



ulm university universität  
**uulm**



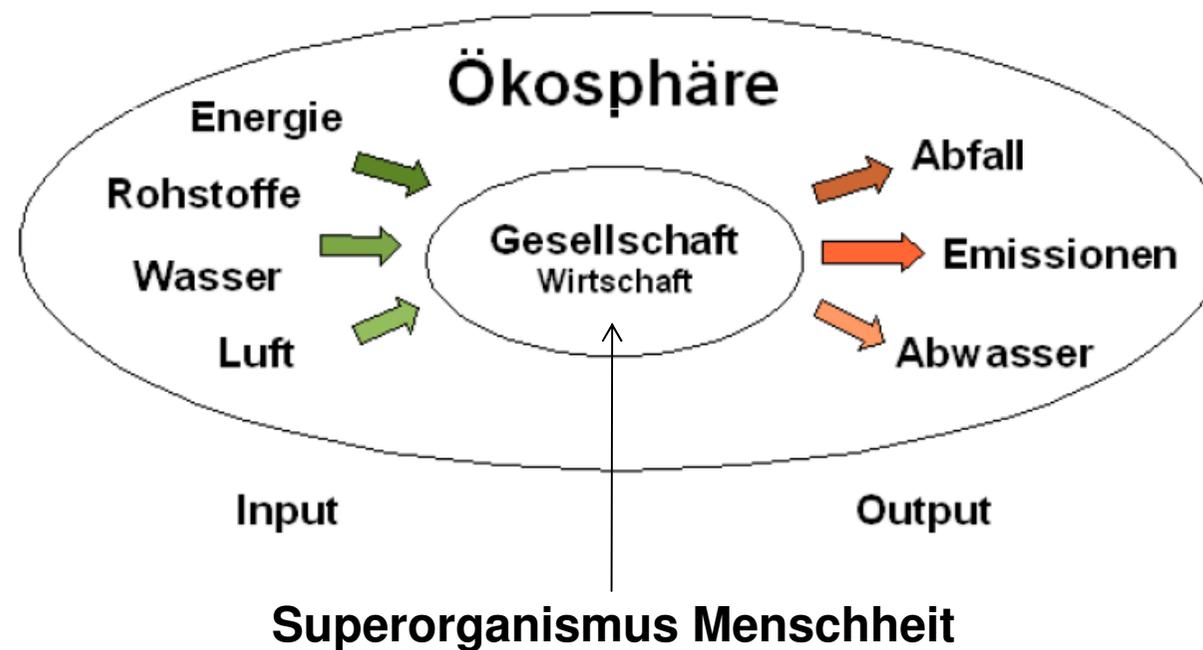
Ökologischer Fußabdruck | div. Indices

## Inhalt

- Mensch, Umwelt, Ressourcen
- Ökosphäre
- Ökologischer Fußabdruck
- Ökologischer Rucksack
  
- Happy Planet Index
  
- Living Planet Index
  
- Human Development Index
  
- Präferenzfunktionen

## Mensch, Umwelt, Ressourcen

- Umwelt im Sinne der Ökosphäre (Gesamtheit globalen Systems)
- Ressourcen, die die Umwelt den Menschen spendet
- Faktor Mensch mit völliger Abhängigkeit von seiner Umwelt



## Mensch, Umwelt, Ressourcen

- Wie belastet der Mensch die Ressourcen der Umwelt?
- Wie sieht es in den unterschiedlichen Regionen der Erde aus?
- Wie können die Werte aggregiert werden?
- Wie hoch ist der Input bzw. Output?
- Welche Prognosen können getroffen werden?
- Wie lange haben wir noch Zeit?
- **Wie kann die Belastung gemessen werden?**

## Ökosphäre – Input

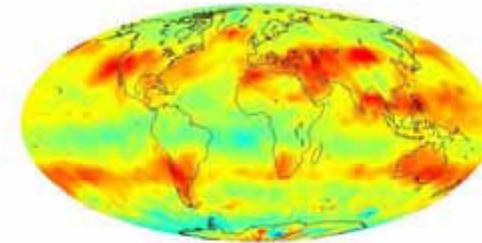
- Netto-Photosynthetisches-Produkt oder Netto-Primärproduktion (NPP)
- NPP = Gesamtmenge organisches Material, das von Lebewesen mit Kraft der Sonne hergestellt wird, d.h. Anteil der Energie, die Pflanze selbst nicht zum Leben braucht
  - ➔ Diesen Anteil benutzen Menschen, Nutztiere und Wildtiere
- $BPP = NPP + \text{Zellatmung}$  (Gesamtmenge der Biomassenproduktion durch Pflanzen, Blaualgen, autotrophe Bakterien)
- Maßeinheit:  $\text{mgC/h/m}^2$  [pro Zeiteinheit und Fläche in Biomasse gebundene Menge anorg. Kohlenstoffs]
- Maßeinheit:  $\text{kJ/h/m}^2$  [umgesetzte Energie pro Zeiteinheit und Fläche]
- Maximal BPP: Wattenmeere und tropischer Regenwald

## Ökosphäre – Input: weitere Quellenfunktionen

- Rohstoffe: Erdöl, Gas, Eisen, Holz
- Wasser: Trinkwasser
  - 40% der hergestellten Nahrungsmittel wachsen auf bewässertem Boden
  - 1 Mrd. Menschen keinen Zugang zu hygienischem Wasser
  - **Grenzen:** Wassermenge, Wasserqualität, Bodenversalzung durch Bewässerung, virtuelles Wasser
- Einige Beispiele Wasser:
  - Wasserkonsum Industrienationen: 500 – 800 L pro Kopf pro Tag
  - Wasserkonsum Entwicklungsländer: 60 – 150 L pro Kopf pro Tag
  - Virtuelles Wasser:
    - 0.25 L Bier (75 L virtuelles Wasser)
    - DIN A 4 (10 L virtuelles Wasser)
    - 1 Hamburger (2400 L virtuelles Wasser)
    - 1 kg Rindfleisch (15.000 L virtuelles Wasser)
    - 1 PKW (20.000 – 300.000 L virtuelles Wasser)

