

# Wolken-Strahlungs-Rückkopplung und Klimasensitivität in Klimasimulationen mit unterschiedlichen Strahlungsantrieben

Michael Ponater, Vanessa Rieger und Simone Dietmüller

## Wolken-Strahlungs-Rückkopplung im Klimasystem

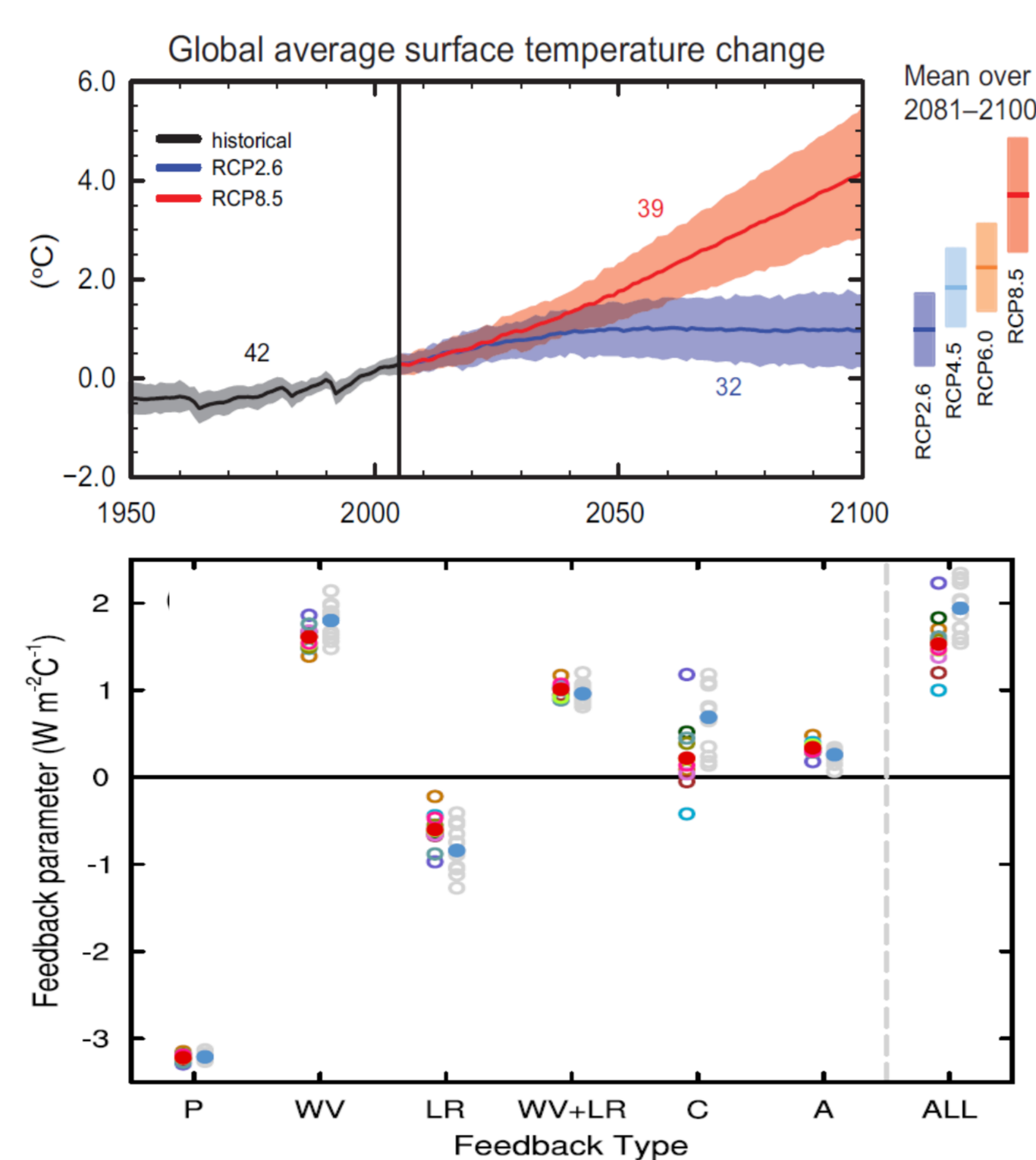
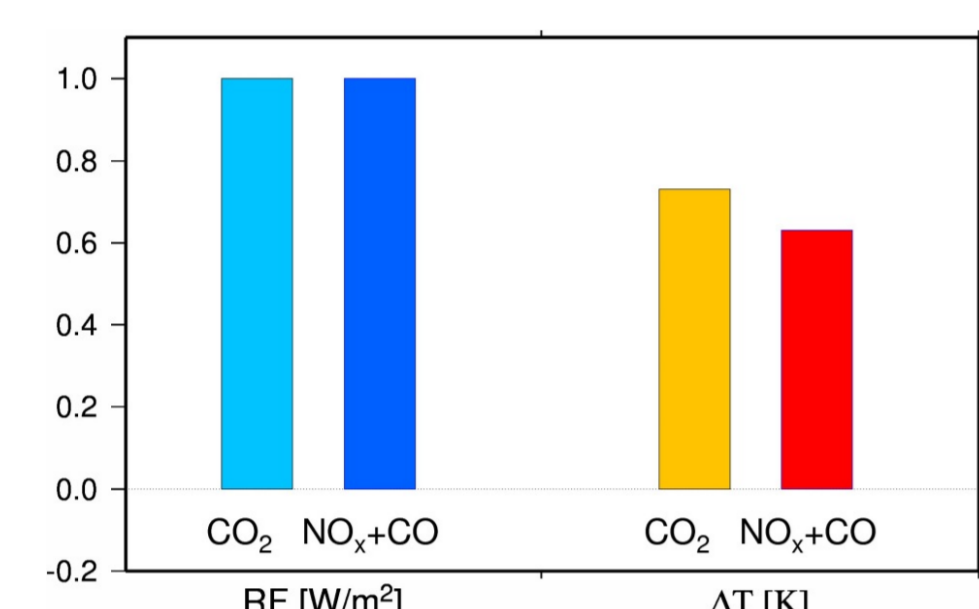
Der Klimasensitivitätsparameter ( $\lambda$ ), d.h. der Temperaturreponse pro Einheit Strahlungsantrieb ( $RF$ ), hat – wie bekannt – in unterschiedlichen Klimamodellen einen unterschiedlichen Wert.

