

Effekte des globalen Verkehrs auf Aerosol und Klima: Ergebnisse und Perspektiven

Mattia Righi

in Zusammenarbeit mit:

Johannes Hendricks, Christof Beer, Christopher Kaiser und Robert Sausen
(DLR Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen)



DMG Fortbildungstag – 20.11.2019

Wissen für Morgen



Outline

Teil 1 – Ergebnisse

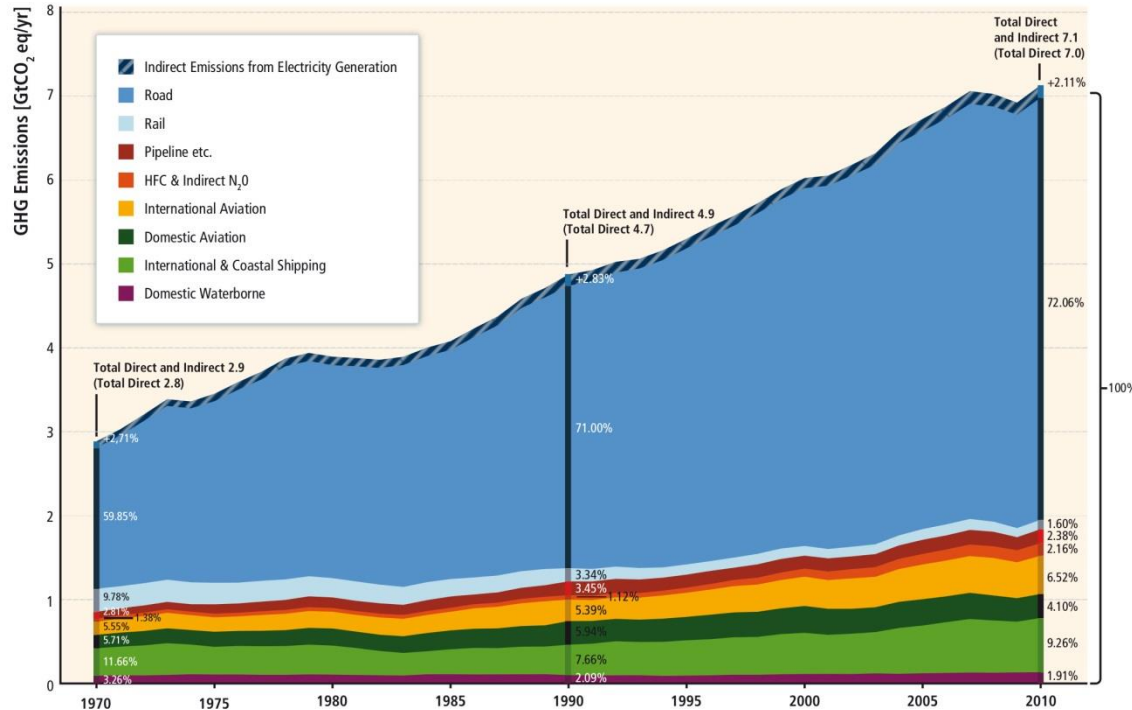
- Das globale Aerosolmodell EMAC-MADE
- Emissionskataster und Szenarien
- Subskalige Prozesse und Partikelgrößenverteilungen
- Verkehrseffekte auf globales Aerosol
- Klimawirkung des Verkehrs

Teil 2 – Perspektiven

- Rolle von Eiswolken
- Neue Version des Aerosolsubmodells MADE (MADE3)
- Kopplung mit einem neuen Wolkenschema inkl. Eiswolken
- Tuning und Evaluierung des neuen Modellsystems
- Geplante Anwendungen



Motivation



Sims et al. (IPCC, 2014)

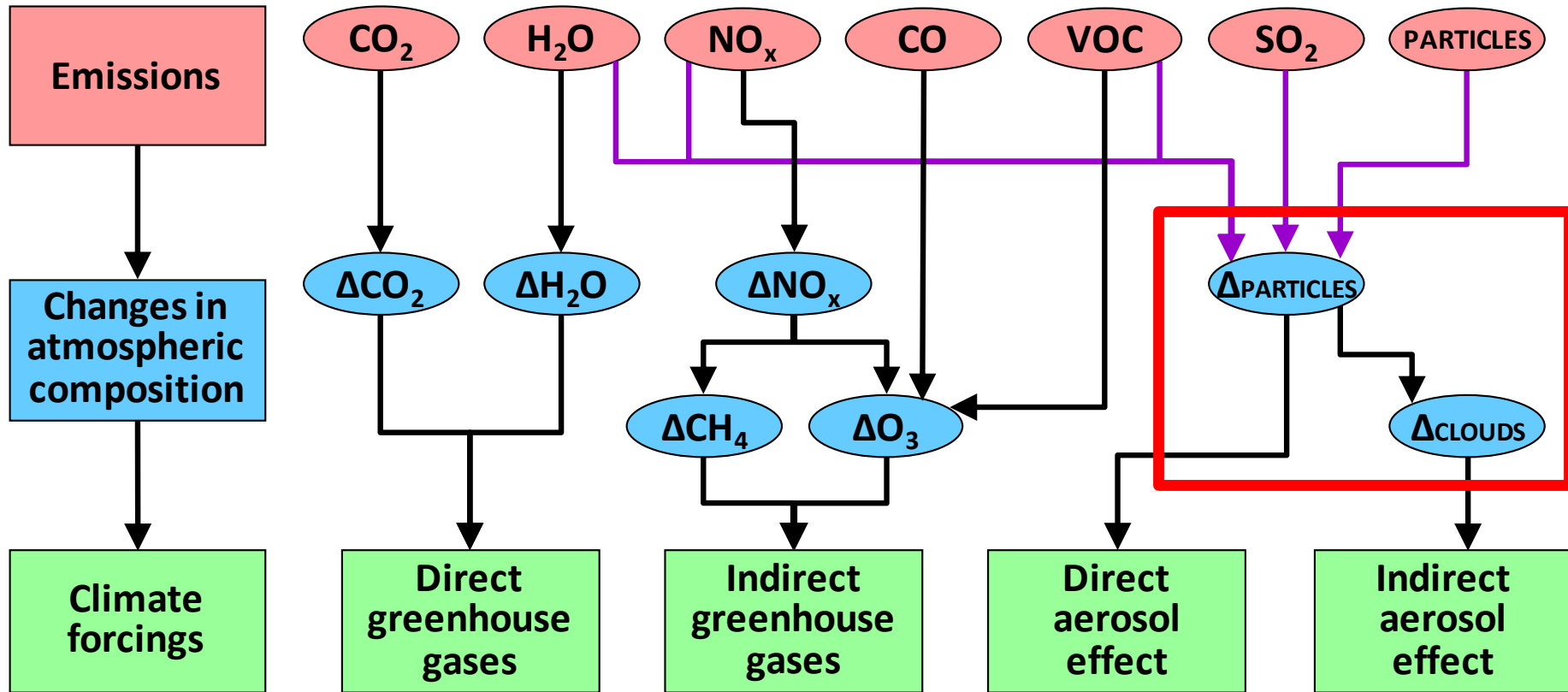
- Die Verkehrssektoren sind für etwa **23%** der gesamten anthropogenen CO₂ Emissionen verantwortlich (2010).
- Ein Großteil (70%) dieser CO₂ Emissionen stammt aus dem **Straßenverkehr**
- Die **Wachstumsraten** der Verkehrssektoren sind größer als die anderer Sektoren
- Weiteres deutliches Wachstum (ca. **2%/Jahr**) in Zukunftsszenarien

Die Verkehrssektoren emittieren nicht nur CO₂, sondern auch **kurzlebige Substanzen: NO_x, CO, VOC, SO₂, Partikel, ...**