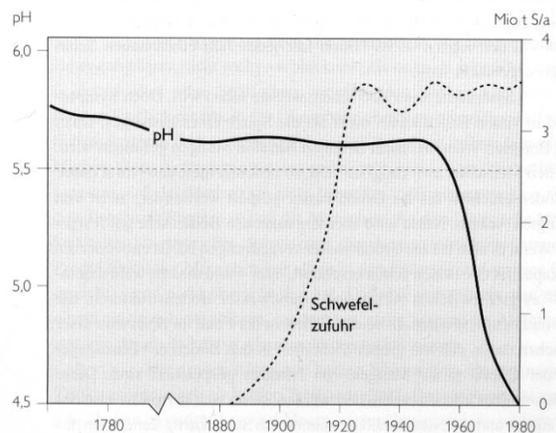
## Ökosphäre – Output

- Neben- bzw. Abfallprodukte (z.B. CO<sub>2</sub>, FCKW)
- Ökosysteme neigen zu „Grenzübergängen“
  - z.B. Großer Elchsee („Big Elk See“ durch sauren Regen; nach langer Phase einer Pufferung, plötzlicher Abfall des pH – Wertes



376 378 380 382 384 386

AIRS July 2008 CO<sub>2</sub> (ppmv)



„Zeitbombe“



## Ökologischer Fußabdruck – Was verbraucht der Mensch?

- Menschlicher Naturzustand: Jäger & Sammler
- Gute Überlebenschancen, jedoch mit deren Verhältnisse nur ca. 20 Mio. Menschen, die unser Planet ernähren kann
- Jäger & Sammler: ca. 1 t Material-Input-Pro-Kopf (1 Jahr)
- Agrargesellschaft: ca. 5 t Material-Input-Pro-Kopf (1 Jahr)
- Industriegesellschaft: ca. 15 - 35 t Material-Input-Pro-Kopf (1 Jahr)
  - Aber: heute werden Produkte aufwendig hergestellt => ca. 40 – 80 t (siehe „Ökologischer Rucksack“)



40 – 80 mal mehr „Stoffstrom“

## Ökologischer Fußabdruck – Ein mögliches Maß!

- Entwickelt von Mathis Wackernagel („Global Footprint Network“)
- Grundmaßeinheit: Fläche in Hektar
- Erde:  $510,072 \times 10^6 \text{ km}^2 = 51 \times 10^9 \text{ ha}$ 
  - 70.9% Wasser; 29.1% Land =  $14.8 \times 10^9 \text{ ha}$  (produktiv:  $8.3 \times 10^9 \text{ ha}$ )
- Flächenarten: Acker-, Weide-, Wald-, Meeres-, Siedlungsfläche
  - Konsum Mensch => Wie viel Landfläche?

*„Unter dem ökologischen Fußabdruck wird die Fläche auf der Erde verstanden, die notwendig ist, um den Lebensstil und Lebensstandard eines Menschen dauerhaft zu ermöglichen. Das schließt Flächen ein, die zur Produktion seiner Kleidung und Nahrung oder zur Bereitstellung von Energie, aber z.B. auch zum Abbau des von ihm erzeugten Mülls oder zum Binden des durch seine Aktivitäten freigesetzten Kohlendioxids benötigt werden.“*

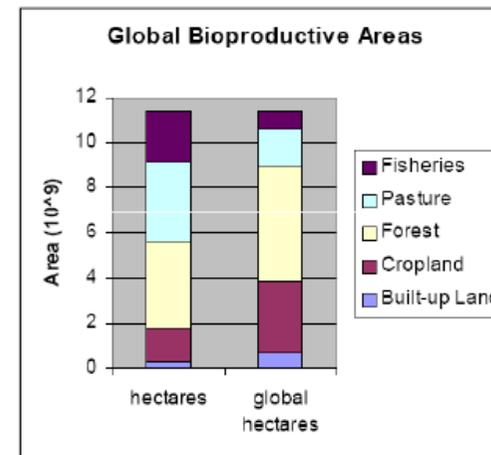
## Ökologischer Fussabdruck – Berechnung

- Biokapazität: biologisch produktive Fläche
- Begrenzte Biokapazität als limitierender Faktor für menschliche Weiterentwicklung ➡ Wie viel benötigt der menschliche Konsum?
- Grundannahmen:
  - menschliche Ressourcenverbrauch und daraus folgende Abfallmengen kann zum Großteil identifiziert werden
  - Messung in bioproduktiven Flächen
  - Unterschiedliche bioproduktive Flächen in eine gemeinsame Einheit [Globale Hektar]; entspricht Weltdurchschnitt an Flächenproduktivität  
➡ Aufsummieren
  - Ökologischer Fußabdruck in Globale Hektar vgl. mit Biokapazität in Globale Hektar
- Materialverbrauch: Umrechnung in Flächen
- Landverbrauch: Bebaute Fläche, Abbauf Flächen
- Energieverbrauch: CO<sub>2</sub> Absorptionsfläche (Wald und Ozeane)

## Ökologischer Fußabdruck – Berechnung (2)

- Jeder Globale Hektar umfasst den gleichen Betrag an biologischer Produktivität
- Die Gesamtheit an Globalen Hektar und „tatsächlichen“ Hektar ist normiert und somit gleich groß
- Vergleich der Produktivität einer spezifischen Landfläche mit der globalen Durchschnittsproduktivität: „Äquivalenzfaktor“
- Ökologischer Fussabdruck (gha) = Fläche (ha) x Äquivalenzfaktor (gha/ha)