$$\lambda = \frac{\Delta T_S}{RF}$$

Dies führt zu einer Unsicherheit der erwarteten Klimaentwicklung selbst unter Annahme ein und desselben Emissionsszenarios (IPCC, 2013, rechts oben). Ursache hierfür ist die Verschiedenheit der Strahlungsrückkopplungen in den Modellen, speziell über die Wolken (IPCC, 2013, rechts unten).

$$\sum_x \alpha_x = -\frac{1}{\lambda}$$

Hier wird demgegenüber demonstriert, dass die Wolken-Strahlungs-Rückkopplung und damit die Klimasensitivität auch für unterschiedliche Strahlungsantriebe im gleichen Klimamodell wesentlich verschieden sein kann.

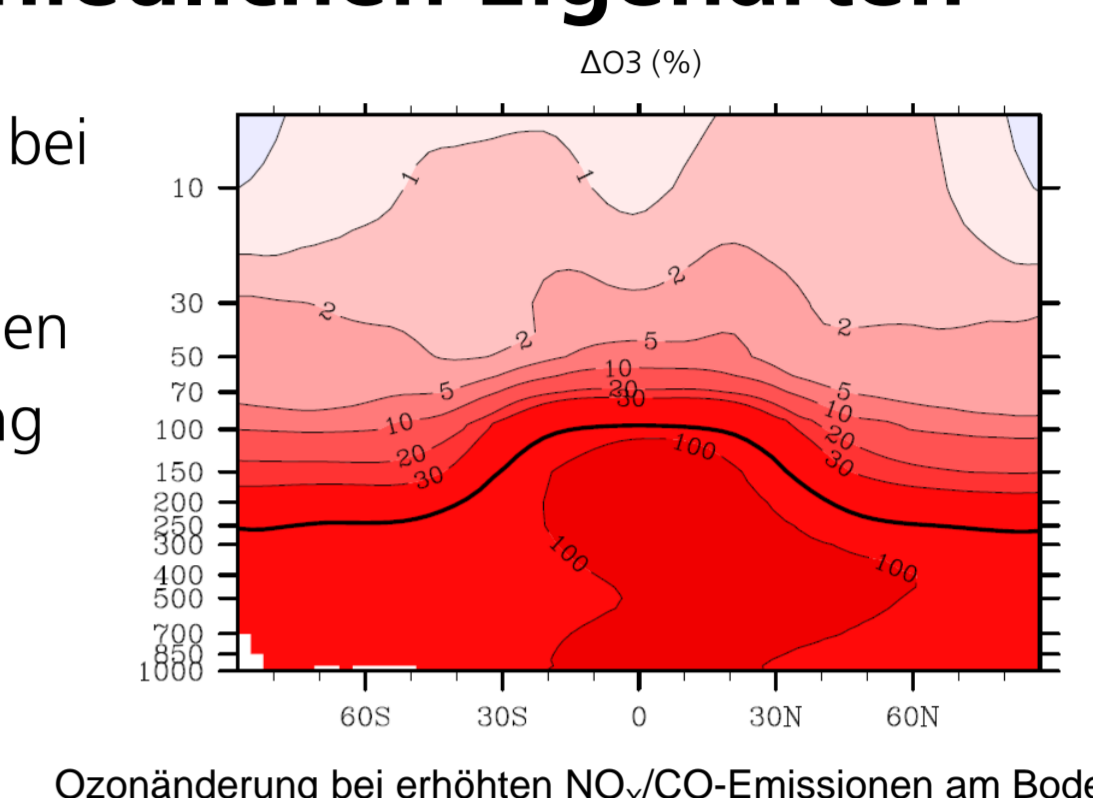