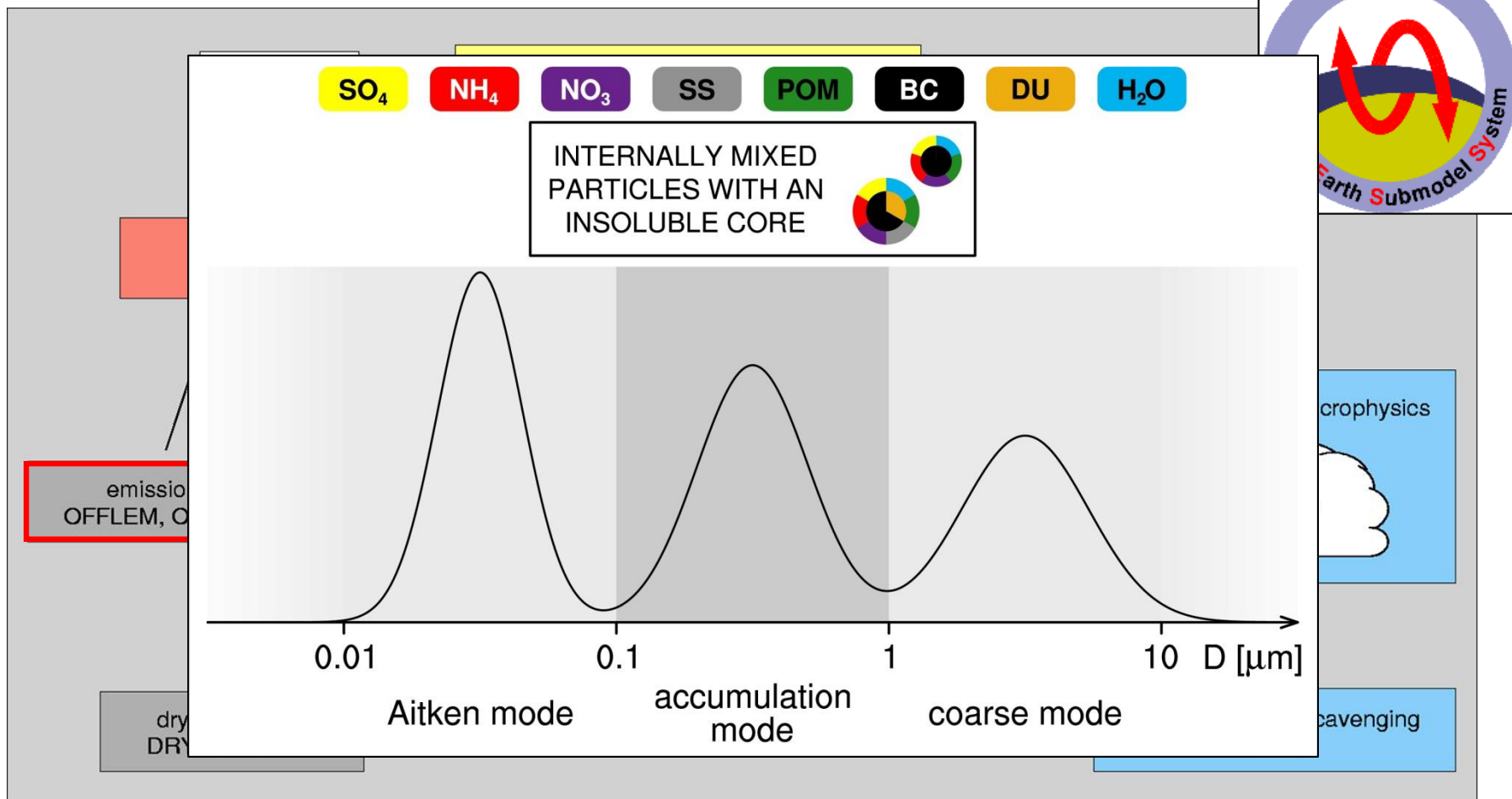
Diese Emissionen beeinflussen sowohl die **Luftqualität** als auch das **Klima**
 ⇒ zahlreiche **Minderungsoptionen**, technologisch und regulatorisch



Effekte des Verkehrs auf Atmosphäre und Klima



EMAC-MADE – MESSy version 1.4

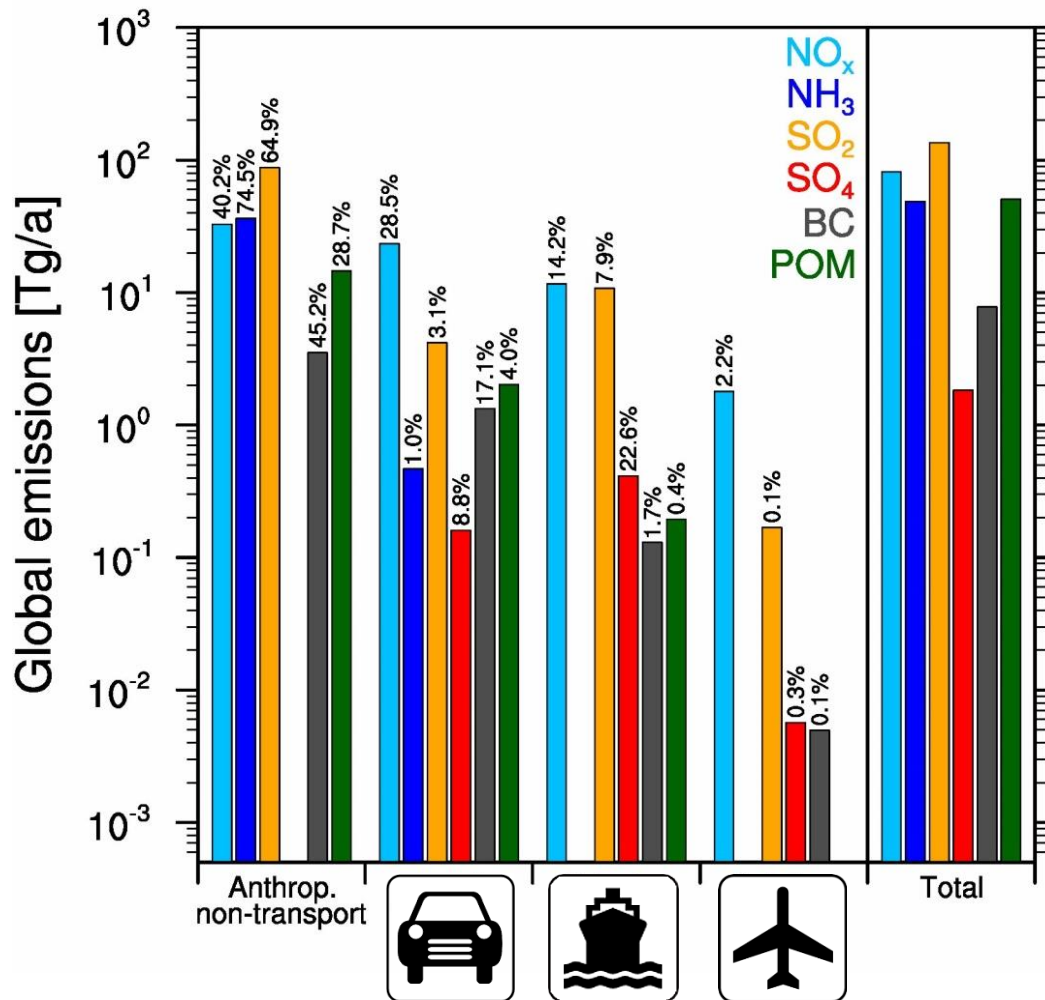


Lauer et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2007), Jöckel et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2006)

MADE ist mit dem **Strahlungs-** und **Wolken**modul gekoppelt, um die Aerosol-Strahlungs- und Aerosol-Wolken-Wechselwirkungen zu simulieren.



