]	54,7	49,2	11 %	höhere Energiebereitstellung (Pkw-Herstellung)
Hard coal [GJ]	54.7	49.2	11 %	More energy provided for car manufacture
Uran [GJ]	44,5	39,3	13 %	höhere Energiebereitstellung (Pkw-Herstellung)
Uranium [GJ]	44.5	39.3	13 %	More energy provided for car manufacture

[Quelle Daimler Chrysler]

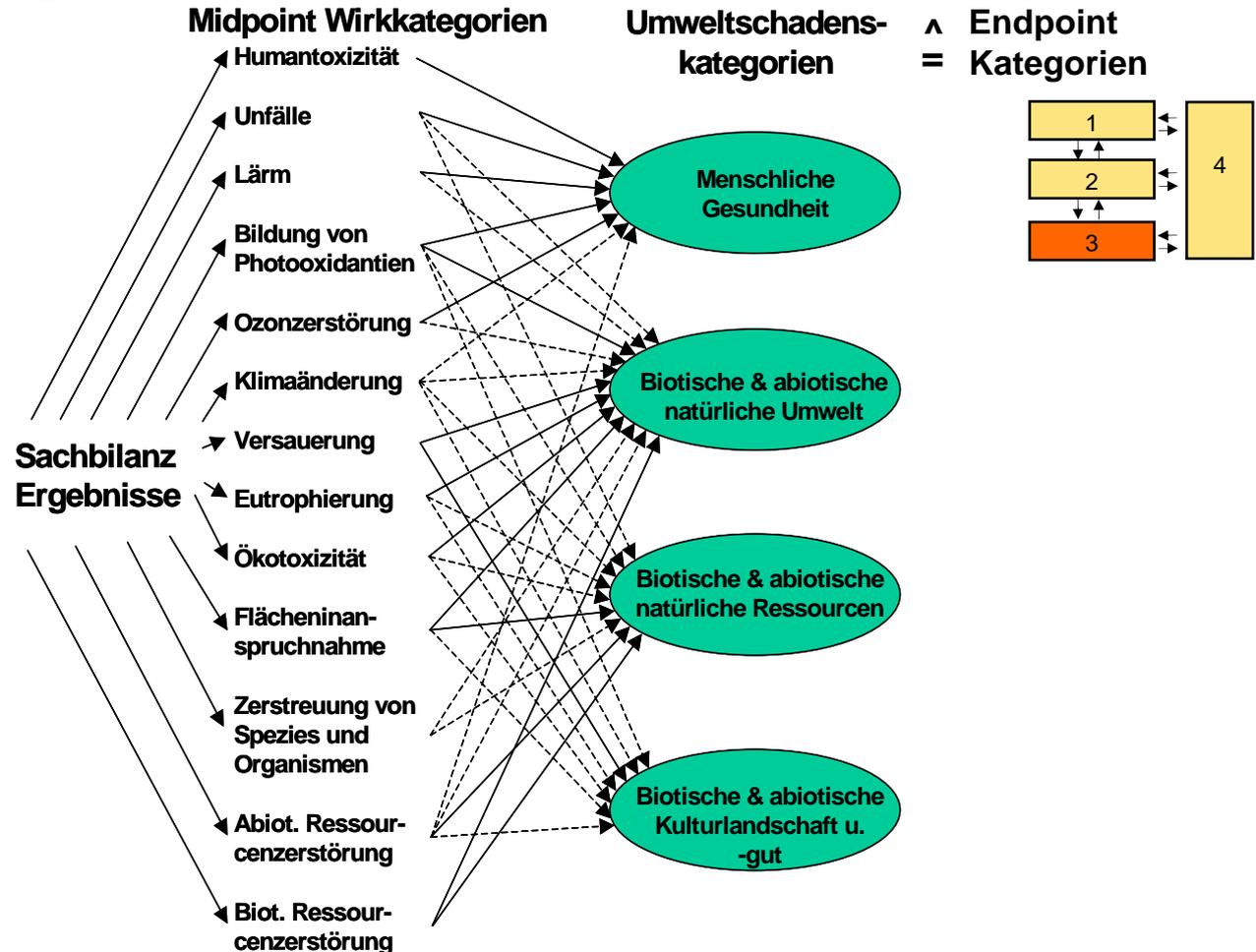
## Wirkungsabschätzung

Herstellung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen den Daten der Sachbilanz und den Umweltauswirkungen