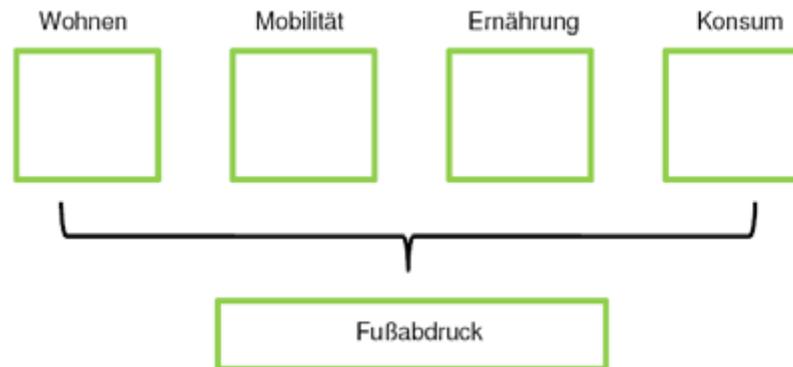
- Ackerland: 2.21 [gha/ha]
- Wald: 1.34 [gha/ha]
- Weideland: 0.49 [gha/ha]
- Meeresfläche: 0.36 [gha/ha]
- Bebautes Land: 2.21 [gha/ha]



Quelle:  
Wackernagel  
et al., 2005

## Ökologischer Fußabdruck – Berechnung (3)

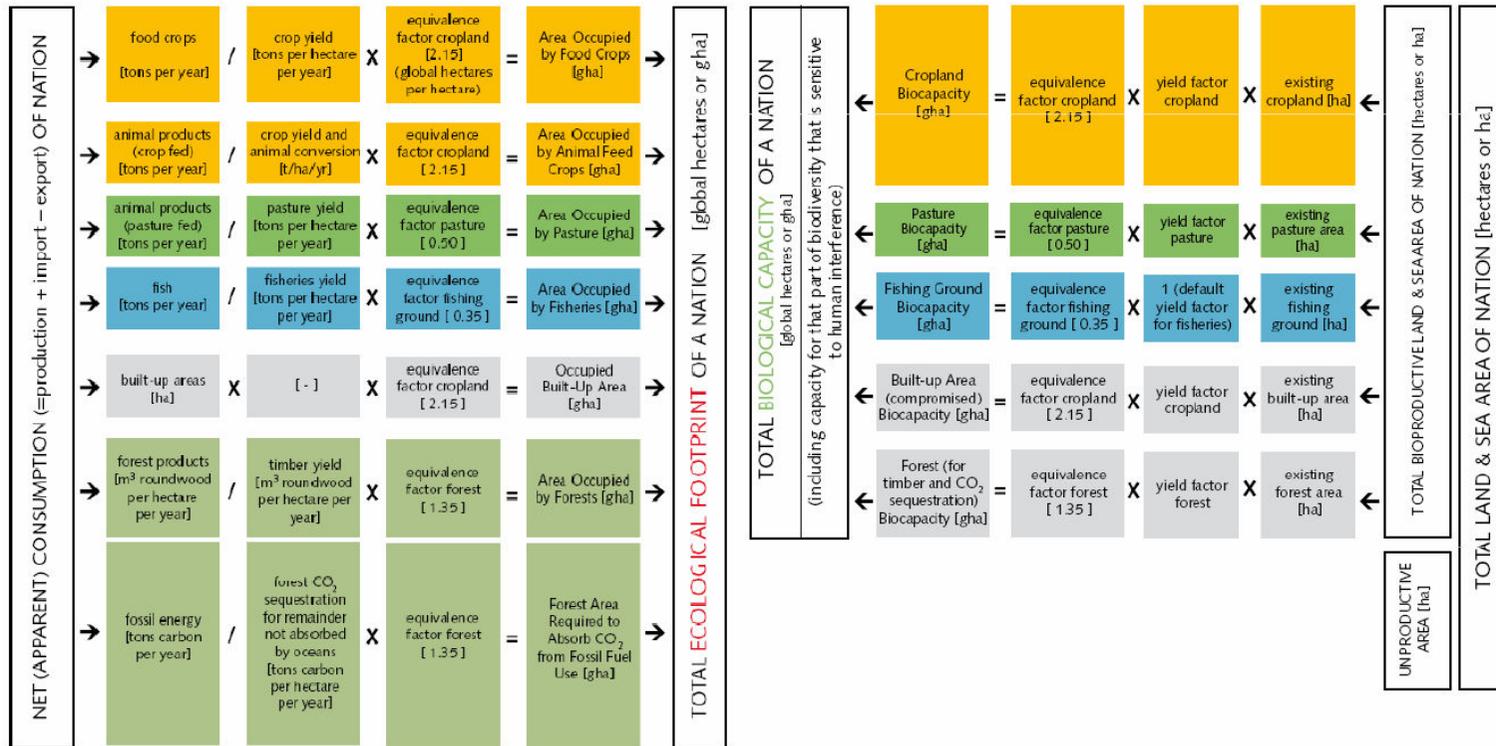
- Berechnung auf individueller Ebene:



- Berechnung auf Länderebene: Handels und Energiebilanzen, Konsumanalyse (Import/Export: Unterschied *Ort der Ressourcenbelastung und Verbrauch*)