Beispiel: Ein durch Ozonerhöhung (über verstärkte  $NO_x/CO$  Bodenemissionen) induzierter Strahlungsantrieb hat eine geringere Klimasensitivität als ein durch eine  $CO_2$ -Erhöhung induzierter Strahlungsantrieb (links).

## Variation der Strahlungsrückkopplungen im Falle von Strahlungsantrieben mit unterschiedlichen Eigenarten

Strahlungsrückkopplungen und Klimasensitivität variieren bei

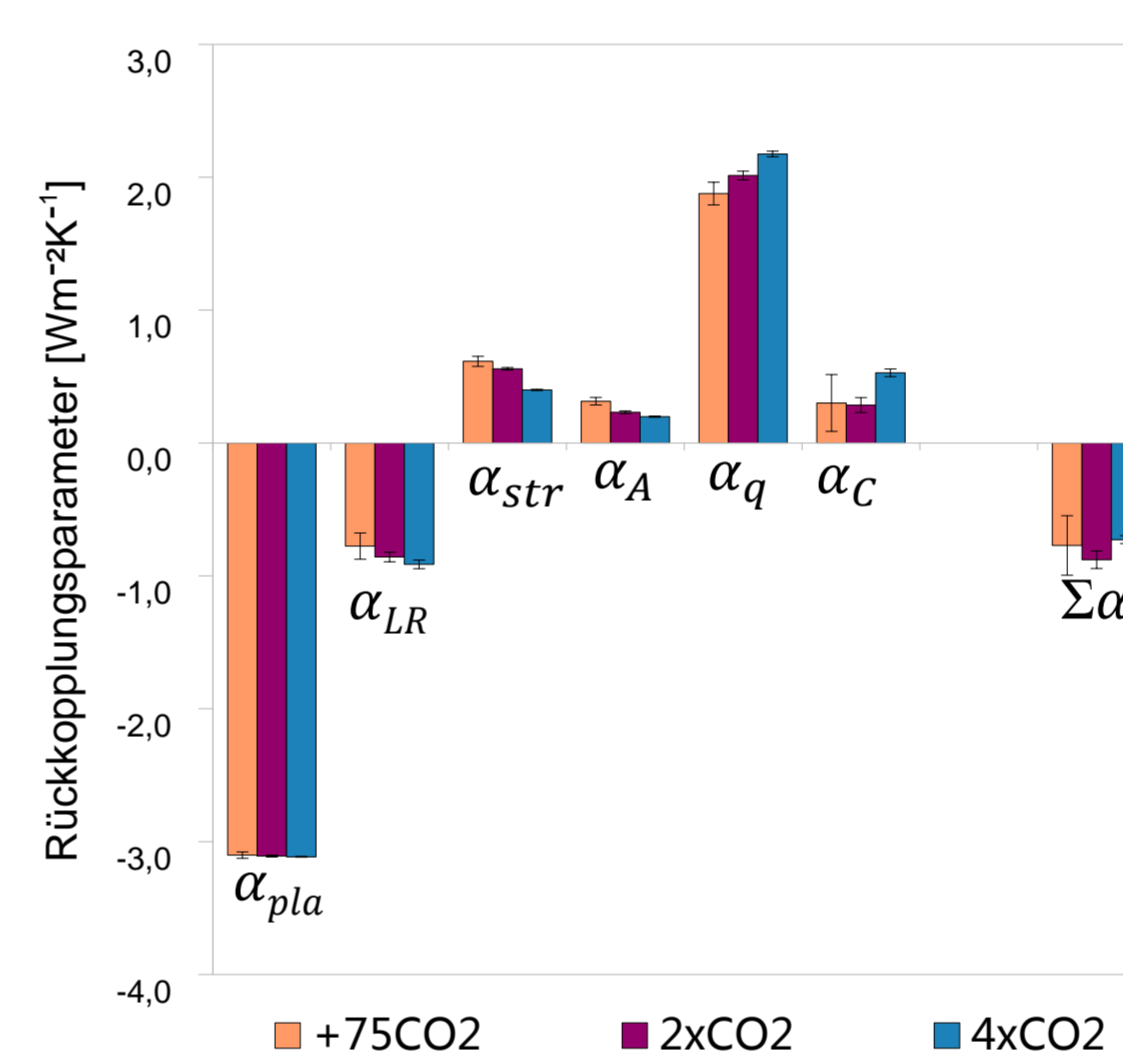
- unterschiedlicher Größe des Strahlungsantriebs
- unterschiedlichen Strahlungsantriebsmechanismen
- unterschiedlicher räumlicher Struktur des Störung
- Berücksichtigung zusätzlicher Rückkopplungen