## Wirkungskategorien

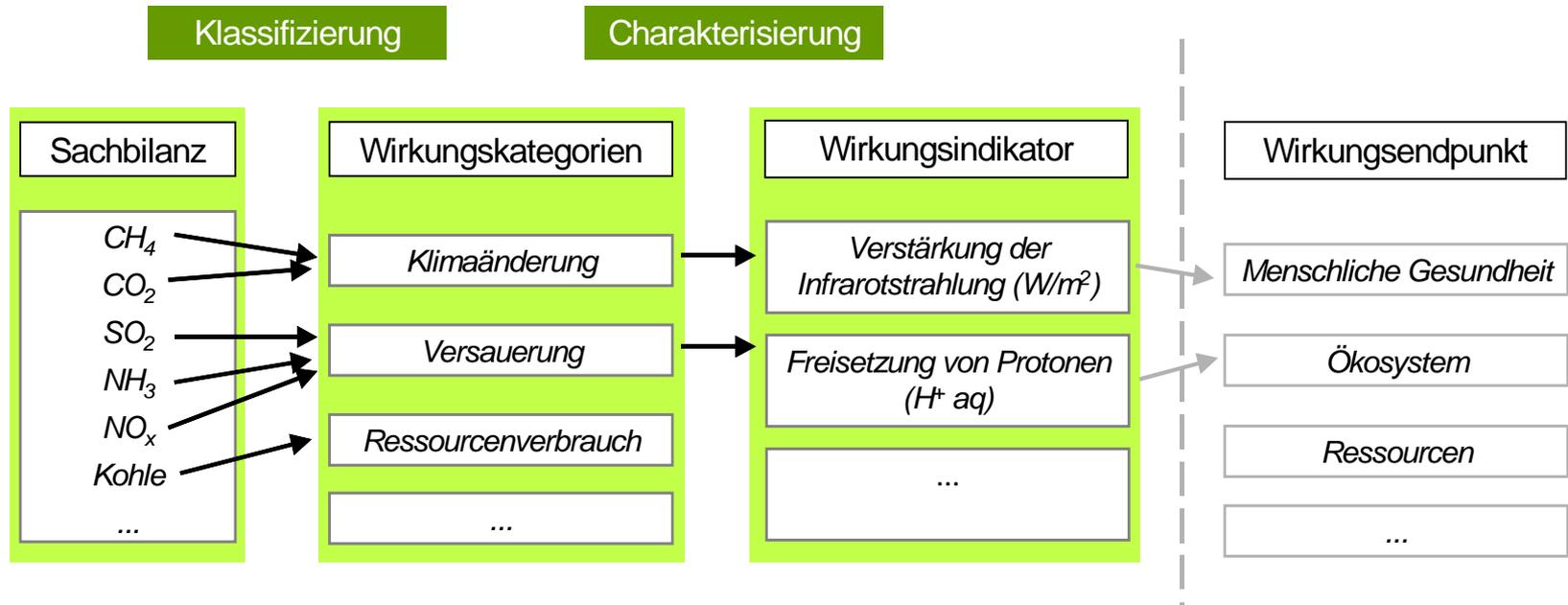
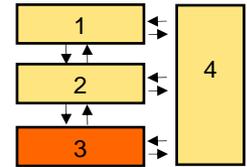
Darstellung der Wirkungspfade über Midpoint zum Endpoint



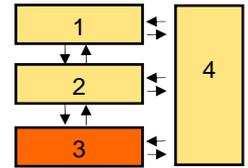
nach Jolliet et al.: The LCIA Midpoint-Damage Framework ....  
Int. Journal of LCA 2004, Nr. 6 S. 395

## Wirkungsabschätzung

Herstellung eines funktionalen Zusammenhangs zwischen den Daten der Sachbilanz und den Umweltauswirkungen



## Wirkungsabschätzungsmethode: Eco-Indicator99

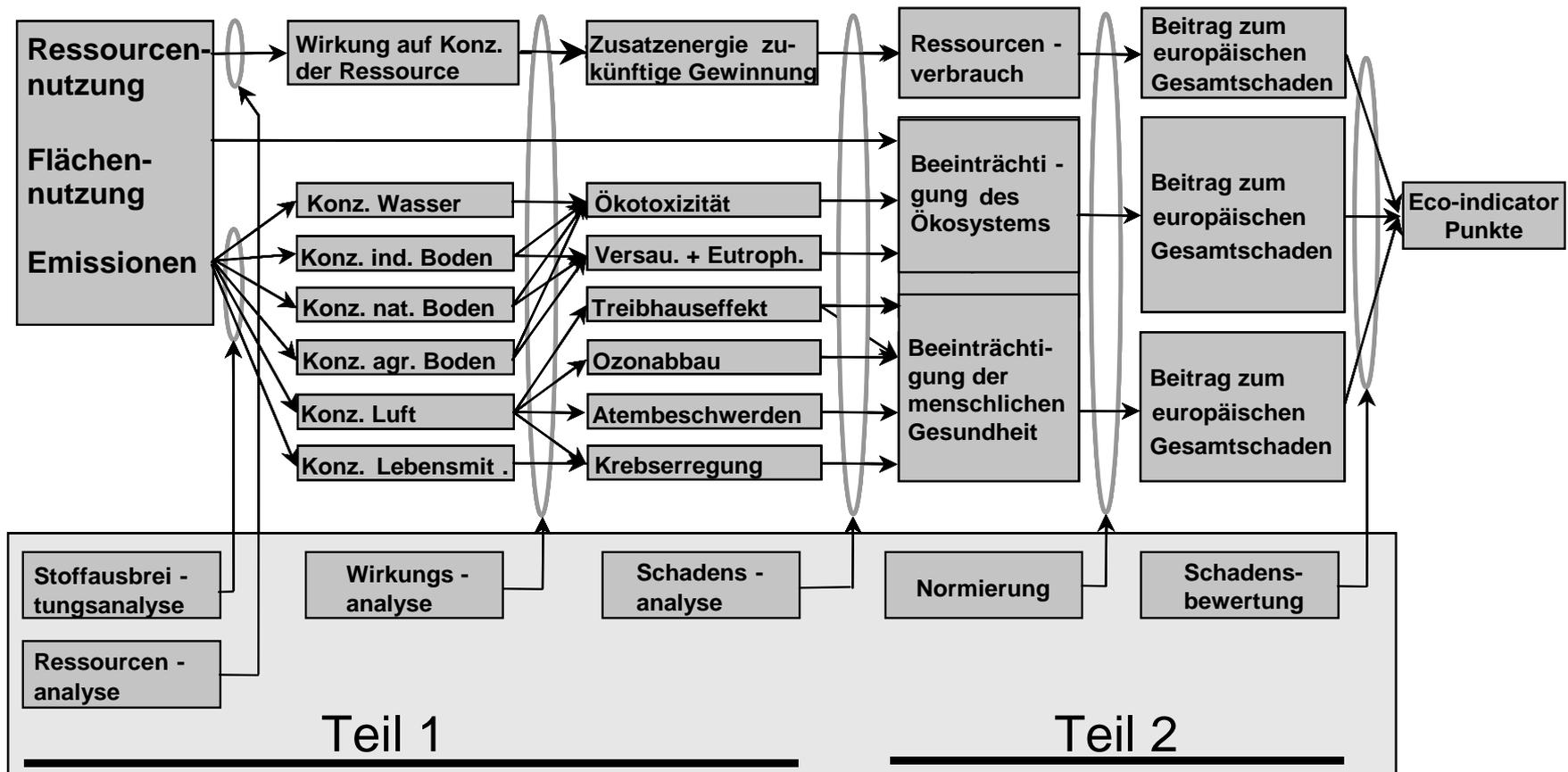
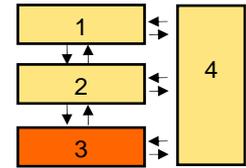