Emissionen: CMIP5 Kataster – Jahr 2000

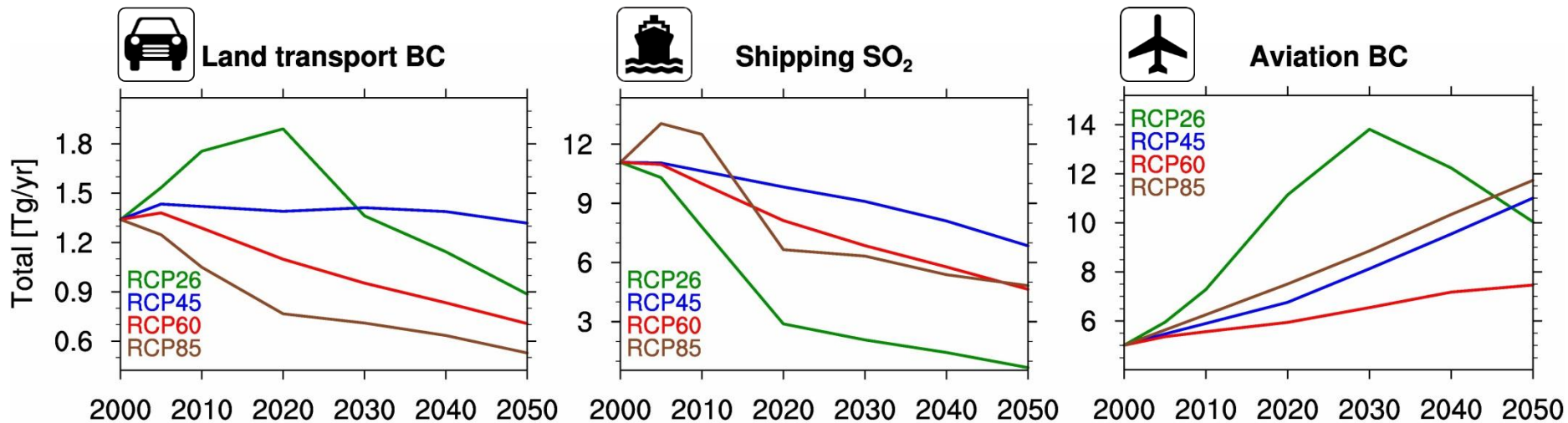


Lamarque et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2010)



Zukünftige Projektionen: RCP Szenarien

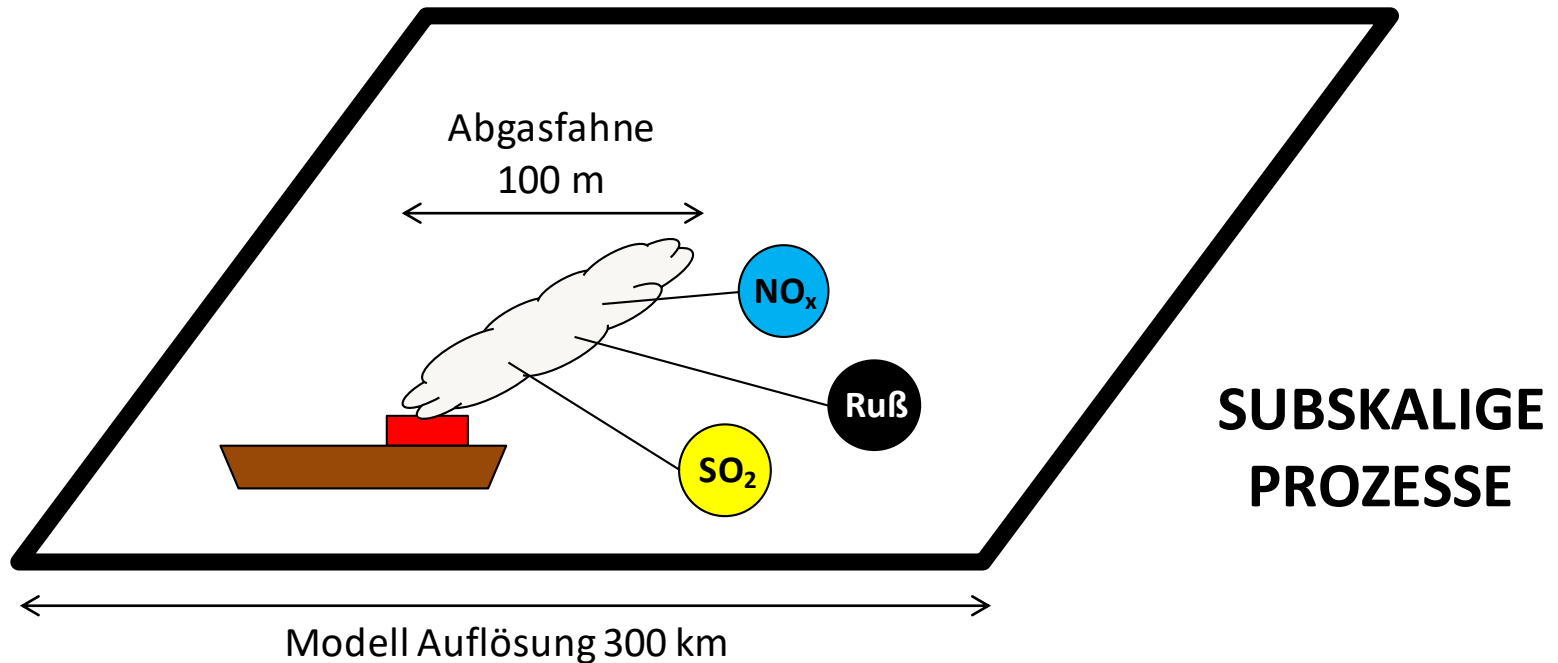
- ✓ Die Representative Concentration Pathways sind **Climate-policy** Szenarien, entwickelt für IPCC AR5.
- ✓ Die 4 RCPs sind auf Basis des globalen anthropogenen **Strahlungsantriebes** in **2100** definiert: RCP**2.6**, RCP**4.5**, RCP**6.0** und RCP**8.5**.
- ✓ Sie sind **keine Air-quality** Szenarien: sie umfassen nicht den kompletten Bereich von Luftqualitätsprojektionen (z.B. kein Business-as-usual-Szenario).
- ✓ Hauptannahme: Korrelation zwischen **Bruttoinlandsprodukt** (GDP) und **Maßnahmen** gegen Luftverschmutzung.



Moss et al. (*Nature*, 2010), van Vuuren et al. (*Clim. Change*, 2011)



Partikelgrößenverteilung und Anzahlemissionen



- **Problem 3:** Effiziente **Transformationsprozesse** (z.B. Koagulation) in der Abgasfahne → globale Modelle kann diese Prozesse **nicht auflösen** (räumlich u. zeitlich subskalig).

→ Sensitivitätsläufe mit verschiedenen Annahmen zu Größenverteilung.
→ Subskalige Prozesse implizit betrachtet durch gealterte Größenverteilungen.



Partikelgrößenverteilungen



	Nucleation mode		Aitken mode		Accumulation mode	
	D_g [nm]	σ	D_g [nm]	σ	D_g [nm]	σ
AEROCOM	-	-	30	1.80	-	-
YOUNG	18	1.70	58	1.58	-	-
AGED	-	-	58	1.58	138	1.59
AGED2	-	-	70	1.45	260	1.25
AGED1	-	-	58	1.52	310	1.145
AGED-ALL	-	-	80	1.80	-	-
HIGH	-	-	25	1.55	150	1.65
LOW	-	-	25	1.55	150	1.65
NUC	2.5	1.70	25	1.55	150	1.65

Schwefelgehalt

Dentener et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2006)
 Birmili et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2009)
 Petzold et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2008)
 Petzold et al. (*J. Geophys. Res.*, 1999)
 Kärcher et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2007)
 Righi et al. (*Environ. Sci. Tech.*, 2011)



Globale Modellsimulationen

Name	Year	RCP	Anthrop.	Road	Shipping	Aviation
100% reduction	2000	–	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	HIGH
	2000	–	AEROCOM	OFF	AGED2	HIGH
	2000	–	AEROCOM	AEROCOM	OFF	HIGH
	2000	–	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	OFF
50% reduction	2000	–	AEROCOM	50%	AGED2	HIGH
	2000	–	AEROCOM	AEROCOM	50%	HIGH
	2000	–	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	50%
Sensitivity Road	2000	–	YOUNG	YOUNG	AGED2	HIGH
	2000	–	YOUNG	OFF	AGED2	HIGH
	2000	–	AGED	AGED	AGED2	HIGH
	2000	–	AGED	OFF	AGED2	HIGH
Sensitivity Shipping	2000	–	AEROCOM	AEROCOM	AGED1	HIGH
	2000	–	AEROCOM	AEROCOM	AGEDALL	HIGH
Sensitivity Aviation	2000	–	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	LOW
	2000	–	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	NUC
Future RCP2.6	2030	2.6	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	HIGH
	2030	2.6	AEROCOM	OFF	AGED2	HIGH
	2030	2.6	AEROCOM	AEROCOM	OFF	HIGH
	2030	2.6	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	OFF
Future RCP4.5	2030	4.5	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	HIGH
	2030	4.5	AEROCOM	OFF	AGED2	HIGH
	2030	4.5	AEROCOM	AEROCOM	OFF	HIGH
	2030	4.5	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	OFF
Future RCP6.0	2030	6.0	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	HIGH
	2030	6.0	AEROCOM	OFF	AGED2	HIGH
	2030	6.0	AEROCOM	AEROCOM	OFF	HIGH
	2030	6.0	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	OFF
Future RCP8.5	2030	8.5	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	HIGH
	2030	8.5	AEROCOM	OFF	AGED2	HIGH
	2030	8.5	AEROCOM	AEROCOM	OFF	HIGH
	2030	8.5	AEROCOM	AEROCOM	AGED2	OFF