Simulation (Klima-Chemie-Modell EMAC)	Interaktive Chemie	Strahlungsantrieb $Wm^{-2}$	Klimasensitivität $\lambda$ $K/Wm^{-2}$ 95% Konfidenz
$\Delta O_3$ durch mehr $NO_x+CO$ (s.o.)	nein	$NO_x+CO$	1.22 0.63 [0.55; 0.67]
$\Delta O_3$ durch mehr $NO_x+CO$ (s.o.)	ja	$NO_x+CO_{chem}$	1.22 0.69 [0.65; 0.73]
$CO_2$ -Erhöhung um 75 ppmv (1 $W/m^2$ )	nein	$1.2 \times CO_2 (+75CO_2)$	1.06 0.73 [0.67; 0.79]
$CO_2$ -Verdoppelung	nein	$2 \times CO_2$	4.13 0.70 [0.69; 0.72]
$CO_2$ -Vervierfachung	nein	$4 \times CO_2$	8.93 0.91 [0.90; 0.92]

Gleichgewichtsklimasimulationen mit dem Klima-Chemie-Modell EMAC (Dietmüller, 2011; Dietmüller et al., 2014)

## Unterschiedlich großer Strahlungsantrieb



(Rieger et al., 2016)

- Die  $2 \times CO_2$  und  $4 \times CO_2$ -Simulationen sind bzgl. ihrer Klimasensitivität signifikant verschieden.
  - Alle Rückkopplungsprozesse (außer dem „Planck-Effekt“) tragen dazu bei, am meisten die Wolken-Strahlungs-Rückkopplung.
- Auf Grund zu hoher interner Variabilität sind sowohl Klimasensitivität als auch die Summe der Rückkopplungen für die  $+75CO_2$  und  $2 \times CO_2$ -Simulationen statistisch nicht unterscheidbar. Das gleiche gilt für die Wolken-Strahlungs-Rückkopplungen.
  - Für kleinere Strahlungsantriebe ist es schwieriger, durch Rückkopplungsanalyse die Ursachen einer unterschiedlichen Klimasensitivität zu identifizieren.