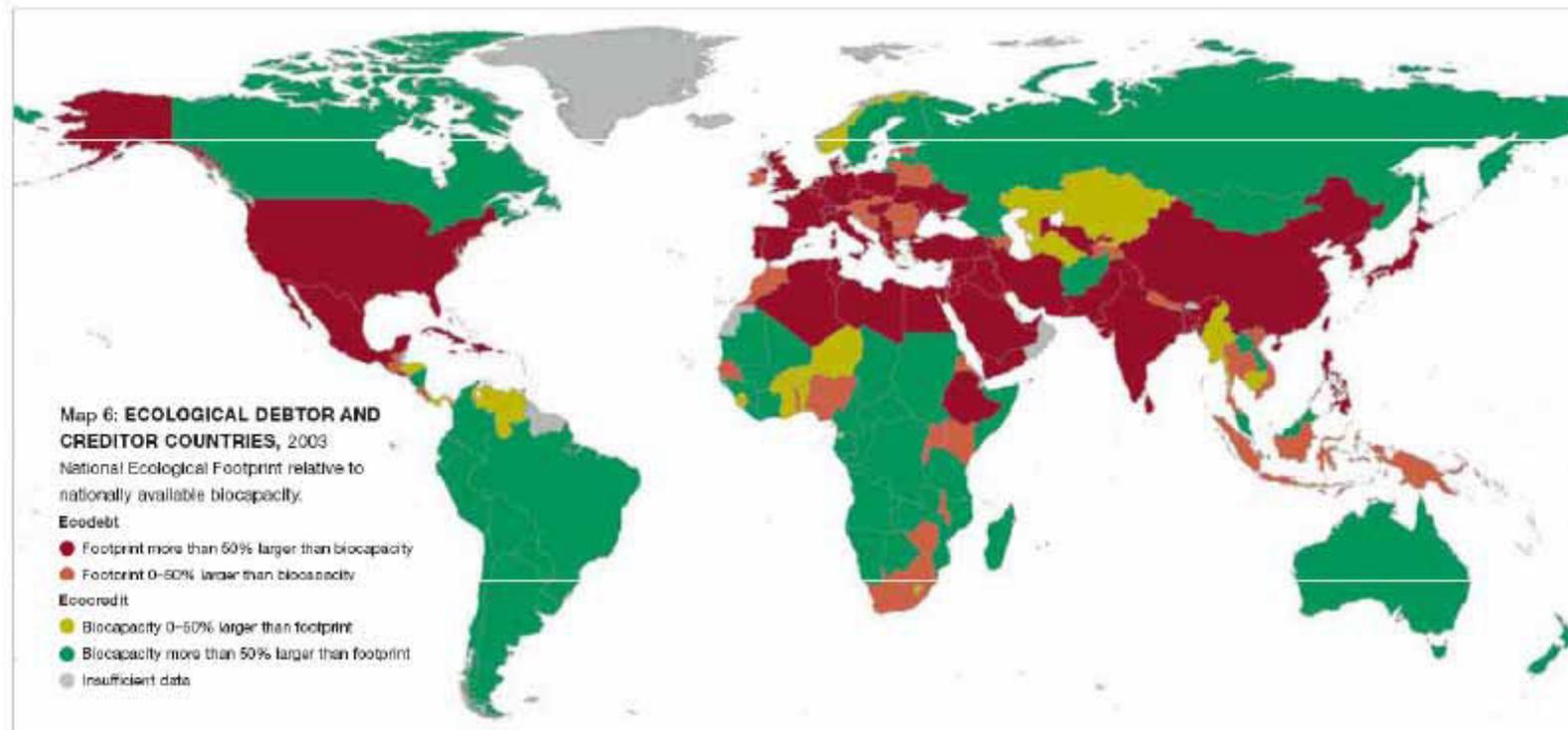


## Ökologischer Fußabdruck – Berechnung (4)



Quelle: von Stockar et al., 2006

## Ökologischer Fußabdruck – 2003



Problem: Nationale Ressourcen oder globaler „Fair Share“?

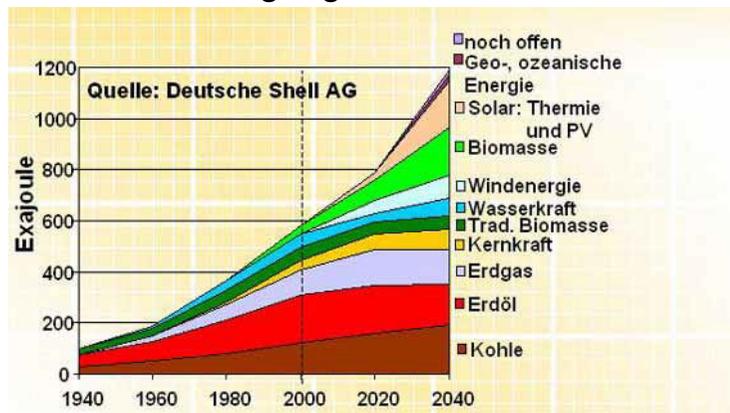
## Ökologischer Fußabdruck – Vorteile

- Erfolgreicher Indikator einer ökologischen Nachhaltigkeit
- Komplexe Zusammenhänge in einer Gesamtzahl
- Festlegung einer Tragfähigkeitsgrenze („Carrying Capacity“)
- Weltweite Ländervergleiche in „Living Planet Reports“
- Prognosenermittlung

## Ökologischer Fußabdruck – Nachteile durch nicht Berücksichtigung von

### Nicht-regenerative Ressourcen:

- Nicht-erneuerbare Ressourcen werden in ihrer stofflichen Verwendung nicht direkt einbezogen, sondern nur indirekt über Energie/Landverbrauch bzw. CO<sub>2</sub> Emissionen
  - Schlecht zu berücksichtigen : Öl
  - Überhaupt nicht: Metalle, Baumaterialien, etc.
  
- Viele Aspekte einer nachhaltigen Nutzung nicht-erneuerbarer Ressourcen können nicht erfasst werden (Rohstoffknappheit; Versorgungssicherheit; Ressourcenproduktivität; etc.)



