

Biogeochemische Kreisläufe im globalen Klimasystem

Martin Heimann

Max-Planck-Institut für Biogeochemie
Hans-Knöll Str. 10, PF 100164, 07701 Jena
Tel.: (03641) 57 6350

Email: martin.heimann@bgc-jena.mpg.de
<http://www.bgc-jena.mpg.de/~martin.heimann>

Info

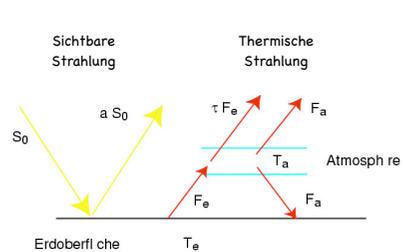
- Vorlesungswebsite:
<http://www.bgc-jena.mpg.de/~martin.heimann/vorlesung>
- Parallelvorlesungen:
Annette Freibauer: Biogeochemische Prozesse
<http://www.bgc-jena.mpg.de/~annette.freibauer/Vorlesung/vorlesungWS0506.html>
Martin Werner: Das Klimasystem der Erde – eine Einführung in die Paleoklimatologie
http://www.bgc-jena.mpg.de/~martin.werner/vorlesung_fsu_ws0506/vorlesung_fsu_ws0506.html
- Literatur:
 - L.D. Danny Harvey: "Global Warming, the Hard Science".
Pearson Education Limited, Harlow, UK, 2000 (ISBN 0582-38167-3).
 - S.S. Butcher, R.J. Charlson, G.H. Orians, and G.V. Wolfe (Eds.): "Global Biogeochemical Cycles".
Academic Press, London, 1992.
 - Storch, H.v., S. Guess, and M. Heimann:
"Modellierung des Klimasystems: Eine Einführung in Funktionsweise, Anwendungen und Grenzen von
konzeptionellen und realitätsnahen Modellen". Springer, Heidelberg, 1999.
(auch für nicht-Naturwissenschaftler verständliche Übersicht über das globale Klimasystem)
 - J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A.
Johnson (Eds.): "Climate Change 2001: The Scientific Basis". Cambridge University Press, Cambridge,
2002. (ISBN 0521-80767-0/6)
("Third Assessment Report" des Intergovernmental Panel on Climate Change)
"Summary for Policymakers and Technical Summary of WG I Report"
http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm

Inhalt der Vorlesung

1. Einführung - Rolle der Biogeochemie in der jüngsten Klimageschichte
2. Komponenten des physikalischen Klimasystems:
 - Energiehaushalt - Energiebilanzmodell des Klimasystems
 - Wichtige Prozesse in Atmosphäre und Ozean
 - Landoberflächen und hydrologischer Kreislauf - biophysikalische Wechselwirkungen
3. Treibhausgase - Einführung
4. Anthropogene Treibhausgase: FCKW
5. Kreislauf des Methans (CH₄)
6. Kohlenstoffkreislauf
7. Globaler Wandel:
 - Anthropogene Antriebsfaktoren
 - Simulationen des globalen Wandels
 - Klimaforschung, Politik und Gesellschaft

Biophysikalische Wechselwirkungen im Erdsystem

Energiebilanzmodell II



Atmosphäre mit Transmissivität τ

- $S_0 = 342 \text{ Wm}^{-2}$ ($= I_0 / 4$)
- Albedo: a
- Transmissivität der Atmosphäre: τ
- $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- Erdoberflächentemperatur:

$$\sigma T_e^4 = \{2(1-a)/(1+\tau)\} S_0$$

2 "Materialparameter" welche die Erdtemperatur beeinflussen: Albedo a und Transmissivität τ :

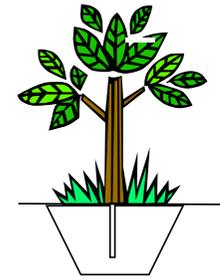
τ hängt von der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre ab

-> Möglichkeit „biogeochemischer“ Wechselwirkungen

a hängt von den optischen (=physikalischen) Eigenschaften der Oberfläche (und Atmosphäre) ab

-> Möglichkeit „biophysikalischer“ Wechselwirkungen.