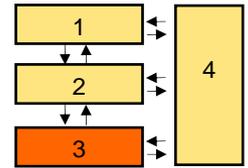
- Methode zur Ermittlung der potentiellen Umweltwirkungen auf Basis der Sachbilanz
- Untersuchung der Schädigung von menschlicher Gesundheit, Ökosystemqualität, Ressourcen



- Ausweisung der Schädigung für jedes Schutzgut in einer Einheit (DALYs, Verlust von Organismen, Zusatzenergieaufwand)
- Aggregation der Ergebnisse durch Normierung u. Gewichtung zu Eco-indicator Punkten (Pts)

## Wirkungsabschätzungsmethode: Eco-Indicator99



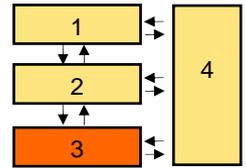


## Wirkungskategorie Klimawandel (midpoint)



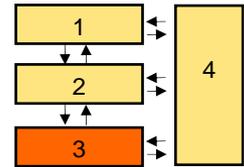
Wirkungskategorie	Klimawandel
Sachbilanzergebnisse	Emissionen von Treibhausgasen
Wirkungsindikator	Erhöhung des Infrarotstrahlungsantriebs ( $W/m^2$ )
Charakterisierungsmodell	Modell wurde vom International Panel of Climate Change (IPCC) entwickelt. Es definiert das Treibhauspotential für verschiedene Treibhausgase für verschiedene Zeithorizonte.
Charakterisierungsfaktor	Treibhauspotential für die Zeithorizonte von 20, 100, 500 Jahren (GWP 20, GWP 100, GWP 500) für jedes Treibhausgas (kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent/kg Emission)
Indikatorergebnis	kg CO <sub>2</sub> -Äquivalente
Wirkungsendpunkte	Menschliche Gesundheit, Korallenriff, Antarktis, Getreidepflanzen
Umweltrelevanz	Der Infrarotstrahlungsantrieb steht stellvertretend für eventuelle Effekte des Klimas, die von der integrierten Wärmeabsorption der Atmosphäre abhängen, die durch Emissionen und deren Verteilung über die Zeit verursacht werden.

## Treibhauspotenzial verschiedener Treibhausgase



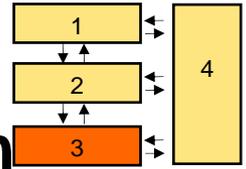
Treibhausgas-substanzen	Summenformel	Atmosphärische Verweilzeit (in Jahren)	GWP 100 (kg CO2 Äquiv.)
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>		1
1,1,1-Trichlorethan	C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> H		110
Trichlormethan	CCl <sub>3</sub> H	0,55	4
Dichlormethan	CCl <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0,41	9
Methan	CH <sub>4</sub>	9 - 15	21
Distickstoffoxid	N <sub>2</sub> O	114	296
FCKW R11	CCl <sub>3</sub> F	50	4000
FCKW R113	C <sub>2</sub> F <sub>3</sub> HCi <sub>2</sub>	85	5000
FCKW R114		300	9300
FCKW R115		1700	9300
FCKW R12		102	8500
FCKW R13		640	11700
HALON-1301		65	5600
HFCKW R123		1,4	93
HFCKW R124		5,9	480
HFCKW R141b		9,4	630
HFCKW R142b		19,5	2000
HFCKW R22		13,3	1700
Schwefelhexafluorid	SF <sub>6</sub>	3200	23900

## Wirkungskategorie Versauerung



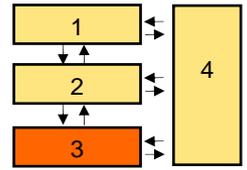
Wirkungskategorie	Versauerung I	Versauerung II
Sachbilanzergebnisse	Emissionen von säurebildenden Substanzen ins Wasser und die Luft	Emissionen von säurebildenden Substanzen in die Luft
Wirkungsindikator	Maximale Freisetzung von H <sup>+</sup> -Ionen	Erhöhung des potentiell erkrankten Teils an Pflanzenarten in natürlichen Gebieten (PDF)
Charakterisierungsmodell	CML-Methode	Eco-indicator 99 (Umweltschadensmodell)
Charakterisierungsfaktor	Versauerungspotential AP für säurebildende Substanzen ins Wasser u. die Luft (kg SO <sub>2</sub> -Äquivalente/kg	Potentiell erkrankter Teil an Pflanzenarten (PDF) durch säurebildende Substanzen in Luft (PDF*m <sup>2</sup> * Jahr /kg Emission)
Indikatorergebnis	kg SO <sub>2</sub> -Äquivalente	PDF*m <sup>2</sup> * Jahr
Wirkungsendpunkte	Biodiversität, Wald, Fisch, Natürliche Vegetation, Denkmal	Biodiversität, Wald, Fisch, Natürliche Vegetation, Denkmal
Umweltrelevanz	Maximaler potentieller Wirkungseffekt; Ausbreitung u. Verteilung der Emission wird nicht berücksichtigt; keine räumliche Differenzierung	Ausbreitung u. Verteilung sowie der Wirkungseffekt der Emission wird berücksichtigt; Die Wirkungseffekte in den Niederlanden werden auf Europa übertragen