1 EJ = 10<sup>18</sup> J

1 EJ = Energie eines Asteroideneinschlags mit 5 Mt  
(entspricht Cheops-Pyramide) und 20 km/s

Vgl. Blitz: 1.2 – 28 GJ

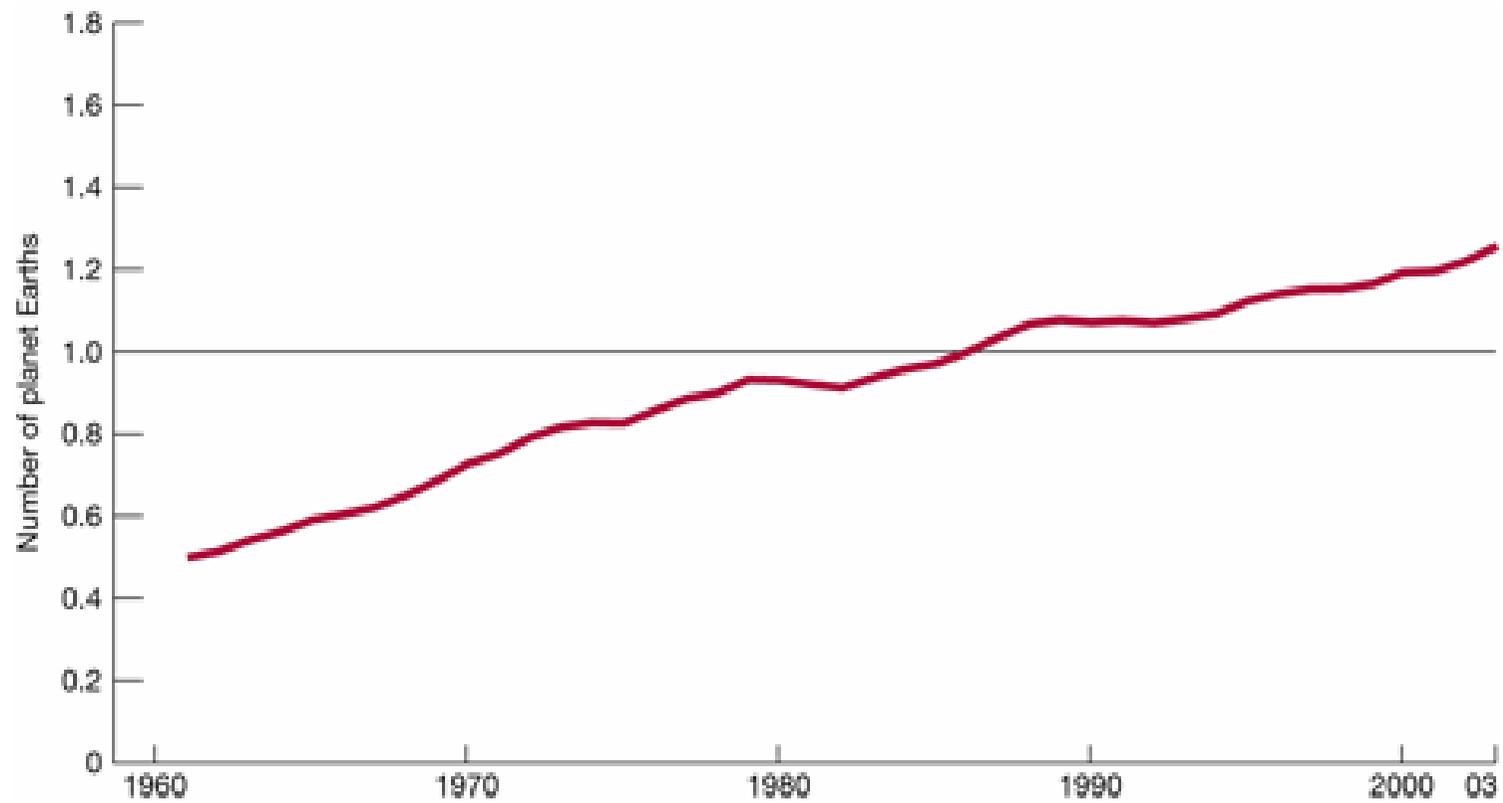
## Ökologischer Fußabdruck – Nachteile durch nicht Berücksichtigung von

- Biologisch nicht produktive Flächen:
  - Wüsten, polare Gletschergebiete, marginale Flächen, etc. werden nicht berücksichtigt
  - Kritiker: verfügbare produktive Fläche wird um 10-20% unterschätzt
  - GFN: Biokapazität wird eher überschätzt, da Schadstoffe nicht eingerechnet, die Kapazität reduzieren
- Schadstoffe:
  - Klimagase (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc.)
  - Chemikalien (Pestizide, FCKWs, etc.)
  - Schwermetalle, radioaktive Stoffe
- Wasserverbrauch:
  - Nur indirekt über reduzierte Bioproduktivität Schwermetalle, radioaktive Stoffe
  - Flächen zur Bereitstellung von Wasser?
  - Virtual water / Water footprint als zusätzlicher Indikator?

## Ökologischer Fußabdruck – Nachteile durch nicht Berücksichtigung von

- Teile des Energieverbrauchs:
  - Früher: Atomenergie wie fossile Energie berechnet
  - GFN aktuelle Daten: keine Berücksichtigung von Atomenergie
- Andere Dimensionen Nachhaltigkeit:
  - Keine Aussage über soziale Aspekte (Gesundheit, Bildung, Menschenrechte, Arbeitsbedingungen, etc.)
  - Keine Aussage über wirtschaftliche Aspekte (Wachstum, Wettbewerbsfähigkeit, Investitionen, Inflation, etc.)

## Ökologischer Fußabdruck – Entwicklung



## Ökologischer Fußabdruck – Erweiterung

- EF 2.0 Erweiterung nach Venetoulis, Talberth 2006
- Alle produktiven Flächen (EF 1.0) + bisher unberücksichtigten Land- und Meeresfläche mit Schätzung der jeweiligen Biokapazität
  - ➔ Gesamte Erdoberfläche wird berücksichtigt
- Bestimmter Anteil der Biokapazität reserviert für Biodiversität (ca. 13.4% der jeweiligen Flächenkategorie)
  - ➔ Rettung von ca. 55% der bedrohten Arten
- CO<sub>2</sub> Bindung nicht nur Wald, sondern gesamter Kohlenstoffkreislauf
- Basis für EF 2.0 Äquivalenzfaktoren: Biomasse-Schätzung der NPP
- Vernetzung der Ökosphäre: Flächen haben Potential mehr als nur einem Zweck zu dienen (z.B. Wald: Holz/Papier + CO<sub>2</sub> Absorbierung)