## “Partial Radiative Perturbation” – Rückkopplungsanalyse

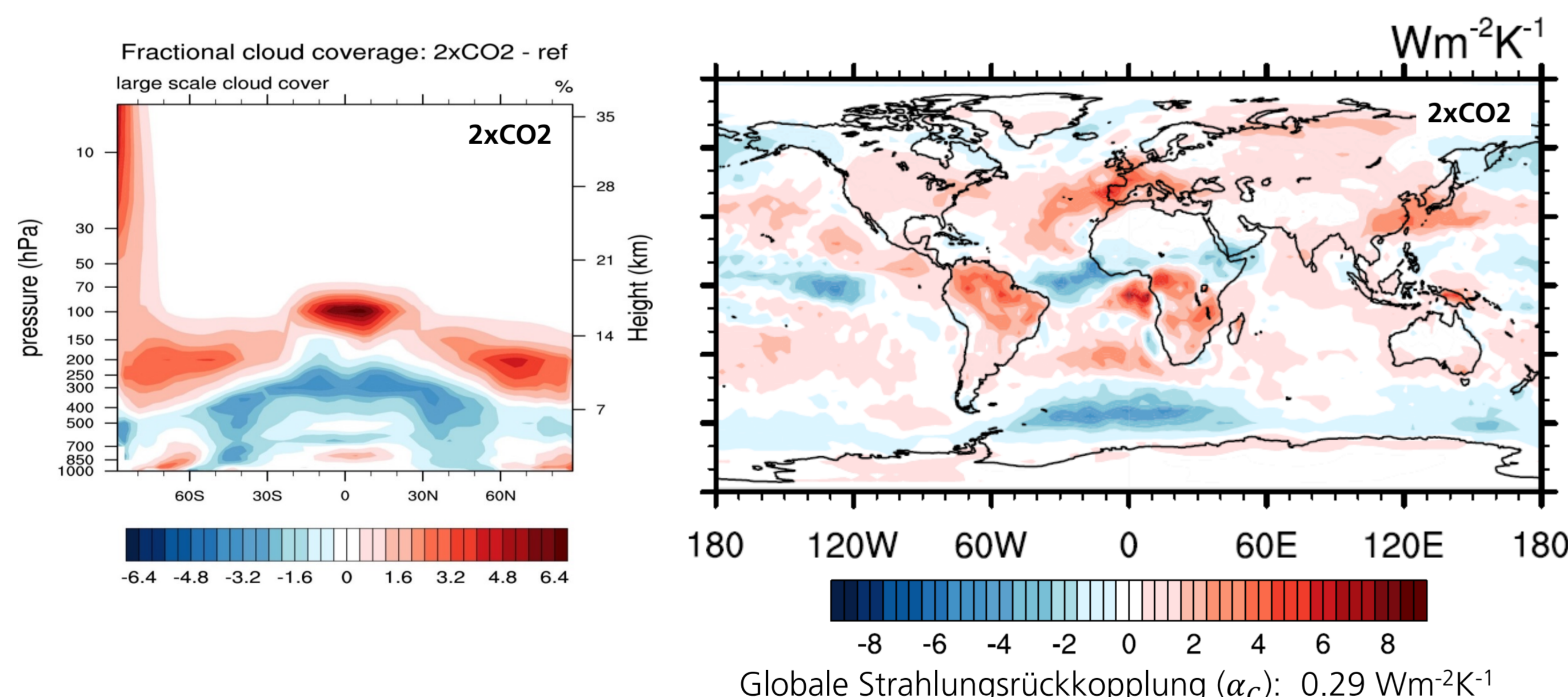
Unter der Annahme von Linearität und Separierbarkeit der Strahlungseffekte werden die Werte der strahlungsrelevanten Parameter im Referenzexperiment, jeder für sich, durch den entsprechenden Wert in einem Klimaänderungsexperiment ersetzt, und so jeweils, in einer a posteriori Strahlungstransferrechnung, die induzierte Strahlungsflussänderung bestimmt.

→ Rückkopplungsparameter  $\alpha = \sum_x \alpha_x = \sum_x \frac{\Delta R_x}{\Delta T_S} \quad x = q, C, A, T, \dots$

Die Summe aller Rückkopplungen kompensiert im neuen Klimagleichgewicht den Strahlungsantrieb und ist numerisch der negativ inverse Wert des Klimasensitivitätsparameters.