## Versauerungspotentiale säurebildender Substanzen

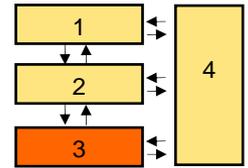
Säurebildende Substanzen	Summenformel	CML-Methode Versauerungspot.	Eco-Indicator99 Beeinträchtigung des Ökosystems
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	1,88	1,52
Salzsäure	HCl	0,88	-
Flußsäure	HF	1,6	-
hydrogen sulfide	HSO <sub>3</sub>	1,88	-
Salpetersäure	HNO <sub>3</sub>	0,51	0,557
Stickstoffdioxide	NO <sub>2</sub>	0,7	0,557
Stickstoffmonoxide	NO	1,07	-
Stickstoffoxide	NO <sub>x</sub>	0,7	0,557
Phosphorsäure	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	0,98	-
Schwefeldioxide	SO <sub>2</sub> <sup>-2</sup>	1	0,101
Schwefeltrioxid	SO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	0,8	-
Schwefelsäure	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,65	0,101



## Wirkungskategorie Toxizität

- Humantoxizität
- Ökotoxizität

=> Schadwirkung von chemischen Substanzen



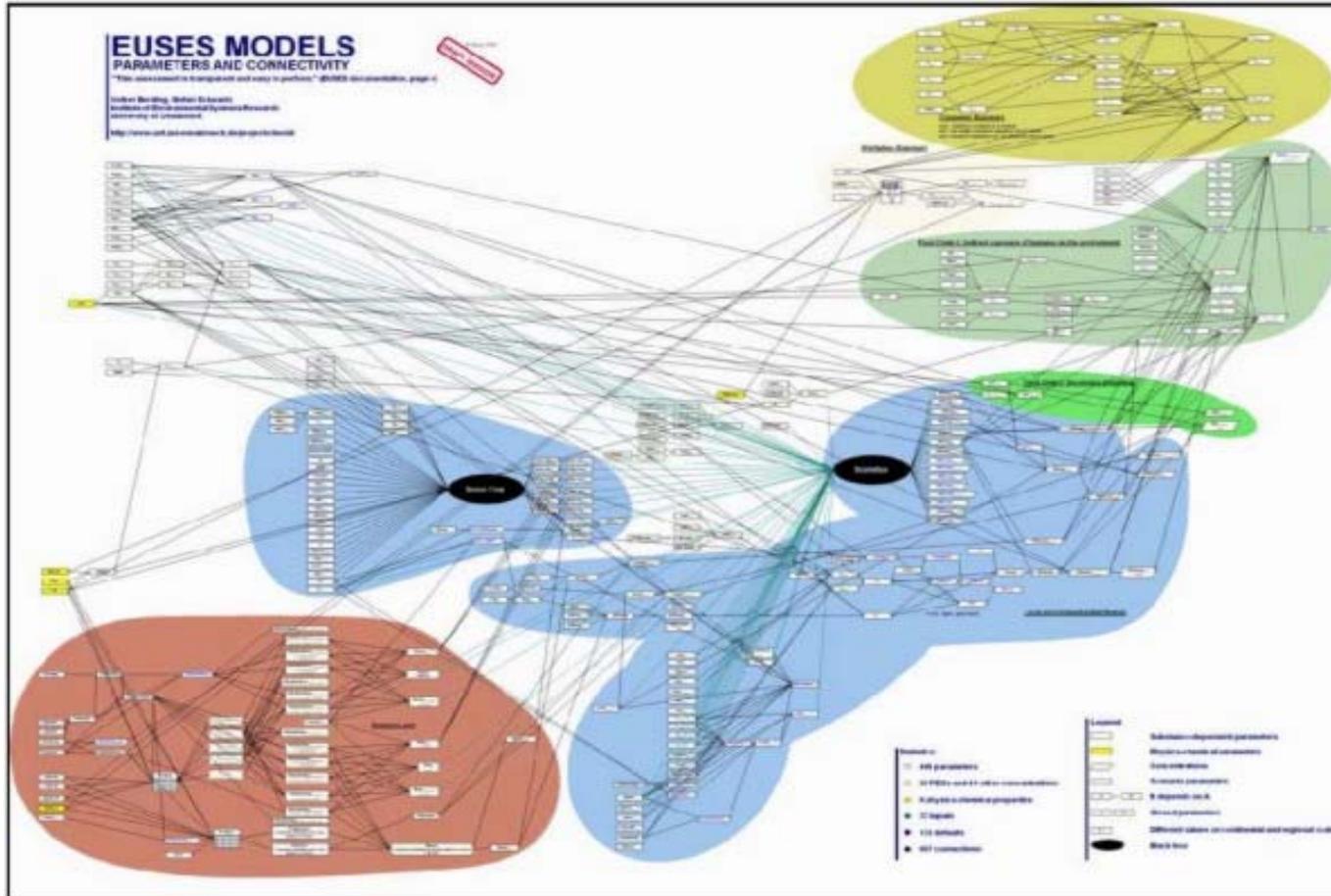
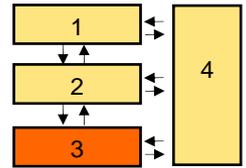
## Risikoabschätzung chemischer Substanzen

<i>Welche Mengen eines Stoffes werden freigesetzt?</i>	Sachbilanz
Wie verteilt sich der Stoff in der Umwelt?	Ausbreitung, (Verteilung, Anreicherung, Abbau)
Welche Mengen eines Stoffes nehmen Organismen auf?	Exposition
Welche Folgen hat die Aufnahme eines Stoffes durch einen Organismus?	Toxizität