EMAC mit MESSy Version 1.4
 T42 horizontale Auflösung (2.8°)
 19 vertikale Level (bis 10 hPa)
 Nudged mode (1995-2005).
 10 Jahre + 1 spin-up
31 Experimente
 Gesamte Rechenzeit: 170 kCPUh

Abschätzung der Verkehrseffekte mit der
 “**100% Perturbationsmethode**”:

Referenzlauf - Sensitivitätslauf
 100% Emissionen - Null Emissionen

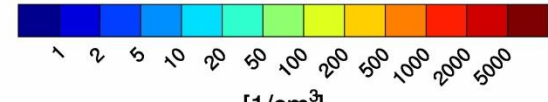
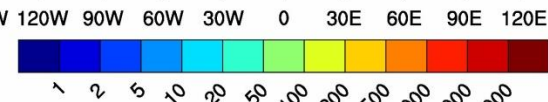
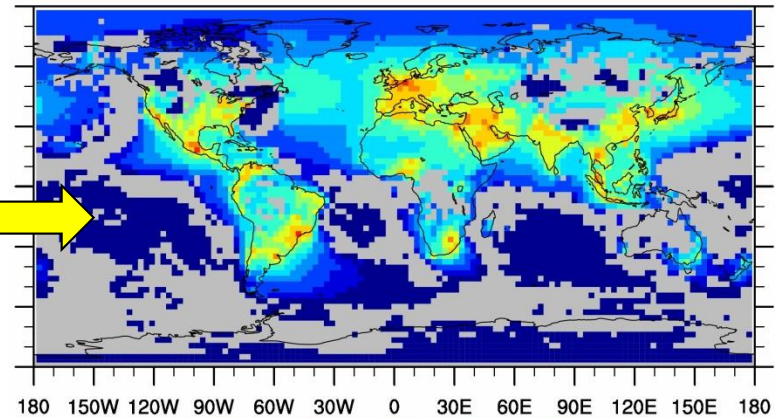
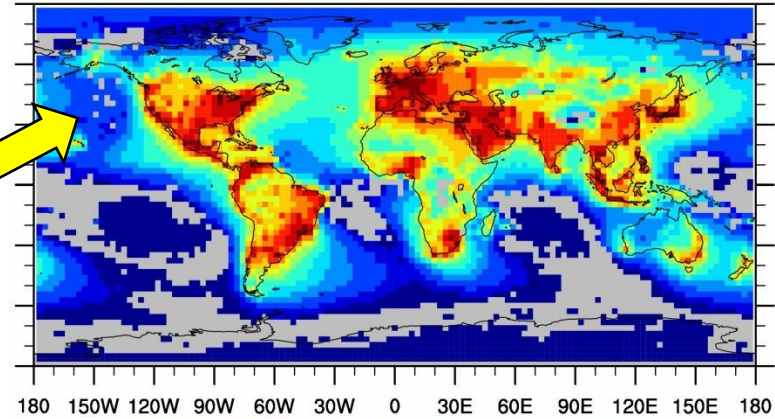
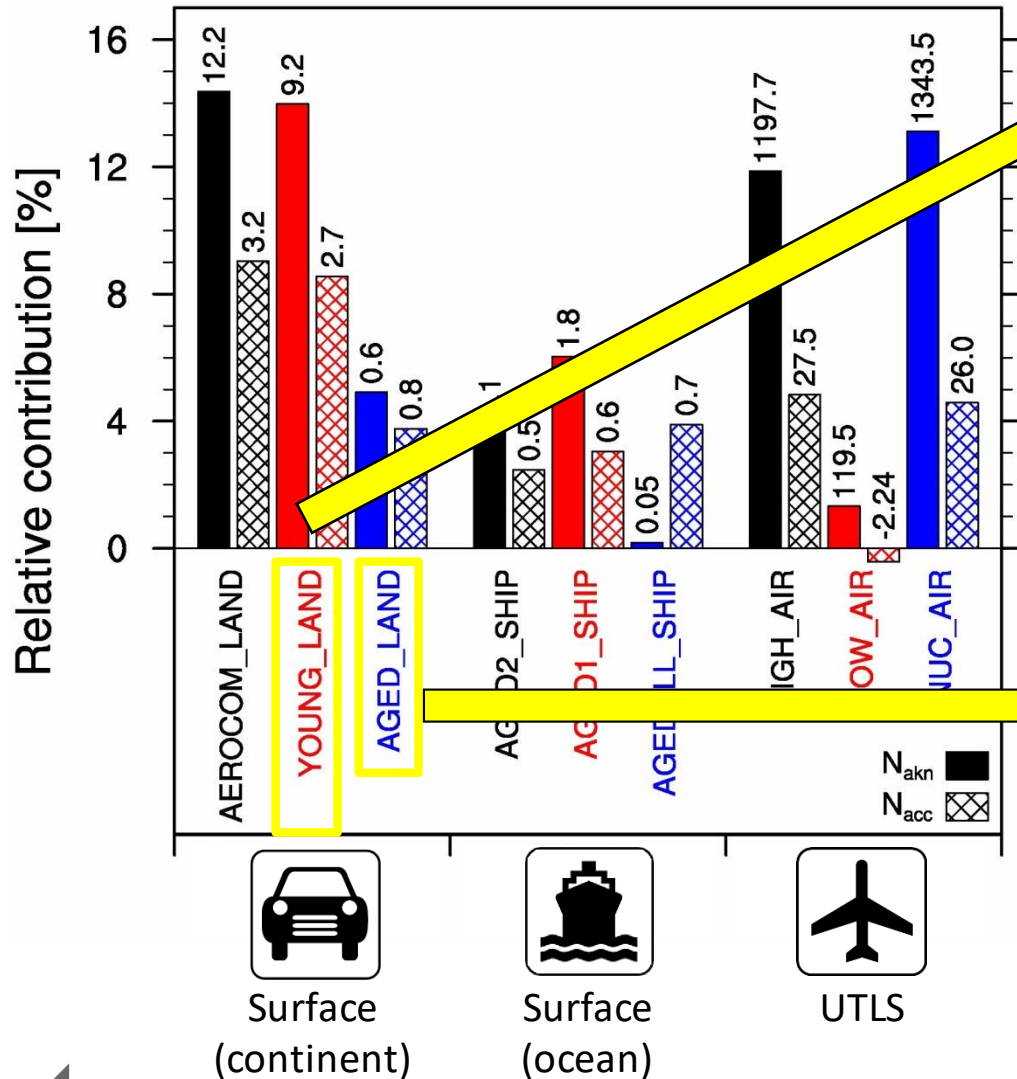
Alternative Methode:
 rückskalierte **50% Reduktion**
 → Quantifizierung **Nicht-linearität**:

2 x [100% Emiss. - 50% Emiss.]