Biophysikalische Wechselwirkungen im Klimasystem



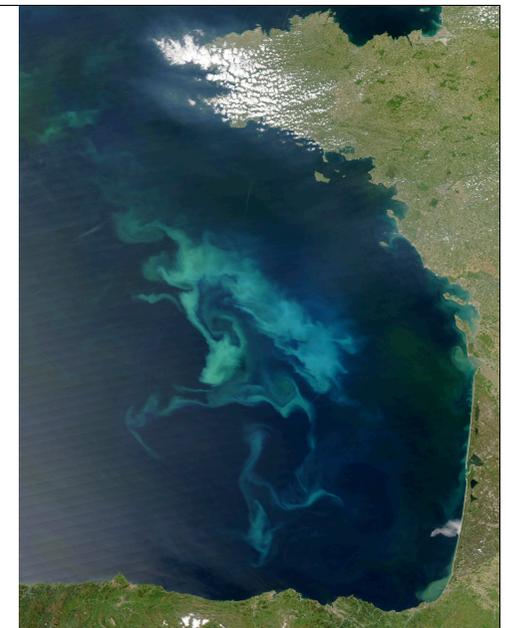
Eigenschaften der Pflanzendecke:

- Optische Eigenschaften
 - > Albedo -> Energiebilanz
- Leitfähigkeit für Wasser
 - > Verdunstung -> Wasserkreislauf
- Speicherkapazität für Wasser im Wurzelbereich
 - > Verdunstung -> Wasserkreislauf
- Pflanzenstruktur
 - > Rauigkeit
 - > Windgeschwindigkeit in Bodennähe
 - > Verdunstung

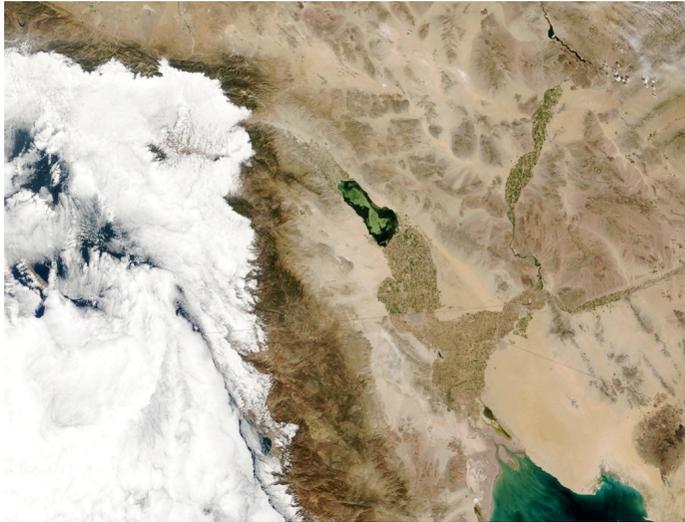
Algenblüte
nördlich von
Norwegen
-> Albedo!



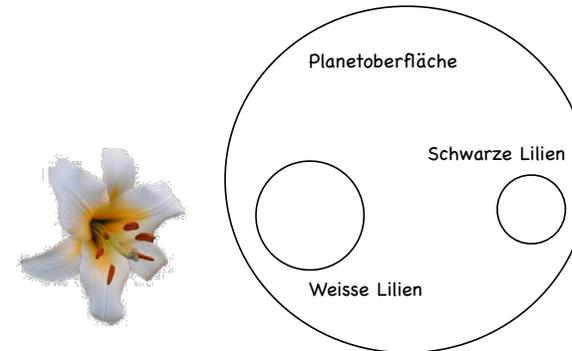
Algenblüte in der
Biskaya



Südkalifornien: Anthropogene Albedoänderungen



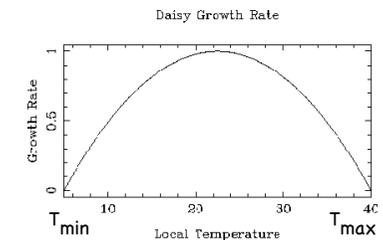
“Daisyworld” – konzeptuelles biophysikalisches Modell der Temperaturregulierung der Erde durch die Landbiosphäre
[Watson and Lovelock, Tellus, 35B, 249–262]



Daisyworld I: Physikalisches Energiebilanzmodell

- 0 - dimensionales Energiebilanzmodell (Energiebilanzmodell II)
- Erdoberfläche aufgeteilt in 3 Bruchteile:
 - A_b , nackte Oberfläche mit Albedo $a_b = 0.5$
 - A_s , schwarze Lilien („Daisies“) mit Albedo $a_s = 0.1$
 - A_w , weisse Lilien mit Albedo $a_w = 0.9$
- Planetare Albedo: $a_p = A_b a_b + A_s a_s + A_w a_w$
- Planetare Temperatur: $\sigma T_p^4 = \{2(1-a_p)/(1+\tau)\} S_0$
- Lokale Temperatur über den 3 Bereichen ($l=b,s,w$):
 - $\sigma T_l^4 = R/2(1+\tau) S_0 (a_p - a_l) + \sigma T_p^4$
 wobei R: „Temperaturmischung“ zwischen den verschiedenen Bereichen:
 - R = 0: perfekte Mischung $\rightarrow T_l = T_p$
 - R=1: thermische Isolation der einzelnen Bereiche (jeder für sich im Strahlungsgleichgewicht)