**Wirkungs-  
abschätzung**

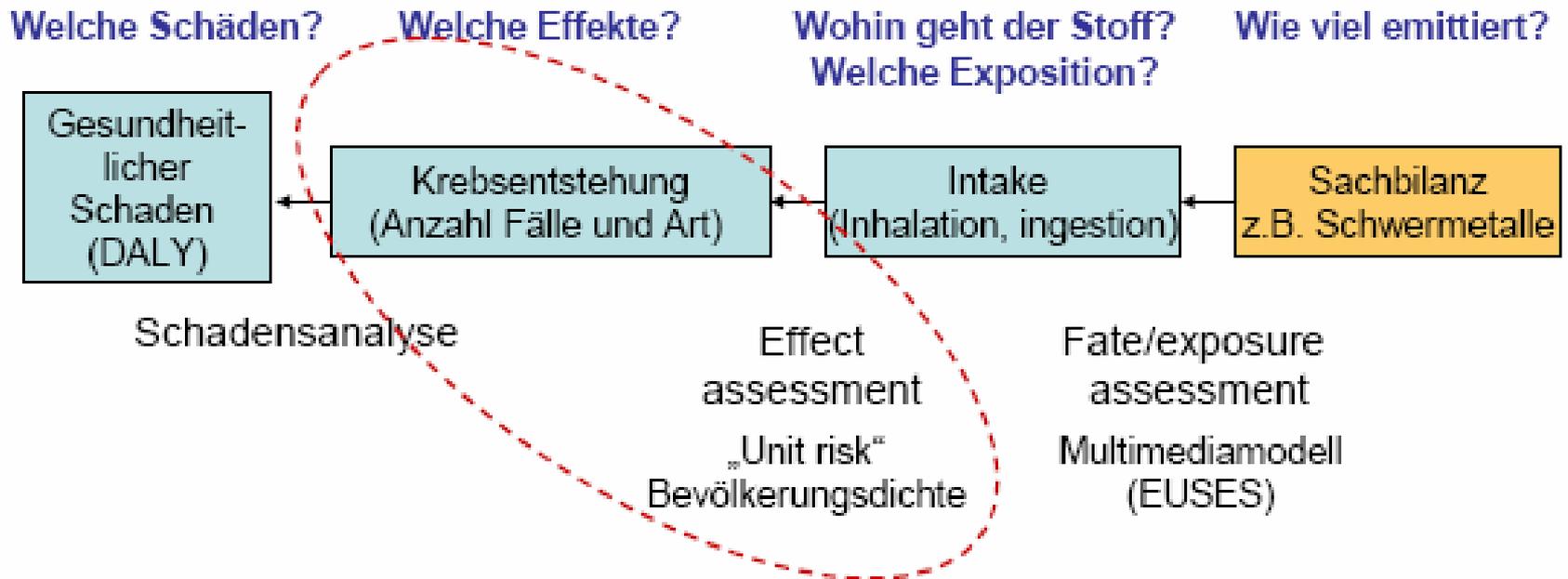
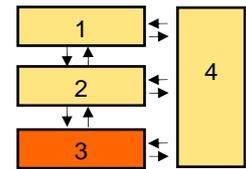
# Die Ökobilanz – Life Cycle Assessment

## Ausbreitungsmodell EUSES



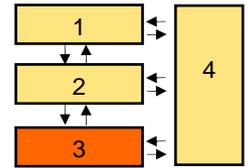
# Die Ökobilanz – Life Cycle Assessment

## Eco-indicator 99 (kanzerogene Effekte)

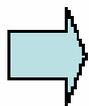


[Hellweg ETH]

## Eco-indicator 99 (kanzerogene Effekte)



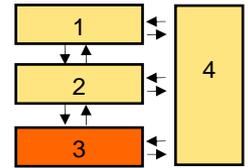
**Unit-risk concept** (WHO 1987): Schätzung einer Wahrscheinlichkeit, dass ein Individuum eine bestimmte Art von Krebs entwickelt, wenn es mit einem Mikrogramm Schadstoff pro  $\text{m}^3$  während 70 Jahren exponiert wird.



Mit den modellierten Konzentrationen  $C$ , den „unit-risk values“  $UR$  und der durchschnittlichen Bevölkerungsdichte  $PD$  kann die **Anzahl und Art der Krebsfälle pro kg emittierter Substanz** geschätzt werden.

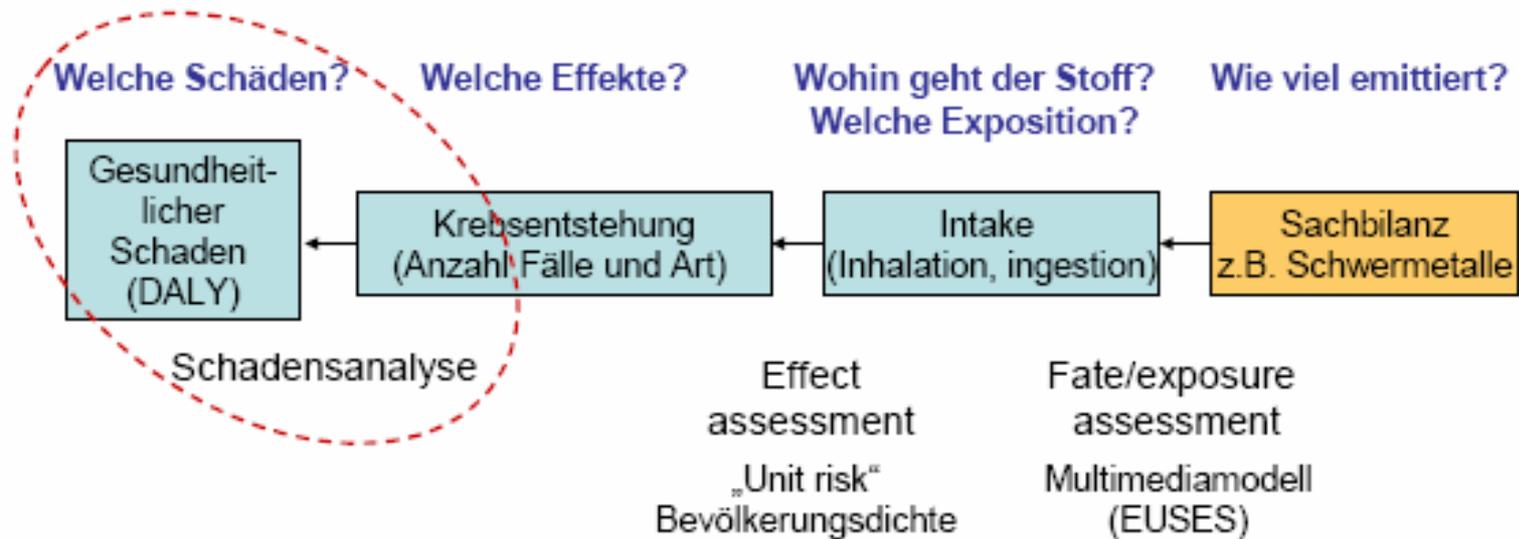
[Hellweg ETH]