$$\alpha = \sum_x \alpha_x = -\frac{RF}{\Delta T_S} = -\frac{1}{\lambda}$$

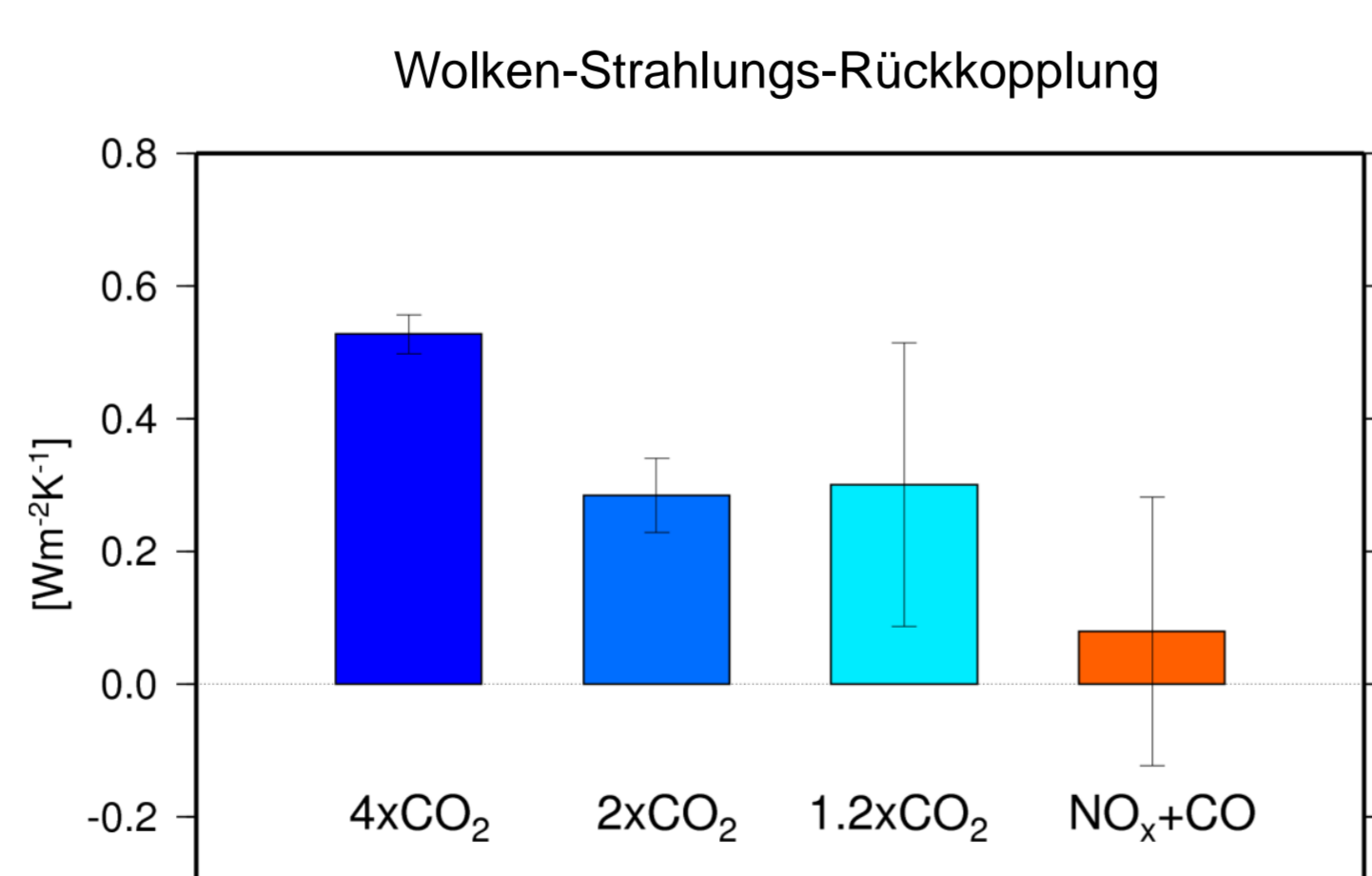
## Struktur der Wolkenrückkopplung



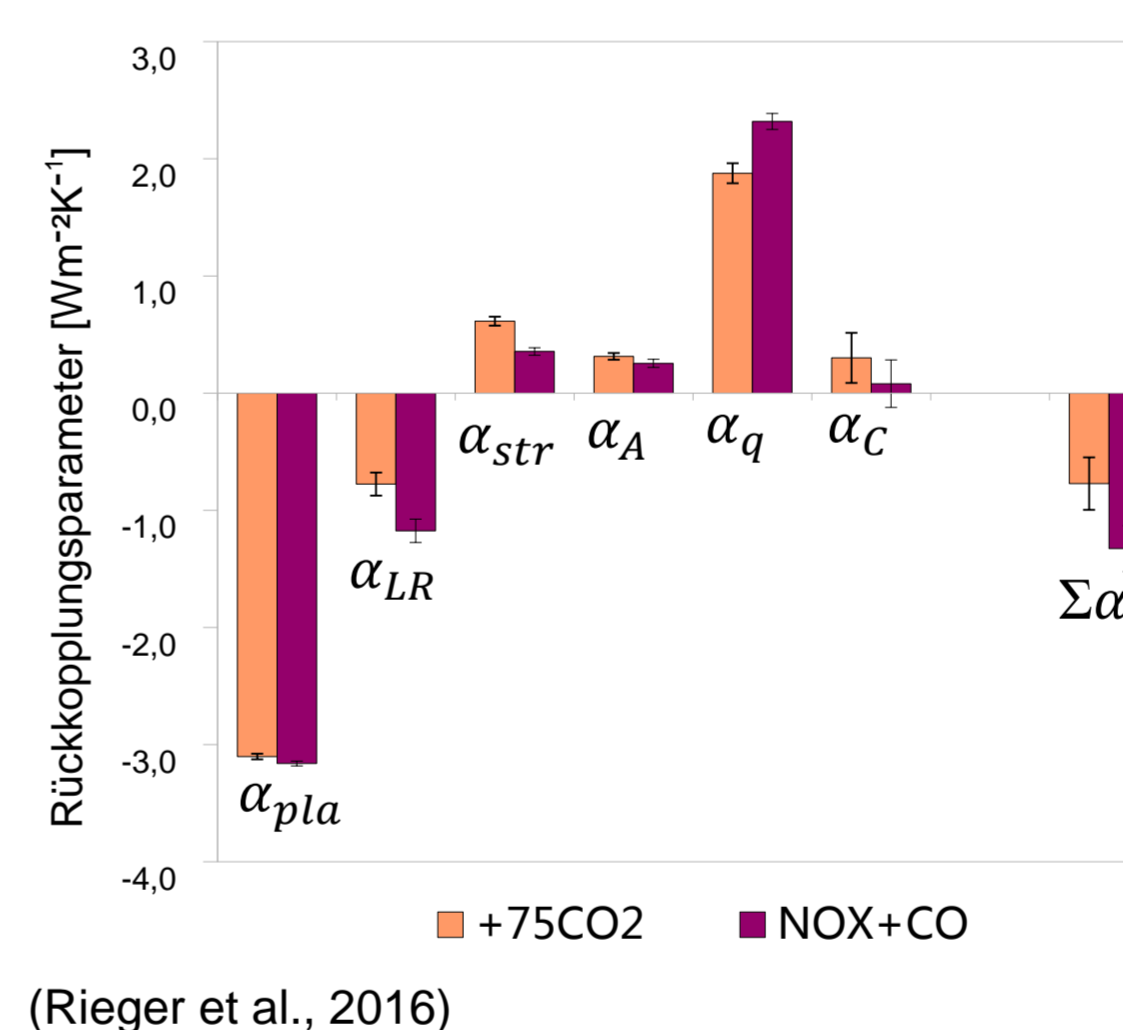
Die globale Wolken-Strahlungs-Rückkopplung stellt ein kleines Residuum regional großer Werte dar, wobei mehrere Einzeleffekte sich gegenseitig kompensieren (solare/thermische Wirkung; hohe und tiefe Wolken; optische Eigenschaften und Bedeckungsgrad).