Daisyworld Biologie



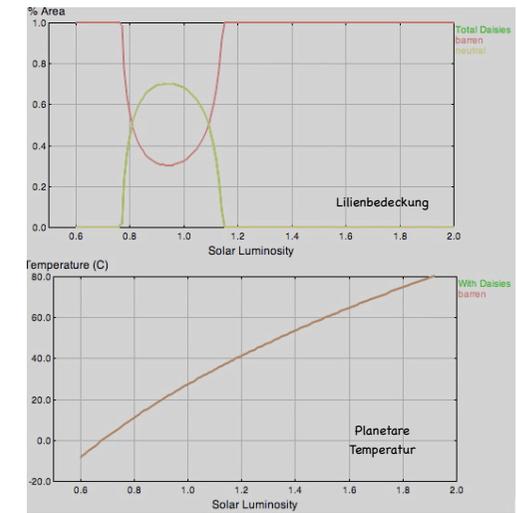
- Wachstumsmodell für die Lilien:
 - Wachstumsrate abhängig von der lokalen Temperatur T_l :
 - $b_l = 1 - 0.25 \{(T_l - T_{opt}) / (T_{max} - T_{min})\}^2$, für $T_{min} < T_l < T_{max}$
 - 0, sonst
 - Sterberate: d_l
 - Gleichung für Flächenbedeckung durch die Lilien ($l = s, w$):
 - $dA_l/dt = A_l (b_l A_b - d_l)$
- Es gibt immer eine minimale Lilienbedeckung ($A_l \geq 0.01$)

Iterative Numerische Bestimmung der Gleichgewichtstemperatur

1. Berechne planetare Albedo
2. Berechne planetare Temperatur
3. Berechne Temperatur in jedem Oberflächenbereich
4. Berechne die Wachstumsrate für jede Lilienart
5. Berechne neue Bedeckungsfläche für jede Lilienart
6. Wiederholung (1-5) bis Gleichgewicht

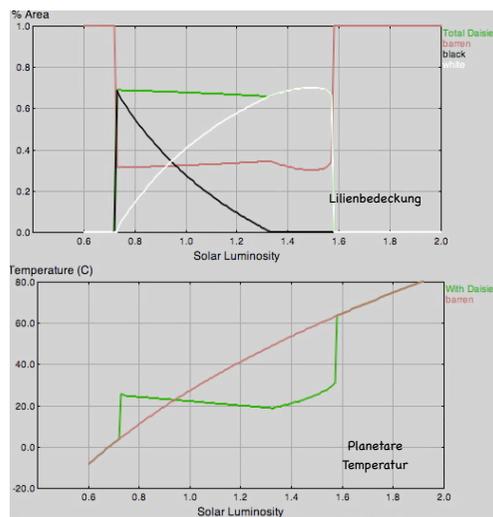
Experiment 1: Nur eine Art Lilien mit neutraler Albedo ($a=ab$)

Variation der solaren Einstrahlung von 0.6 bis 2 mal der heutigen Einstrahlung. Jeder Punkt entspricht der sich einstellenden Gleichgewichtslösung (Wachstumsrate = Sterberate der Lilien)



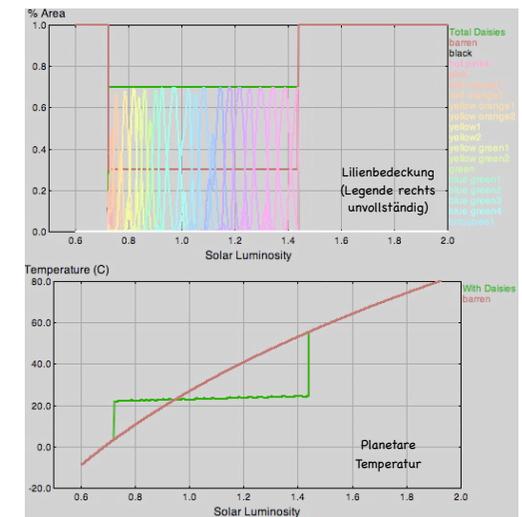
Experiment 2: Effekt von schwarzen und weissen Lilien

Optisch aktive Lilien bewirken eine Stabilisierung der planetaren Temperatur in der Nähe der optimalen Temperatur für die Lilien (~22C) in einem weiten Bereich der Sonneneinstrahlung (~0.72 - ~1.58 S_0).