Wirkung auf globale Partikelanzahl

Number burdens

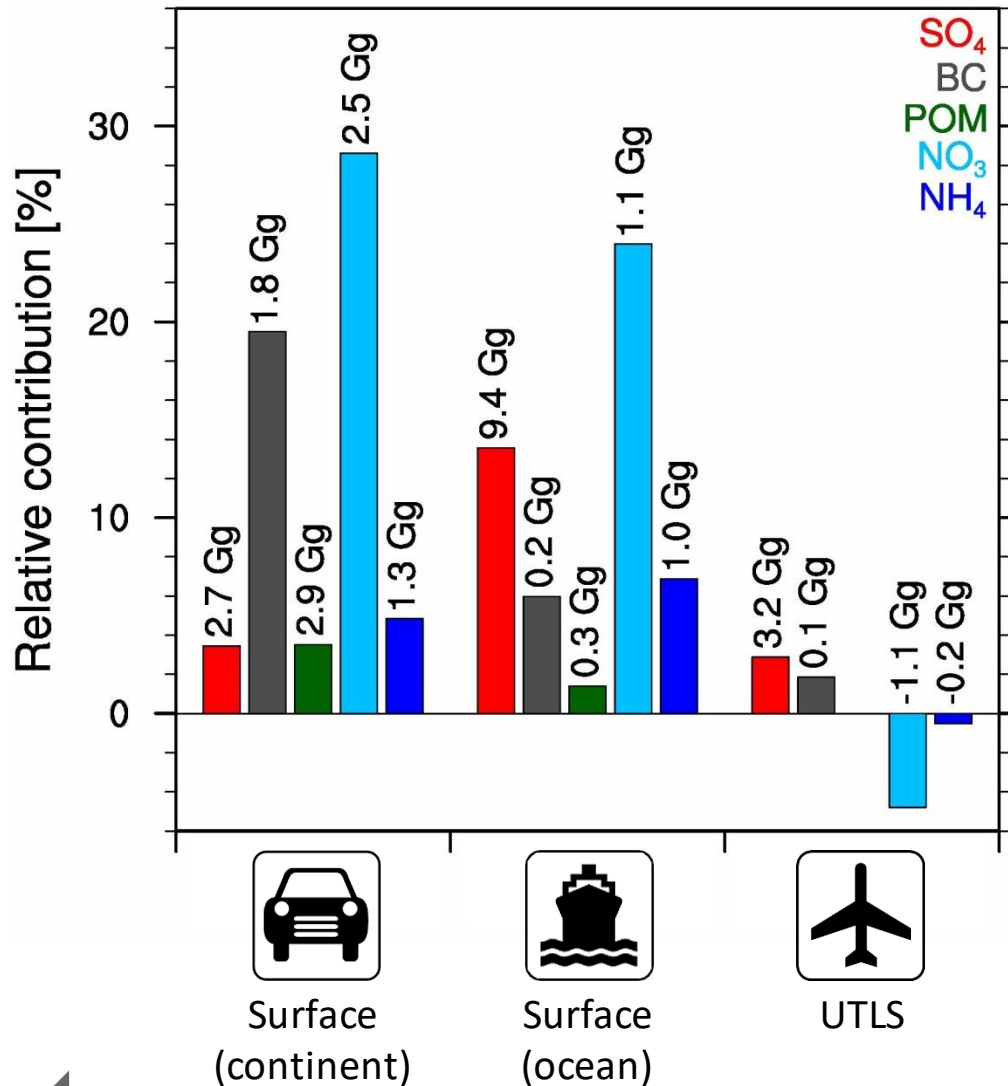


Righi et al. (Atmos. Chem. Phys., 2013)



Wirkung auf globale Aerosolmasse

Mass burdens



BC (Ruß) und Aerosolnitrat wichtigste Substanzen.



Sulfat und Aerosolnitrat wichtigste Substanzen.



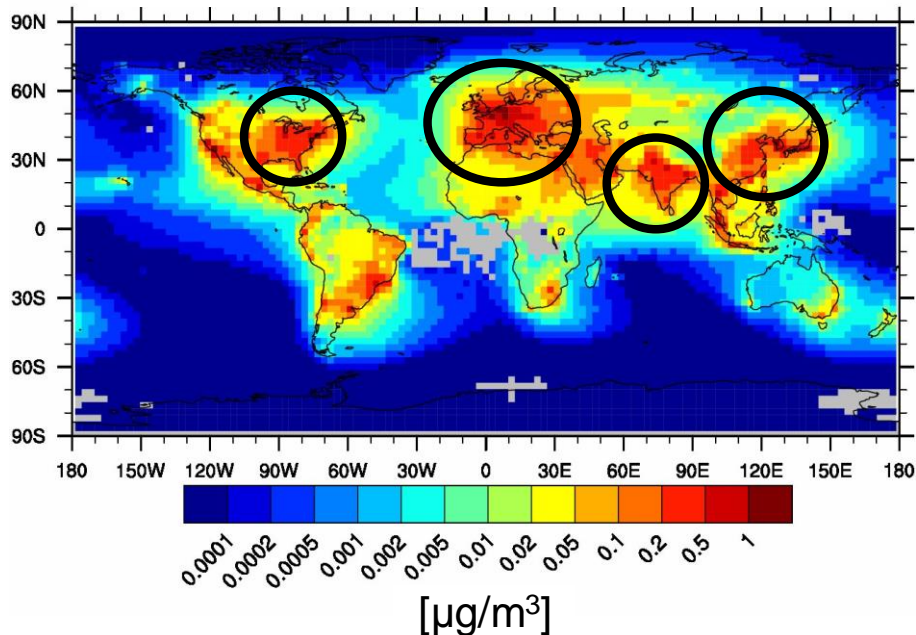
Kleine Effekte auf Aerosolmasse. Verdrängung von Aerosolnitrat durch Sulfat.





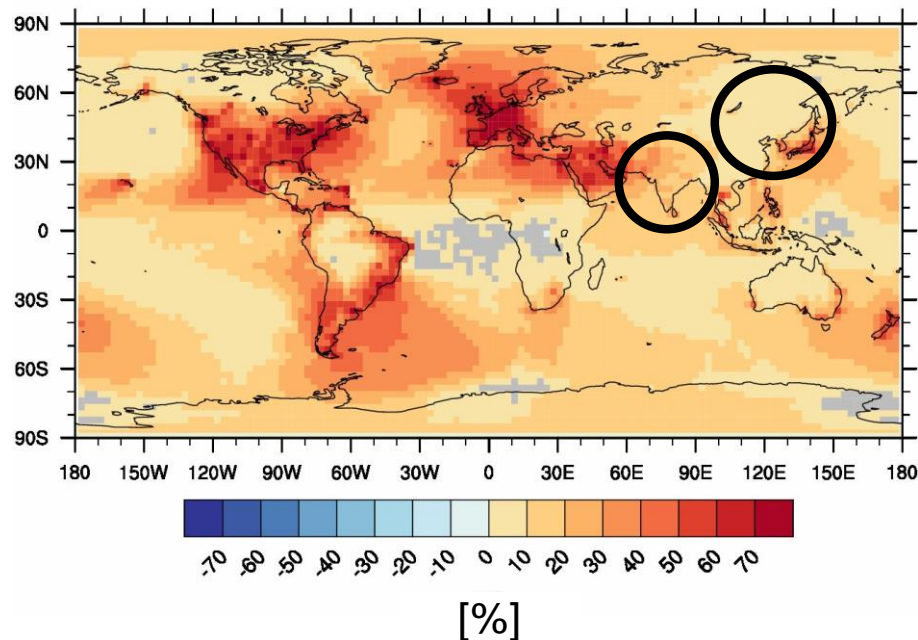
BC aus Landverkehr (2000)

Absoluter Beitrag



Signifikante Effekte über östlichen USA, Europa, Asien sowie in urbanen Räumen anderer Regionen.

Relativer Beitrag



Relativer Beitrag Landverkehr in Asien gering, da andere Quellen (z.B. Industrie, Energieerzeugung, Hausbrand).