Der globale Rückkopplungsparameter kann für unterschiedliche Strahlungsantriebe sehr verschieden sein.

Die statistische Ungenauigkeit des mit der genannten Methode bestimmten globalen Rückkopplungsparameters nimmt für immer kleinere Strahlungsantriebe immer mehr zu.



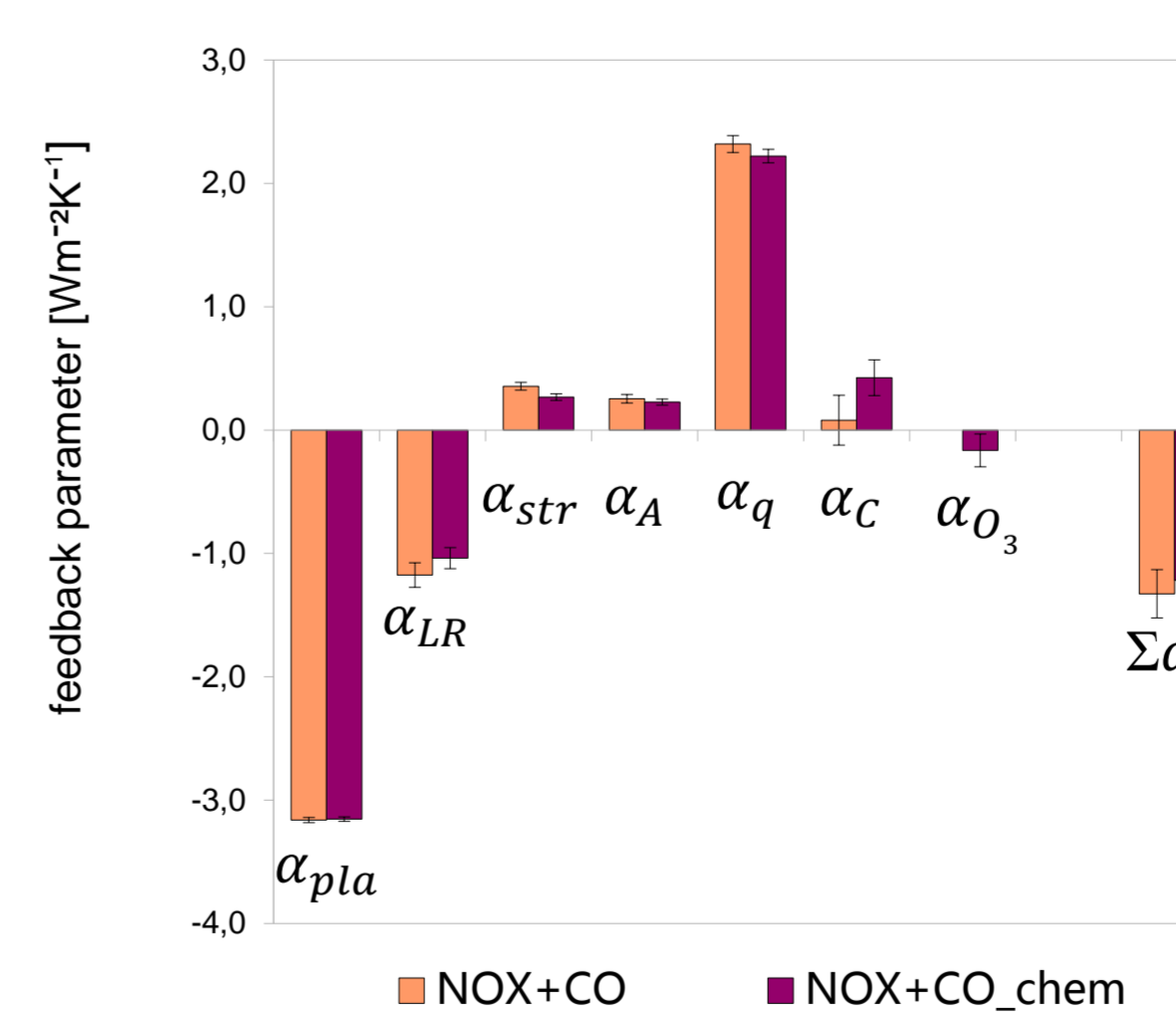
## Physikalisch unterschiedliche antreibende Störungen