# Die Ökobilanz – Life Cycle Assessment



## Eco-indicator 99 (kanzerogene Effekte)

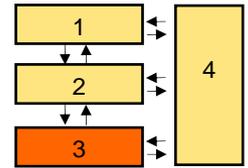
Disability adjusted life years (DALY)



[Hellweg ETH]

# Die Ökobilanz – Life Cycle Assessment

## Eco-indicator 99 (kanzerogene Effekte)



### Schätzung DALYs\*:

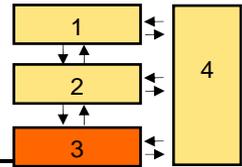
Verwendung von Statistiken über Überlebensraten sowie Krankheitsdauern



Berechnung der verlorenen Lebensjahre (YLL) sowie der „years lived disabled (YLD)“. YLL und YLD ergeben zusammen die **disability adjusted life years (DALYs)**.

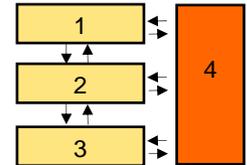
[Hellweg ETH]

## Bewertungsverfahren des Eco-indicator 99



Betrachtertyp	zeitliche Perspektive	Handhabbarkeit von Umweltproblemen	Notwendiger wissenschaftlicher Beweis	Gewichtung
H (Hierarchist)	Ausgleich zwischen kurz- und langfristigen Effekten	richtiges Verhalten kann viele Probleme verhindern	Berücksichtigung von Effekten auf Konsens basierend	HH: 40 %, EQ: 40 %, R: 20 %
I (Individualist)	kurzfristig	Technologie kann viele Probleme verhindern	nur bewiesene Effekte	HH: 55 %, EQ: 25 %, R: 20 %
E (Egalitarian)	sehr langfristig	Probleme können zu Katastrophen führen	alle möglichen Effekte	HH: 30 %, EQ: 50 %, R: 20 %

## Auswertung



Auf Basis der erstellten Sachbilanz und Wirkungsabschätzung sowie der am Anfang festgelegten Zieldefinition sind folgende Schritte durchzuführen:

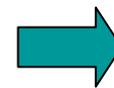
- Identifizierung der signifikanten Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung
- Beurteilung der Ergebnisse mittels Berücksichtigung von Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen
- Schlussfolgerungen, Empfehlungen und Bericht über die signifikanten Parameter