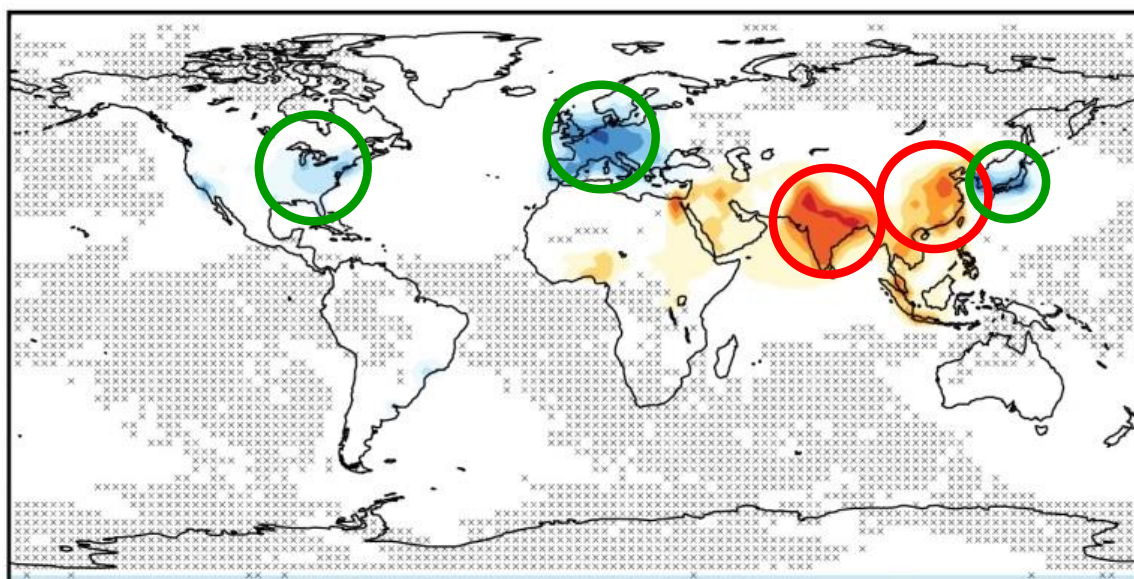




BC aus Landverkehr (2030)

$$[\text{REF}_{2030} - \text{NOLAND}_{2030}] - [\text{REF}_{2000} - \text{NOLAND}_{2000}]$$

2030-2000 - RCP4.5



-1 -0.5 -0.2 -0.1 -0.05 -0.02 0.02 0.05 0.1 0.2 0.5 1

$[\mu\text{g}/\text{m}^3]$

Wirkung von
Landverkehrs-emissionen
auf BC am Boden:

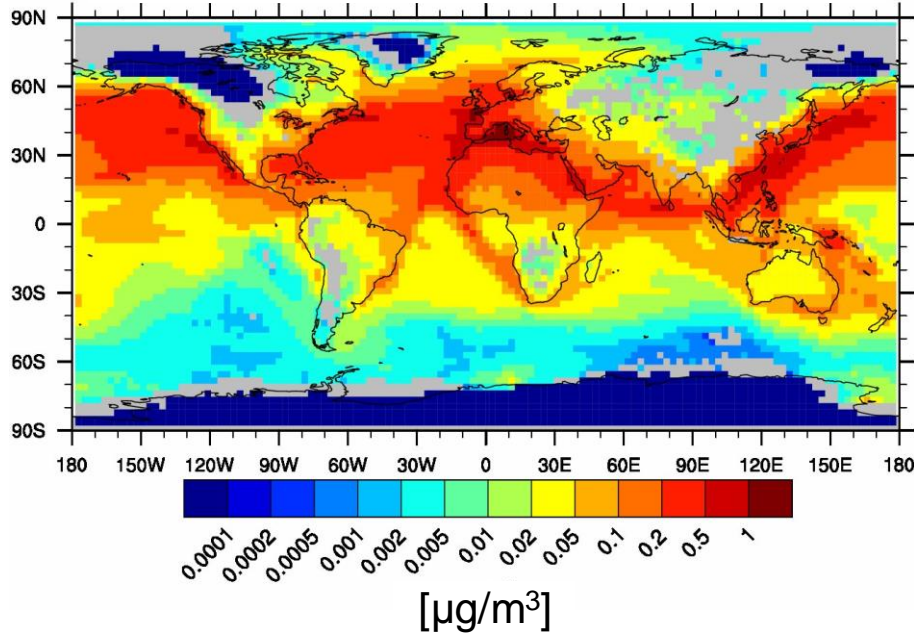
- ✓ **nimmt ab** in den Industrieländern (USA, Europa, Japan)
- ✓ **steigt noch** in den Schwellenländern (India und China)



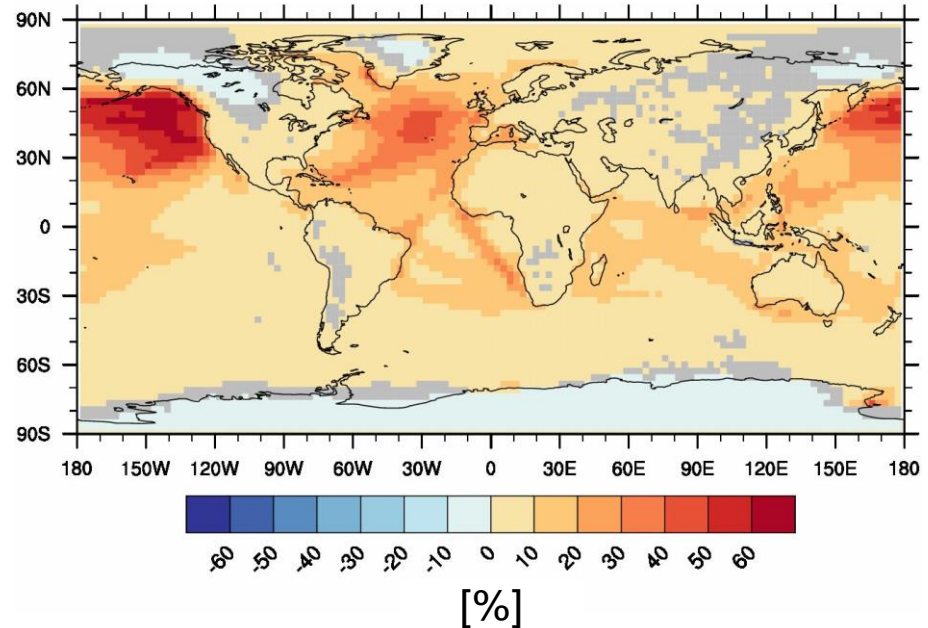


Sulfataerosol aus Schifffahrt (2000)

Absoluter Beitrag



Relativer Beitrag



Signifikante Effekte über Ozeanen der Nordhemisphäre.

Relevanter Einfluss auch in Küstenregionen

Großer relativer Beitrag der Schifffahrt über nördlichem Pazifik und Atlantik.





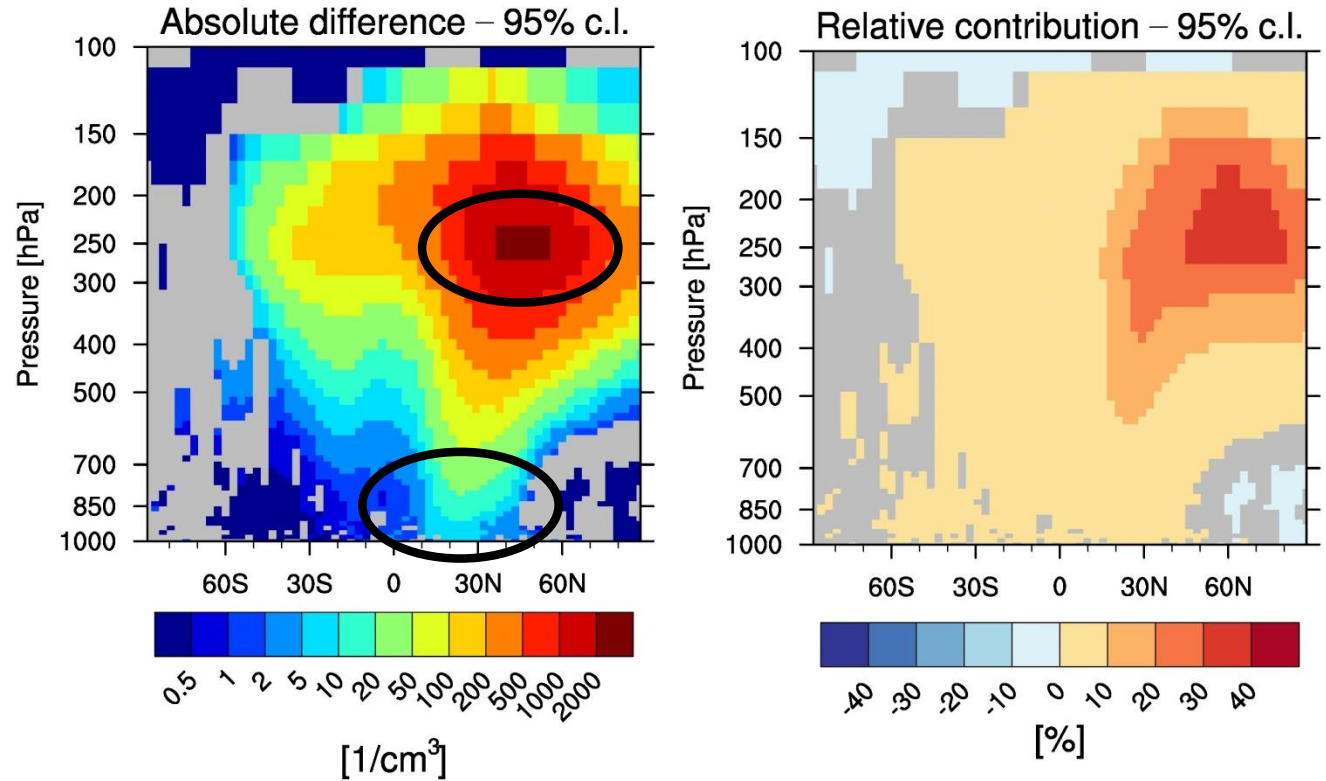
BC und Partikelanzahl aus Luftfahrt (2000)

Luftfahrteffekte hauptsächlich in Nordhemisphäre in typischer Flughöhe (7-12 km).