Experiment 3: 30 verschiedene Lilienarten

Bei vielen Lilienarten mit gleichförmig abgestufter Albedo zwischen 0.25 und 0.75 ergibt sich eine gleichmäßigere Stabilisierung der planetaren Temperatur.



Daisyworld Zusammenfassung

- Erweiterungen von Daisyworld:
 - Ausdehnung auf 3-dimensionale Erdkugel mit realistischer breitenabhängiger Einstrahlung
 - Komplexere Biologie/Ökologie: z.B. durch Berücksichtigung von Herbivoren, durch unterschiedliche Patchiness, oder Struktur der Lilien
- Daisyworld zeigt dass biophysikalische Rückkopplungseffekte das Erdsystem potentiell entscheidend beeinflussen können. Die Biosphäre ist daher als integrale Komponente des Klimasystems anzusehen.
- Die Plausibilität von Daisyworld (und ähnlicher Rückkopplungen zwischen Biosphäre und physikalischem Klimasystem) führten Lovelock zur Formulierung der „Gaia“ Hypothese (eine umstrittene Interpretation des Erdsystems als ein sich selbst regulierender/stabilisierender Organismus)
- Beispiel eines Optimierungsprinzips
- „Homeostasis“ = Stabilisierender biologischer Rückkopplungseffekt
- Ist Daisyworld „realistisch“?
- Beispiel für Effekte der Biodiversität?
- Es existieren web-basierte „Spielversionen“: siehe z.B. <http://www.gingerbooth.com/courseware/daisy.html>

Treibhausgase - Einführung

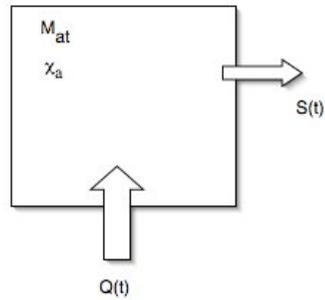
Wichtigste Treibhausgase in der Erdatmosphäre

Gas	Aufenthaltszeit in Atmosphäre	Konzentration (ppmv)		Zusätzlicher Strahlungsantrieb 1750-1995 (Wm^{-2})	Anteil am natürlichen Treibhauseffekt
		Vor-industriell	Heute (2000)		
Wasserdampf	Wenige Tage	bis 70'000			12.8°C
Kohlendioxid (CO ₂)	4-5 Jahre	280	375	1.46	4.4°C
Ozon (O ₃)	Variabel	?	0.03	0.2	1.5°C
Methan (CH ₄)	8-12 Jahre	0.5	1.7	0.48	0.5°C
FCKW (F11, F12)	50-150 Jahre	0	<0.0005	0.34	0
Lachgas (N ₂ O)	100-200 Jahre	0.28	0.3	0.15	0.8°C

Nomenklatur, Einheiten, wichtige Zahlenwerte:

- Konzentration - Anzahl Moleküle pro Volumen [$mol\ m^{-3}$]
- Mischungsverhältnis - Anzahl Moleküle Spurenstoff pro Molekül Luft [mol/mol]
- “parts per million”, ppm = 10^{-6}
- “parts per billion”, ppb = 10^{-9}
- “parts per trillion”, ppt = 10^{-12}
- Molgewicht von trockener Luft $\sim 29\ g\ mol$
- Masse der Atmosphäre: $M_{at} = 5.3 \cdot 10^{18}\ kg = 1.83 \cdot 10^{20}\ mol$

1-Box Modell der Atmosphäre



Massenbilanz:

$$\frac{dN_a}{dt} = Q(t) - S(t) \quad (1)$$

Abbaureaktion mit Kinetik 1. Ordnung:

$$S(t) = kN_a(t) \quad (2)$$

dabei bezeichnet k die Abbaurrate (Einheit: Zeit^{-1})