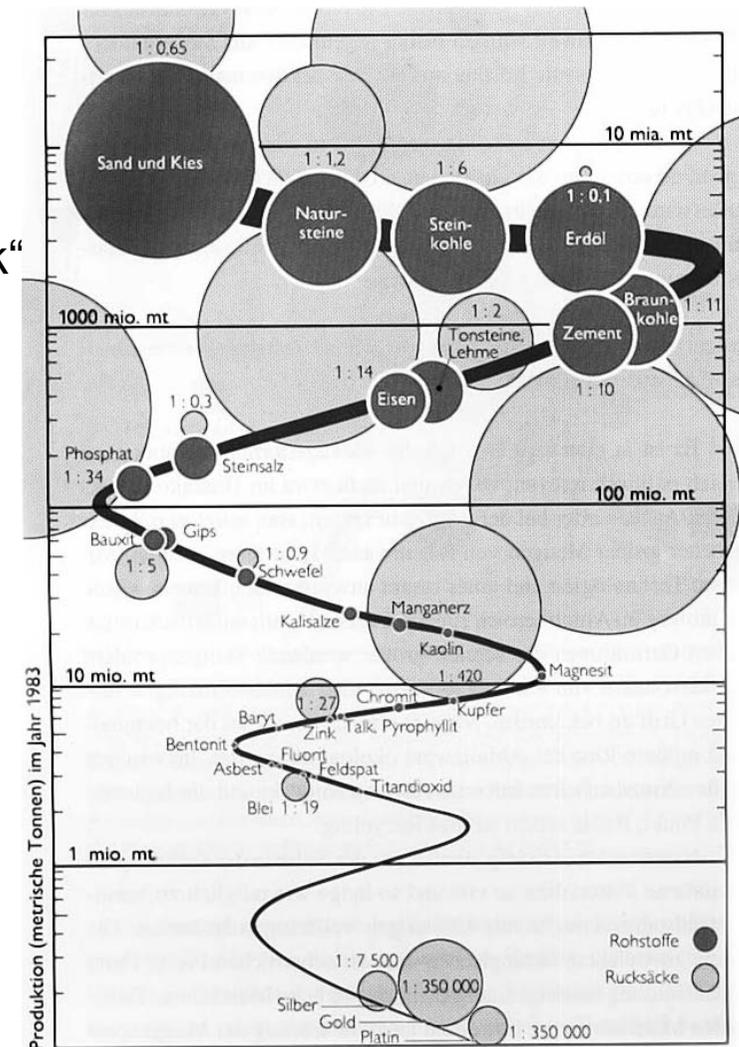
## Ökologischer Rucksack

- Frage: Wie viel „Natur“ steckt in jedem Sachgut
- Problemstellung: z.B. Mausefalle
  - Wie viel Holz für das Brett?
  - Wie viel Erz für das Stahl?
  - Wie viel natürliche Ressourcen für den Bau der Hochöfen für Stahlgewinnung?
  - Wie viel Erde wurde für das Erz bewegt?
  - Wie viel Transport?

*Der "ökologische Rucksack" ist definiert als die Summe aller natürlichen Rohmaterialien von der Wiege bis zum verfügbaren Werkstoff oder zum dienstleistungsfähigen Produkt in Tonnen Natur pro Tonne Produkt, abzüglich dem Eigengewicht des Werkstoffes oder Produktes selbst, gemessen in Tonnen, Kilogramm oder Gramm.*

## Ökologischer Rucksack

- Globaler Ressourcenverbrauch 2002: 53 Mrd. t
- Graue Kugel ist „ökologischer Rucksack“
- Siehe auch MIPS

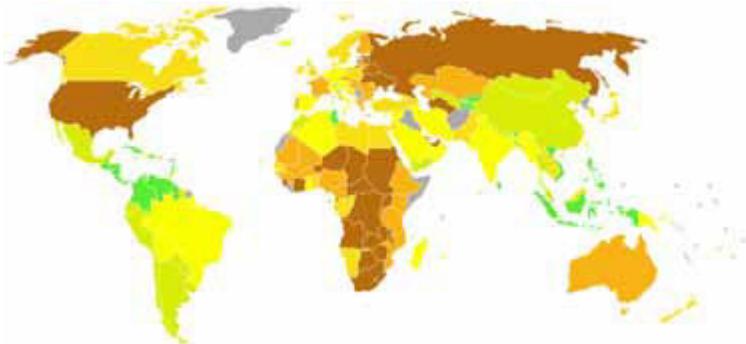


## Happy Planet Index

$$\text{HPI}_{\text{Grundidee}} = \frac{\text{Lebensgefühl} * \text{Lebenserwartung}}{\text{ökol. Fußabdruck}}$$

Lebensgefühl: Befragung von 1.000 – 3.000 Personen pro Land  
„Auf einer Skala von 0 bis 10...“

- Häufigkeit von positiven Stimmungen
- Häufigkeit von negativen Stimmungen
- Zufriedenheit mit Leben



- Vanuatu (HPI= 68.21, 1.Platz)
- Deutschland (HPI=43.83, 81.Platz)
- USA (HPI=28.83, 150.Platz)

## Happy Planet Index

Lebenserwartung: bei Geburt, UN-Daten zum HDI

ökol. Fußabdruck: Landverbrauch an Quellen und Senken (nur CO<sub>2</sub>-Ablagerung) in „global hectares“ pro Kopf.

Tatsächliche HPI Berechnung enthält mehrere statistische Normierungen.

Ziel:

$$\frac{a \cdot b}{c} \approx \frac{a \cdot b + 0,2 \cdot (\max_i a_i b_i - \min a_i b_i)}{c + 0,2 \cdot (\max_i c_i - \min c_i)}$$

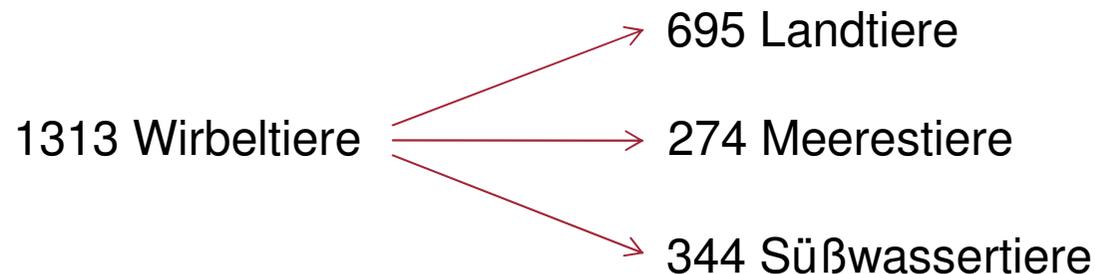
i: Länderindex

Ändern sich die Größen um z.B. 20% der ges. Wertebereichsschwankung im Zähler, so soll eine entsprechende Änderung im Nenner dies kompensieren.