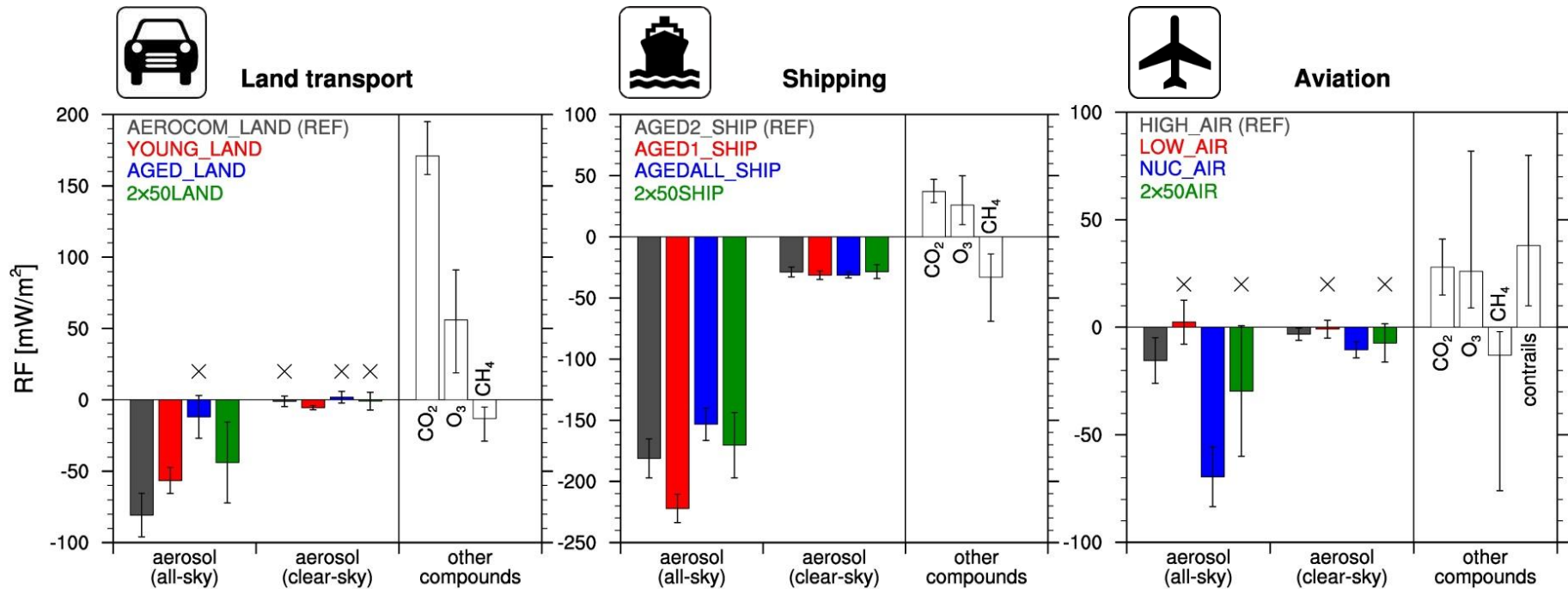
Effekte auch am Boden (Flughafen-aktivitäten, Starts und Landungen,...).

Effekte auf Aerosolmasse sehr gering, aber sehr wichtig für Partikelanzahl

Partikelanzahl



Verkehrsinduzierter Strahlungsantrieb (2000)

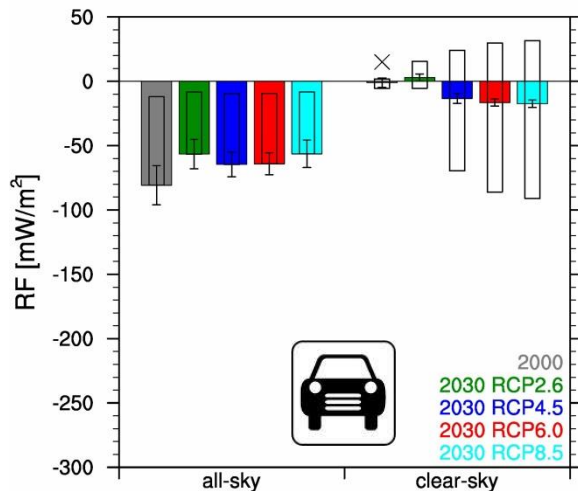


- Großteil der Klimaeffekte resultiert aus Effekten auf **Wolken** (all-sky >> clear-sky)
- Große **Unsicherheit** durch angenommene Größenverteilungen der emittierten Partikel
- **Landverkehrs**-induziertes Aerosol-RF größer als Ozon-RF
- **Schiffs**-induziertes Aerosol-RF ist stärkster Effekt
- **Luftfahrt**-induziertes Aerosol-RF stark abhängig von Größenverteilung

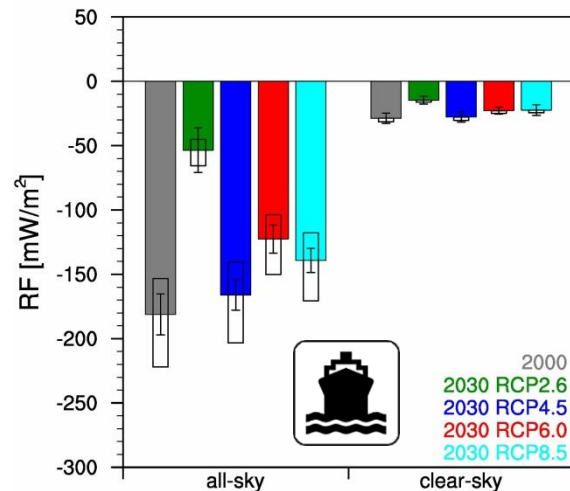


Verkehrsinduzierter Strahlungsantrieb (2030)

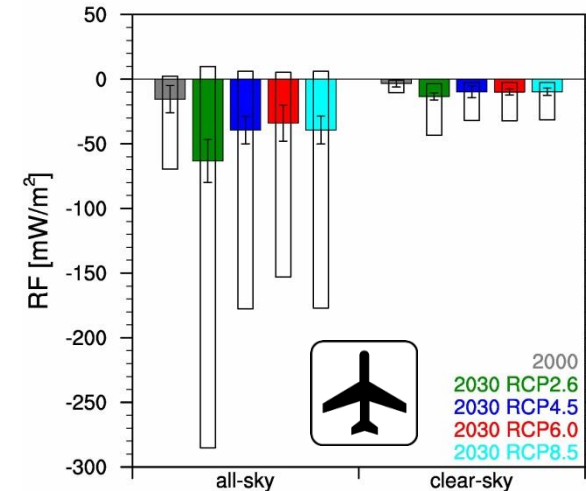
Land transport



Shipping



Aviation



- Großteil der Klimaeffekte resultiert aus Effekten auf **Wolken** (all-sky >> clear-sky)
- Klimawirkung **Land-** und **Schiffsverkehr** reduziert in 2030.
- Klimawirkung Schifffahrt reduziert durch verringerten **Schwefelgehalt** der Treibstoffe.
- Klimawirkung **Luftfahrt** steigt in allen Szenarien.