(Rieger et al., 2016)

- Bei ähnlich große Strahlungsantrieben durch  $CO_2$  und  $NO_x/CO$  ist die Summe der Rückkopplungen unterschiedlich und (konsistent damit) auch die Klimasensitivität („efficacy“, Hansen et al., 2005) signifikant verschieden.
  - Verschiedene Rückkopplungsprozesse tragen zu dem Effekt bei; stärker positives  $\alpha_q$  (Wasserdampfrückkopplung) wird durch stärker negatives  $\alpha_{LR}$  („lapse-rate“ Rückkopplung) kompensiert. Geringeres  $\alpha_{str}$  und  $\alpha_c$  reduzieren die Klimasensitivität im  $NO_x+CO$ -Fall. Wiederum ist im Falle der Wolken-Strahlungs-Rückkopplung ( $\alpha_c$ ) die statistische Aussagekraft begrenzt.

## Erweitertes Modell (zusätzlich chemische Rückkopplungen)



- Werden im Falle der  $NO_x+CO$ -Störung (über Ozon, s.o.) auch chemische Rückkopplungen zugelassen, so ändert sich ebenfalls die Klimasensitivität der Störung. Obwohl eine zusätzliche negative Rückkopplung ( $\alpha_{O_3}$ ) auftritt, wird dennoch die Klimasensitivität erhöht.
  - Die Stärke der Wolkenrückkopplung ( $\alpha_c$ ) hängt (signifikant) von der Anwesenheit einer Ozonrückkopplung ab. Die Änderung von  $\alpha_c$  bestimmt die „Umkehr“ des Primär-Effekts ( $\alpha_{O_3}$ ) für die gesamte Rückkopplung ( $\sum \alpha_x$ )! Die statistische Signifikanz ist für  $\sum \alpha_x$  gering, aber die qualitative Erklärung dennoch schlüssig.

## Zusammenfassung

- Konsistente Änderungen von Klimasensitivität und Klimarückkopplungen können bei Analyse von Gleichgewichtsklimasimulationen mit der PRP Analysemethode identifiziert werden.
- Die Wolken-Strahlungs-Rückkopplung spielt eine hervorragende Rolle bei der Variation der Gesamt-Rückkopplung, ist jedoch auch mit der größten statistischen Unsicherheit behaftet.
- Rückkopplungen sind analytisch separierbar, können aber dennoch physikalisch gekoppelt sein, wie sich am Beispiel der Abhängigkeit der Wolken-Strahlungs-Rückkopplungen von der An- bzw. Abwesenheit einer Ozonrückkopplung zeigt.

### Referenzen:

Dietmüller, S. (2011) Relative Bedeutung chemischer und physikalischer Rückkopplungen in Klimasensitivitätsstudien mit dem Klima-Chemie-Modellsystem EMAC/MLO, Doktorarbeit an der LMU München, DLR-Forschungsbericht 2011-19, 124pp.  
 Dietmüller, S., Ponater, M., Säusen, R. (2014) Interactive ozone induces a negative feedback in  $CO_2$ -driven climate change simulations, J Geophys Res Atmos, 119, 1796-1805.

Hansen, J. and 54 co-authors (2005) Efficacy of climate forcings, J Geophys Res, 110, D18104.  
 IPCC (2013) Climate Change 2013: The physical basis, contribution of working group I to the 5th assessment report of the IPCC.  
 Rieger, V., Dietmüller, S., Ponater, M. (2016) Can feedback analysis be used to uncover the physical origin of efficacy differences, eingereicht bei Climate Dynamics.