## Living Planet Index (LPI des World Wildlife Fund WWF)

Ziel: Maß für Biodiversität

Seit 1970 werden die Populationen von 1313 Wirbeltieren in ca. 3.600 Bezugsregionen geschätzt (Größenschätzung, nicht bloßes Vorhandensein)



- Für jedes Beobachtungsjahr sind die Größe der Population in Bezug gesetzt zur Größe von 1970
- Arithmetisches Mittel der Quotienten ergibt LPI

## Living Planet Index – Beispiel (hypothetisch)

Art 1	20% mehr als 1970	Art 1	1,2
Art 2	5% weniger als 1970	Art 2	0,95
Art 3	ausgestorben	Art 3	0
<hr/>			
		2,15 : 3	0,7166...

Man beachte, dass Einzelindices steigen können und auch der LPI steigen kann.

Man kann auch Aggregationen für Land-, Meeres- und Süßwassertiere vernehmen, oder Aggregationen nach geographischen Regionen etc. Gesamtindex seit 1970 gefallen, einzelne Indices zwischendurch gestiegen!

## Human Development Index HDI

Kennzahl für Länder des UNDP (United Nations Development Programme). Abgebildet wird:

- ökonomischer Entwicklungsstand
- Bildungsstand
- Gesundheitszustand

Ziel: Monoton steigende Darstellung, d.h. je höher der Stand, desto größer die Kennzahl.

Probleme:

1. Wie operationalisiert man Einzelgrößen?
2. Wie aggregiert man Einzelgrößen?

## Ökonomischer Entwicklungsstand

Pro Kopf Bruttoinlandsprodukt BIP (gross domestic product GDP per capita)

BIP wird für Ländervergleich um Kaufkraft korrigiert

Kompliziertes Verfahren. Resultat: \$purchasing power parity = \$PPP

(UN unterscheidet sich von der Weltbank, die in nominalen \$ rechnet)

## Bildungsstand

$$\frac{2}{3} * \text{Anteil der alphabetisierten erwachsenen Bevölkerung}$$
$$+ \frac{1}{3} * \text{Anteil der alphabetisierten jugendlichen Bevölkerung in Ausbildung}$$

## Gesundheitszustand

Lebenserwartung bei Geburt in Jahren

Aggregation durch zweistufiges Vorgehen:

1. Stufe: Transformation auf individuelle Kennzahlen ohne Einheit
2. Stufe: Eigentliche Aggregation

## 1. Stufe

$$\text{Kennzahl} = \frac{\text{Wert} - \text{Minimumwert}}{\text{Maximumwert} - \text{Minimumwert}}$$

(bei Kaufkraft verwendet man Logarithmen)

<b>Kennzahl</b>	<b>Minimumwert</b>	<b>Maximumwert</b>
Reales Prokopfeinkommen	100	40.000
Bildungsstand erw.	0	1
Bildungsstand jug.	0	1
Lebenserwartung	25	85

## 2. Stufe

Aggregation durch arithmetisches Mittel

$\text{HDI} \in [0,1]$

## Beispielrechnung Südafrika (Daten 2007/2008)

pro Kopf BIP in \$PPP	11.110
Anteil alphabetisierter Einwohner	82,4%
Anteil Jugendlicher in Ausbildung	77,0%
Lebenserwartung in Jahren	50,8

$$\text{ökon. Kennzahl} = \frac{\log(11.110) - \log(100)}{\log(40.000) - \log(100)} = \underline{\underline{0,786}}$$

$$\text{Bildungskennzahl} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0,824 - 0}{1 - 0} + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,77 - 0}{1 - 0} = \frac{2}{3} \cdot 0,824 + \frac{1}{3} \cdot 0,77 = \underline{\underline{0,806}}$$

$$\text{Lebenserwartungskennzahl} = \frac{50,8 - 25}{85 - 25} = \underline{\underline{0,43}}$$

## Beispielrechnung Südafrika (Daten 2003)

pro Kopf BIP in \$PPP	10.346
Anteil alphabetisierter Einwohner	82,4%
Anteil Jugendlicher in Ausbildung	78,0%
Lebenserwartung in Jahren	48,4

$$\text{ökon. Kennzahl} = \frac{\log(10.346) - \log(100)}{\log(40.000) - \log(100)} = \underline{\underline{0,774}}$$

$$\text{Bildungskennzahl} = \frac{2}{3} \cdot \frac{0,824 - 0}{1 - 0} + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,78 - 0}{1 - 0} = \frac{2}{3} \cdot 0,824 + \frac{1}{3} \cdot 0,78 = \underline{\underline{0,809}}$$

$$\text{Lebenserwartungskennzahl} = \frac{48,4 - 25}{85 - 25} = 0,39$$

$$\text{HDI} = \frac{1}{3} \cdot 0,774 + \frac{1}{3} \cdot 0,809 + \frac{1}{3} \cdot 0,39 = \underline{\underline{0,658}}$$

## Klassifikation

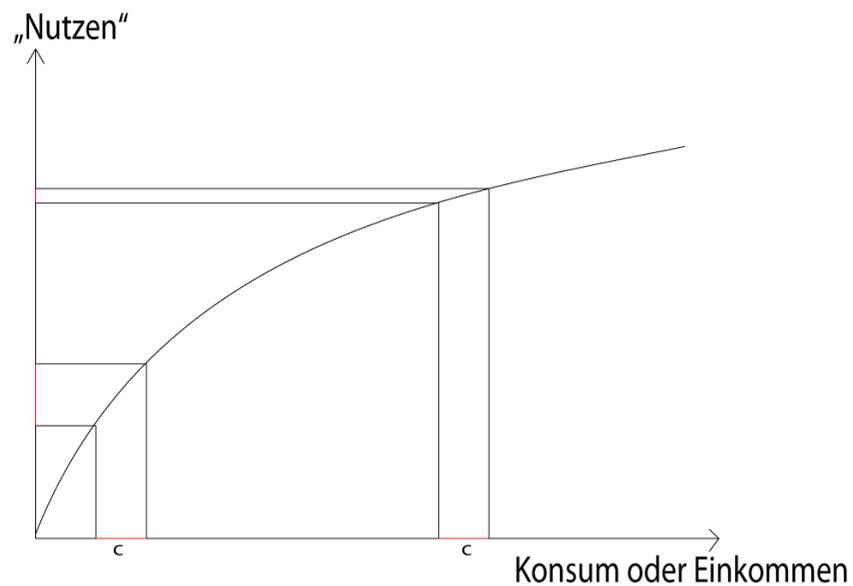
Hohe Entwicklung       $1 \geq \text{HDI} \geq 0,8$