Turnoverzeit:

$$\tau_t = \frac{N_a}{S} \quad (3)$$

kann für alle oder auch nur einzelne Quellen- oder Senkenprozesse definiert werden.
Im Falle einer Abbaureaktion mit Kinetik 1. Ordnung gilt $k^{-1} = \tau_t$.
Lebensdauer T_e : Zeitspanne in welcher eine Konzentrationsstörung auf den Bruchteil $\frac{1}{e}$ fällt. Im Falle eines Spurenstoffes mit einer Abbaurrate mit Kinetik 1. Ordnung gilt

$$T_e = \tau_t = k^{-1} \quad (4)$$

Differentialgleichung für das Mischungsverhältnis, unter Annahme eines Senkenprozesses mit Kinetik 1. Ordnung:

$$M_{at} \frac{d\chi_a(t)}{dt} = Q(t) - kM_{at}\chi_a(t) \quad (5)$$

oder

$$\dot{\chi}_a + k\chi_a = \frac{Q(t)}{M_{at}} \quad (6)$$

Dies ist eine Differentialgleichung 1. Ordnung mit konstanten Koeffizienten. Allgemeine Lösung:

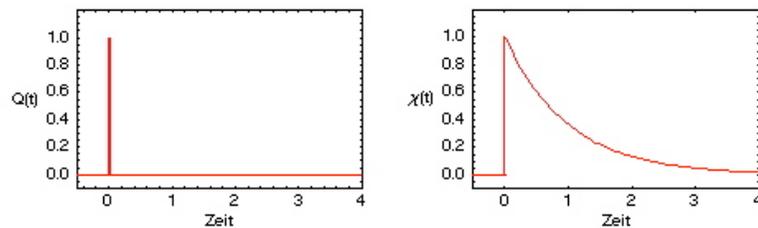
$$e^{kt}\chi_a(t) = \int e^{kt'}Q(t')dt' \quad (7)$$

oder

$$\chi_a(t) = \chi_a(0)e^{-kt} + \int_0^t Q(t-t')e^{-kt'}dt' \quad (8)$$

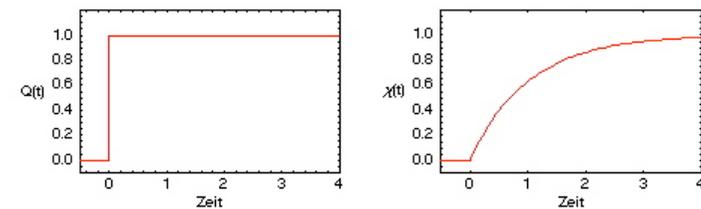
Beispiel 1: Verlauf des Mischungsverhältnis nach einem Puls-Tracerinput Turnoverzeit = 1 Jahr

$$\chi_a(t) = \frac{N_0}{M_{at}} e^{-kt} \quad (9)$$



Response auf eine konstante Tracerquelle, die zum Zeitpunkt t=0 eingeschaltet wird

$$\chi_a(t) = \frac{Q}{kM_{at}}(1 - e^{-kt}) \quad (10)$$

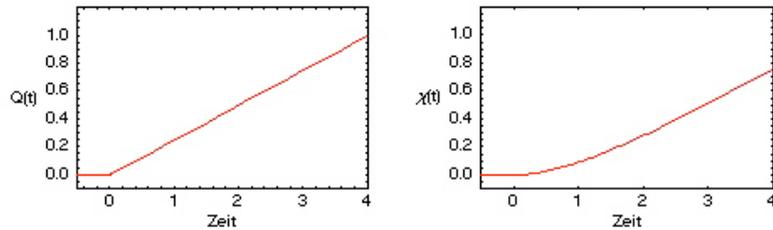


Als asymptotischer Gleichgewichtswert stellt sich ein:

$$\chi_a(t \rightarrow \infty) = \frac{Q}{kM_{at}} \quad (11)$$

Response auf eine linear ansteigende Tracerquelle: $Q(t) = a t$

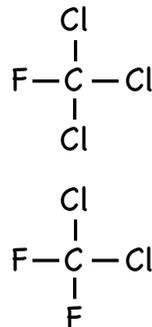
$$\chi_a(t) = \frac{a}{k^2 M_{at}} (kt + e^{-kt} - 1) \quad (12)$$