## Anwendung der Ökobilanz in der Produktgestaltung



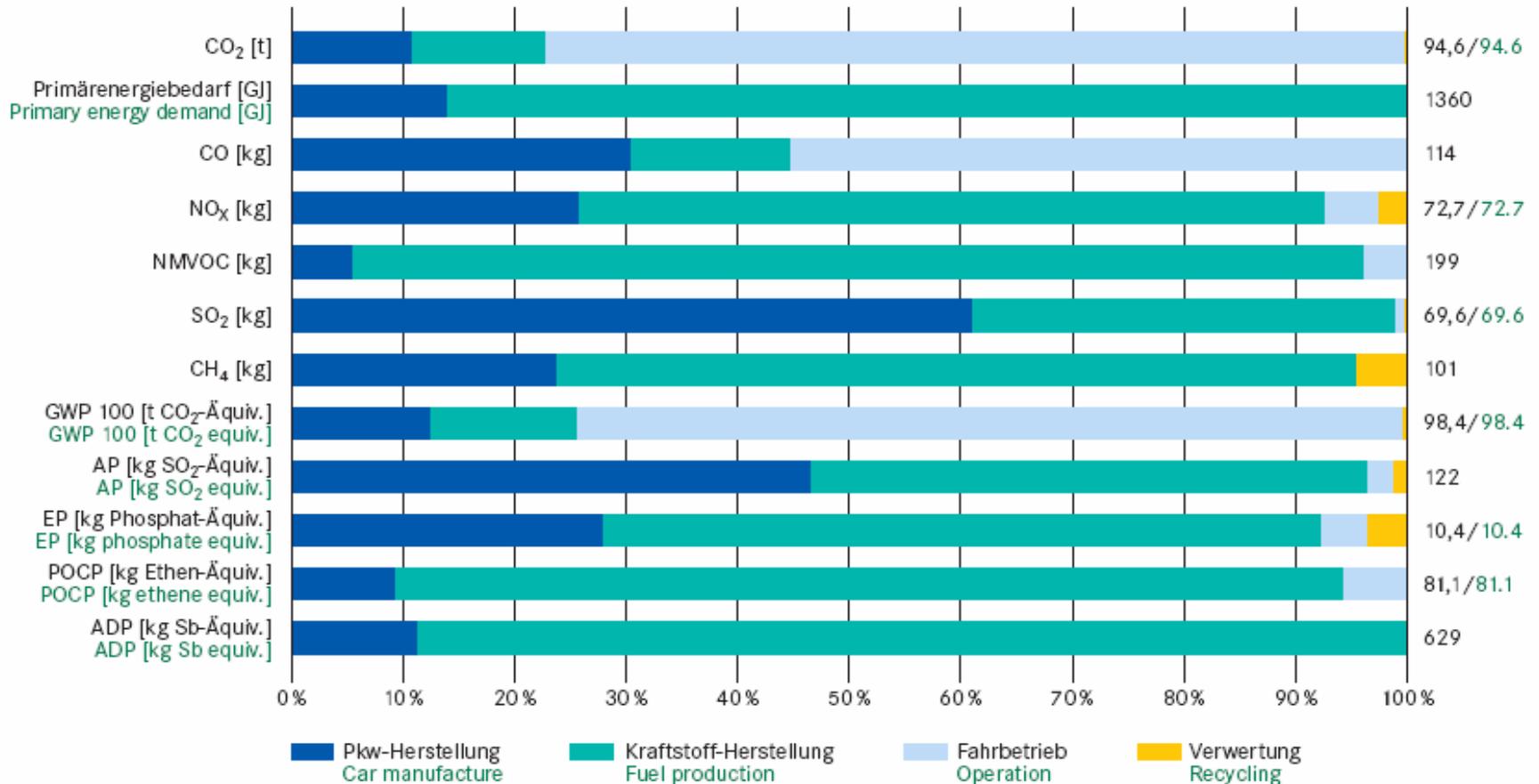
z.B. Automobilindustrie

- Fahrzeugkarosserie
- Einzelteile (Kotflügel, Türen, Kraftstofftank)
- Entsorgungsoptionen



Für die Zukunft:  
Ganzfahrzeugbilanzen

## Anwendung: Emissionsbilanz eines Autos

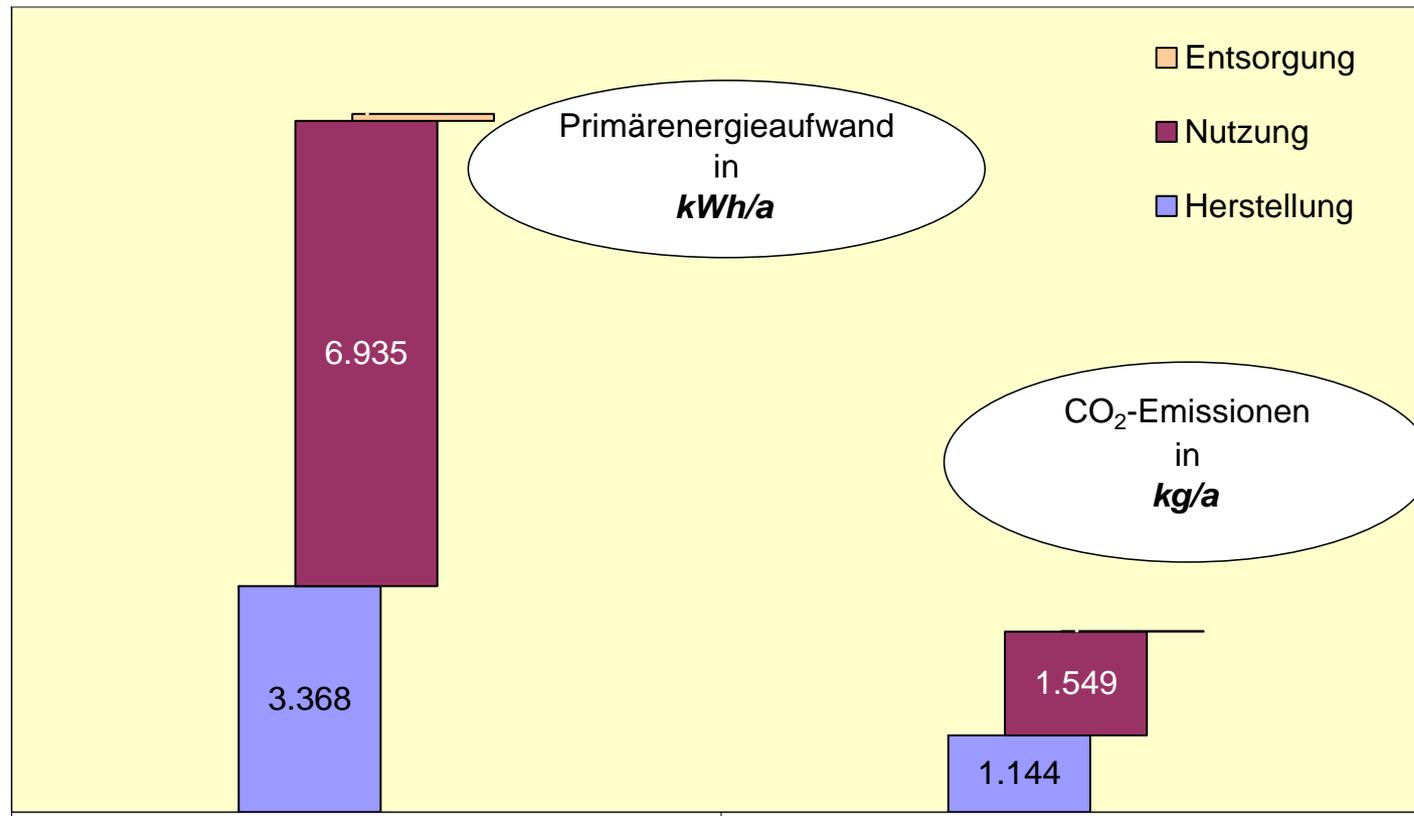


[Quelle Daimler Chrysler]