Mittlere Entwicklung       $0,8 > \text{HDI} \geq 0,5$

Geringe Entwicklung       $0,5 > \text{HDI} \geq 0$

## Grund für Logarithmenverwendung

... bei ökonomischer Kennzahl ist das Prinzip vom abnehmenden Grenznutzen (1. Gossen'sche 'Gesetz')



Je größer der aktuelle Konsum oder das aktuelle Einkommen, desto geringer wiegt ein konstanter Zuwachs  $c$  oder „die ersten 1.000\$ sind die wichtigsten“.

HDI ist ordnungserhaltend bei Hinzunahme von Ländern

*HDI (N<sub>i</sub>): HDI von Nation i aus einem Pool von n Nationen*

$$\text{HDI}_{1\dots n}(\text{N}_i) > \text{HDI}_{1\dots n}(\text{N}_j) \quad \longrightarrow \quad \text{HDI}_{1\dots n+1}(\text{N}_i) > \text{HDI}_{1\dots n+1}(\text{N}_j)$$

## Präferenzfunktionen

Indices stellen binäre Relationen mittels der Ordnung relativer Zahlen dar.

A: endliche Menge von Alternativen

$\succ$ : eine schwache und transitive Relation auf  $A \times A$ .

Relation  $\succ$  heißt schwache Ordnung, wenn für je zwei verschiedene  $a, b \in A$  Höchstens eine der beiden Relationen  $a \succ b$  oder  $b \succ a$  gilt bzw. genau eine der drei Relationen gilt:  $a \succ b$ ,  $b \succ a$  oder  $a \sim b$

$$\Leftrightarrow \neg(a \succ b) \wedge \neg(b \succ a)$$

Eine schwache Relation/Ordnung  $\succ$  heißt transitiv, wenn für je drei  $a, b, c \in A$  gilt:  $a \succ b$  und  $b \succ c \Rightarrow a \succ c$  und  $a \sim b$  und  $b \sim c \Rightarrow a \sim c$

## Präferenzfunktionen

Für jede schwache, transitive Ordnung gibt es eine darstellende Präferenz – oder Nutzenfunktion oder einen Index  $I:A \rightarrow \mathbb{R}$  mit

$$a \succ b \Leftrightarrow I(a) > I(b) \text{ und}$$

$$a \sim b \Leftrightarrow I(a) = I(b)$$

Bsp. Nicht-transitive Ordnungen im Tierreich (Hackordnung von Hühnern)

## Präferenzfunktionen

Präferenzfunktion nicht eindeutig, denn mit  $I$  ist auch  $f \circ I$  eine Präferenzfunktion, wenn  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  monoton steigt.

Konsequenz: Wertsteigerungen, also Differenzbewertungen von Alternativpaaren, können kippen, d.h.

$$b \succ a \text{ und } d \succ c \text{ mit } \underbrace{I(d) - I(c)}_{> 0} > \underbrace{I(b) - I(a)}_{> 0}$$

$$\text{kann übergehen in } \underbrace{f \circ I(d) - f \circ I(c)}_{> 0} < f \circ I(b) - f \circ I(a)$$

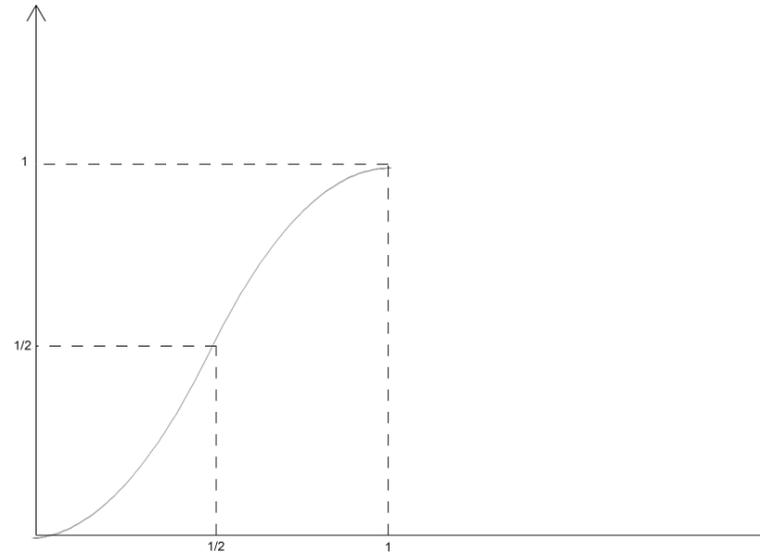
## Beispiel

$$I(a) = 0,4$$

$$I(b) = 0,41$$

$$I(c) = 0,8$$

$$I(d) = 0,82$$



$$f(x) = \begin{cases} 2x^2 & 0 \leq x \leq 1/2 \\ 1 - 2(x-1)^2 & 1/2 \leq x \leq 1 \end{cases}$$

$$I(d) - I(c) = 0,02 > 0,01 = I(b) - I(a)$$

## Beispiel (Fortsetzung)

$$F \circ I(a) = 0,32$$

$$F \circ I(b) = 0,3362$$

$$F \circ I(c) = 0,92$$

$$F \circ I(d) = 0,9352$$

$$F \circ I(d) - F \circ I(c) = 0,0152 < 0,0162 = F \circ I(b) - F \circ I(a)$$



Differenzen zwischen Bewertungen kippen!

Indices nutzen Ordnungseigenschaft reeller Zahlen, aber die Nutzung der algebraischen Eigenschaften, also rechnen, ist i.a. nicht sinnvoll.