Anthropogene Treibhausgase: FCKW

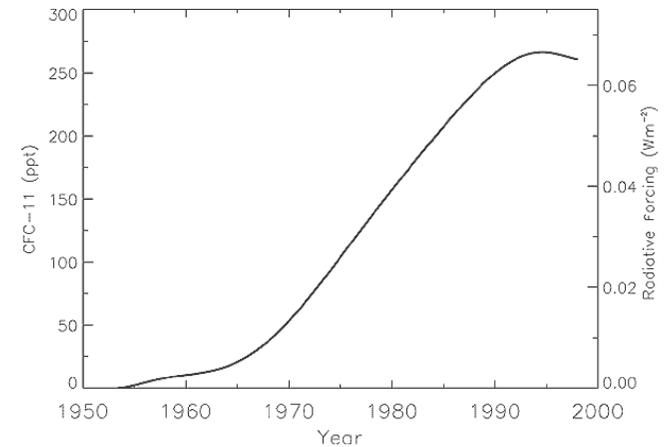
Anthropogene Treibhausgase: FCKW

- "CFC-11" = CFCl_3 :
Spraydosen, Schaumstoffe
- "CFC-12" = CF_2Cl_2 :
Spraydosen, Schaumstoffe,
Kühlmittel
- Senke: Photodissoziation in
der Stratosphäre,
Effekt auf Ozonabbau (Cl Atome)



Molgewicht:
 CFC-11: $12 + 19 + 3 \times 35 = 136$
 CFC-12: $12 + 2 \times 19 + 2 \times 35 = 120$

Atmosphärischer Trend von CFC-11 (CFCl_3)



Emissionsraten von Halocarbonen (u.a. FCKW) (kt yr⁻¹)

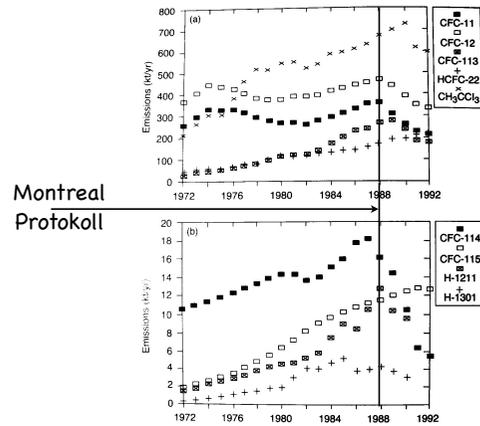
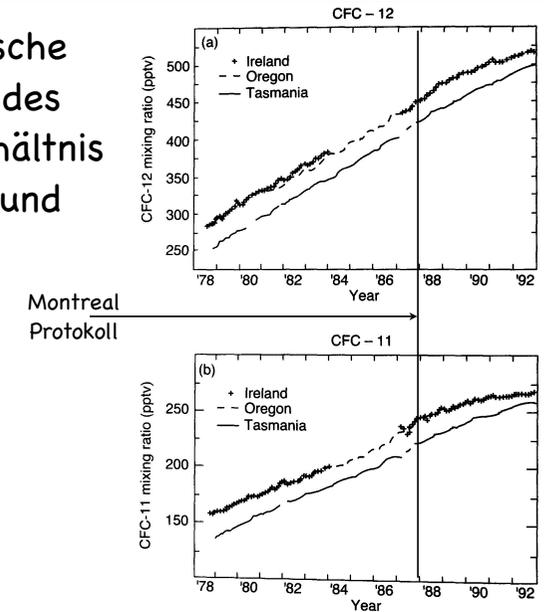


Figure 2.6: Annual emissions of some important industrial halocarbons from 1972 to 1992 based on production statistics (AFEAS, 1993; Fisher *et al.*, 1994; Fisher, 1994 and unpublished work from D. Fisher and P. Midgley). For CFC-11, CFC-12, CFC-113, CH₂Cl₂, and the halons, the estimates are for global use; for HCFC-22, CFC-114 and CFC-115, the estimates are from reporting companies and may be somewhat less than the global emissions.

Atmosphärische Messungen des Mischungsverhältnis von CFC-11 und CFC-12



Schätzung der Lebensdauer von CFC-11

- ◁ Annahme: Produktion konstant 1970-1990
- ◁ $dNa/dt = Q - k Na$
- ◁ $dNa/dt \sim 100 \text{ ppt}/10\text{yr}$
- ◁ $Q \sim 350 \text{ kton/yr}$
- ◁ Wie gross ist $\tau = k^{-1}$?

Weitere Fragen

- ◁ Welche Lebensdauer ergibt sich für CFC-12?
- ◁ Wie verhält sich die das Mischungsverhältnis von CFC-11 und CFC-12 nach dem Montreal Protokoll, wenn die Emissionen gestoppt werden?
- ◁ Wie lange dauert es bis die Atmosphärenwerte von CFC-11 auf 50 ppt gefallen sind?
- ◁ Warum wird es wohl länger dauern als hier abgeschätzt?