## Anwendung:

### Primärenergieaufwand und CO<sub>2</sub>-Emissionen über den Lebenszyklus (50a)

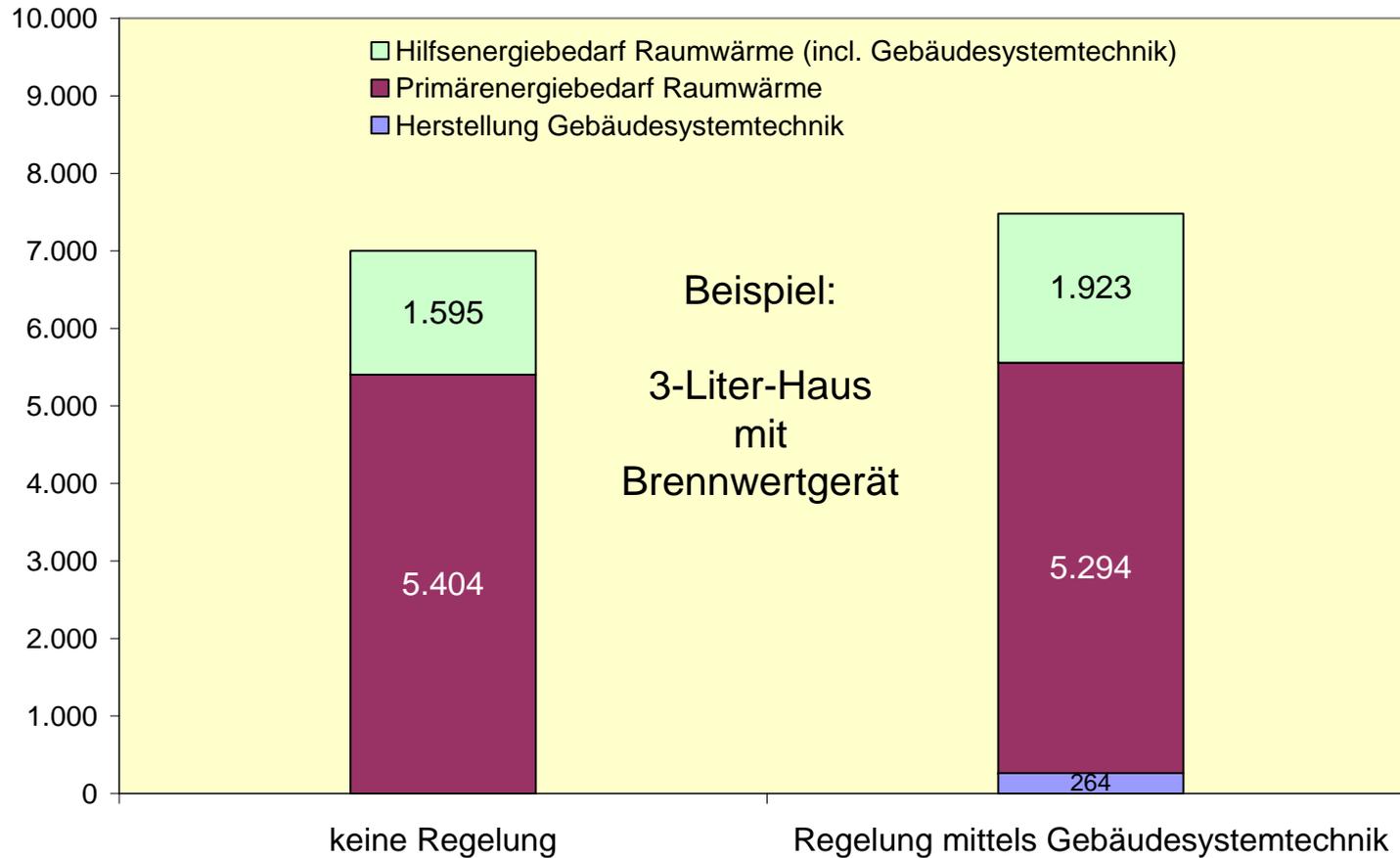
Beispiel: 3-Liter-Haus mit Erdreich-Wasser-Wärmepumpe



Quelle: Wagner, Universität Bochum

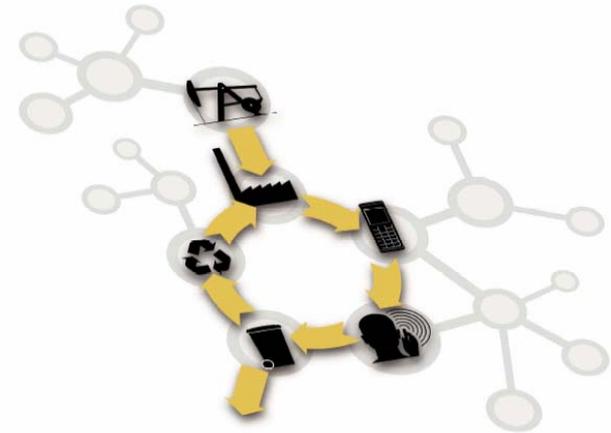
## Anwendung:

### Primärenergieaufwand mit und ohne intelligenter Gebäudesystemtechnik in kWh/a



Quelle: Wagner, Universität Bochum

- Für den Themenbereich Sachbilanz Skript von R. Frischknecht geeignet:  
[www.esu-services.ch/de/vorlesung.htm](http://www.esu-services.ch/de/vorlesung.htm)
- Für Wirkungsbilanz:
  - Eco-indicator 99 Methodology report:  
<http://www.pre.nl/eco-indicator99/>
  - Dutch Handbook on LCA (CML); Part 3:  
<http://www.leidenuniv.nl/cml/ssp/projects/lca2/lca2.html>
- Eine Einführung zum Thema  
Baumann, Henrikke:  
The hitchhiker's guide to LCA





## Sibylle Wursthorn

Institut für Technische Chemie  
Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme  
Forschungszentrum Karlsruhe

**[sibylle.wursthorn@itc-zts.fzk.de](mailto:sibylle.wursthorn@itc-zts.fzk.de)**