Schlussfolgerungen – Teil 1

Jahr 2000

- ✓ Deutliche **Effekte des Verkehrs auf das globale atmosphärische Aerosol:**
 - **BC:** 20% aus Landverkehr
 - **Nitrat:** 28% / 24% aus Land- / Schiffsverkehr
 - **Sulfat:** 14% aus Schiffsverkehr
- ✓ Luftverkehr bewirkt signifikante **Zunahme der Partikelbelastung in Hauptfluggebieten.**
- ✓ **Verkehrsinduzierter Ruß (BC)** hauptsächlich über Nordamerika, Europa, Südostasien.
- ✓ **Sulfat aus Schiffsverkehr** über nordhemisphärischen Ozeanen und Küstenregionen.
- ✓ Die **Klimawirkung verkehrsinduzierter Partikel** beträgt etwa 25% der Wirkung aller anthropogenen Partikel und erfolgt hauptsächlich über die Modifikation von Wolken.

Zukunft (2030)

- ✓ Die **Klimawirkung des Aerosols aus Land- und Seeverkehr** nimmt bis 2030 voraussichtlich leicht ab.
- ✓ Die **Klimawirkung des luftverkehrsgenerierten Aerosols** kann bis 2030 deutlich zunehmen.

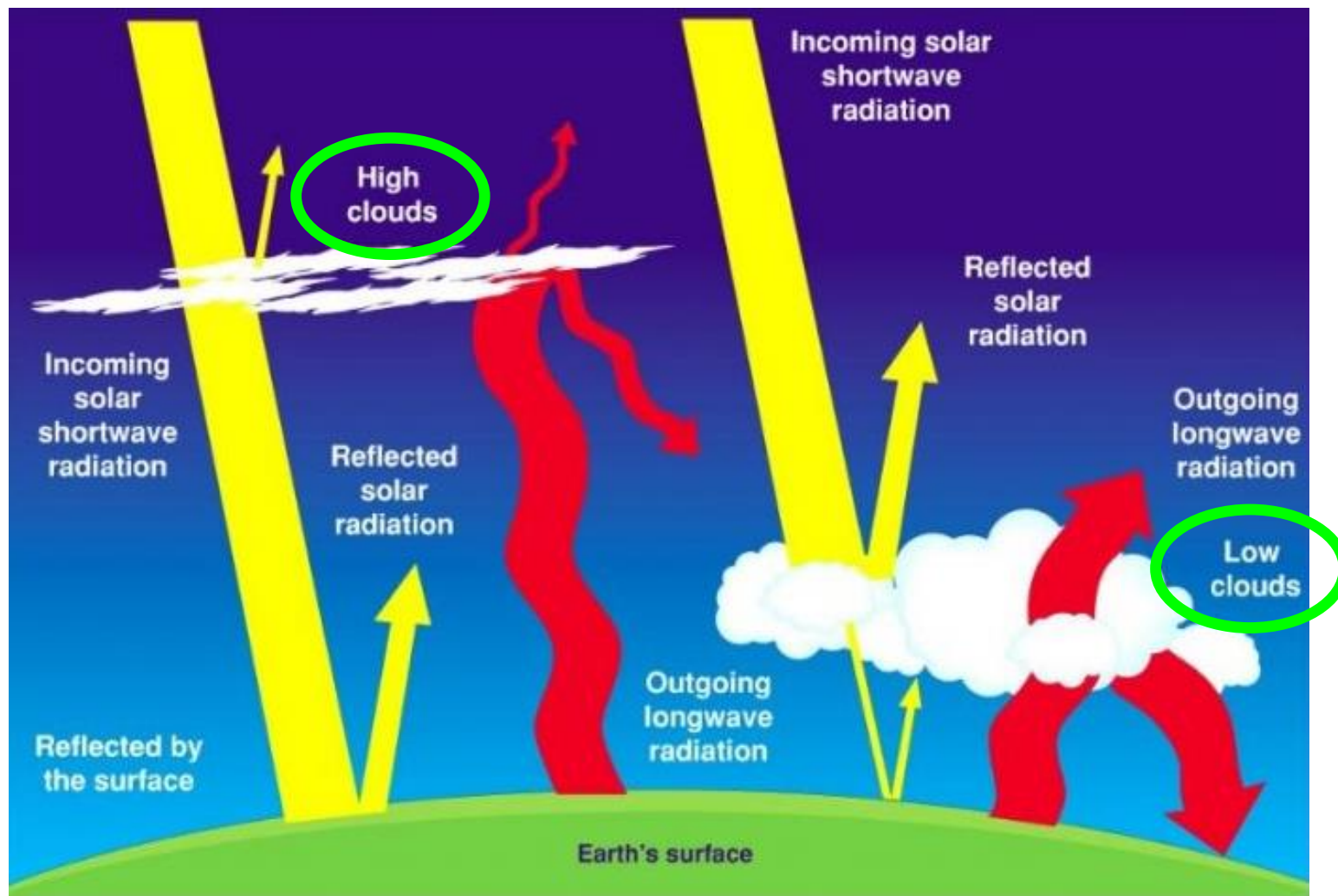
Righi et al. (*Environ. Sci. Tech.*, 2011)
Righi et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2013)
Righi et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2015)
Righi et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2016)



What's next?



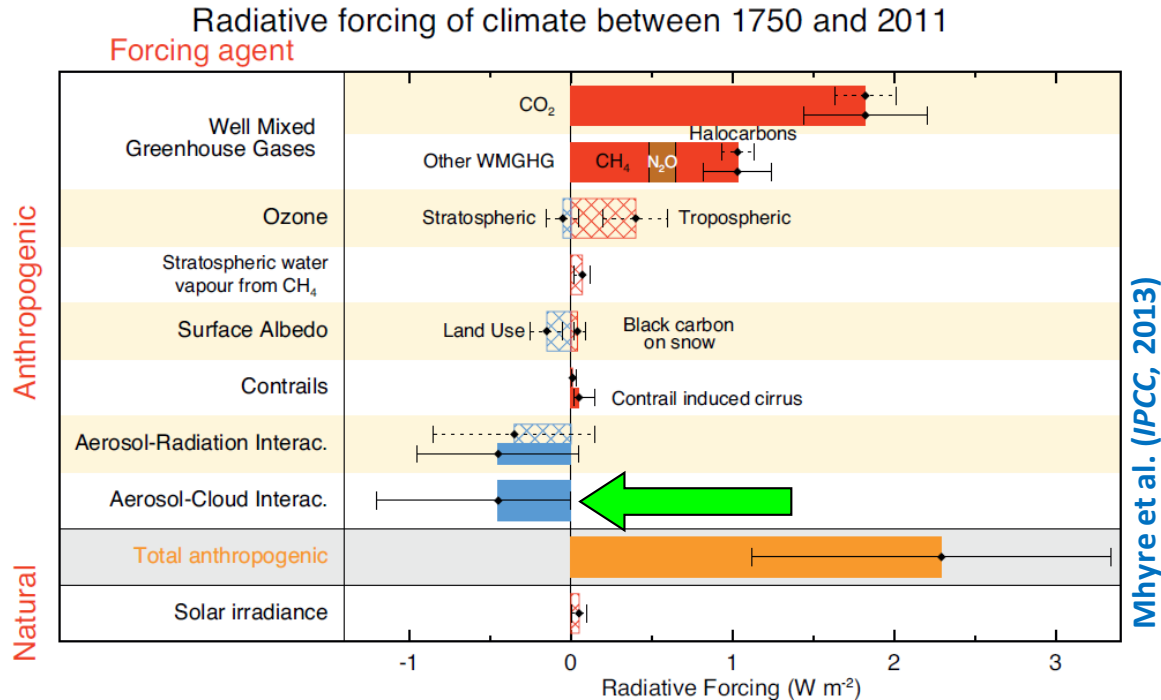
Rolle von Eiswolken?



Quelle: NASA



Rolle von Eiswolken?



- ❄ Eisbildung in der Atmosphäre beeinflusst die mikrophysikalischen und optischen Eigenschaften von **Wolken**, die **Niederschlagsbildung** sowie die **Strahlungsbilanz**
- ❄ Aerosolinduzierte **Eisbildung** ist ein komplexer Prozess, der noch unzureichend verstanden ist
- ❄ Quantifizierungen der resultierenden **Klimaeffekte** sind noch sehr unsicher
- ❄ Aerosoleffekte auf Eis- und Mischphasenwolken sind im **IPCC AR5** größtenteils unberücksichtigt aber können potenziell wichtig sein.

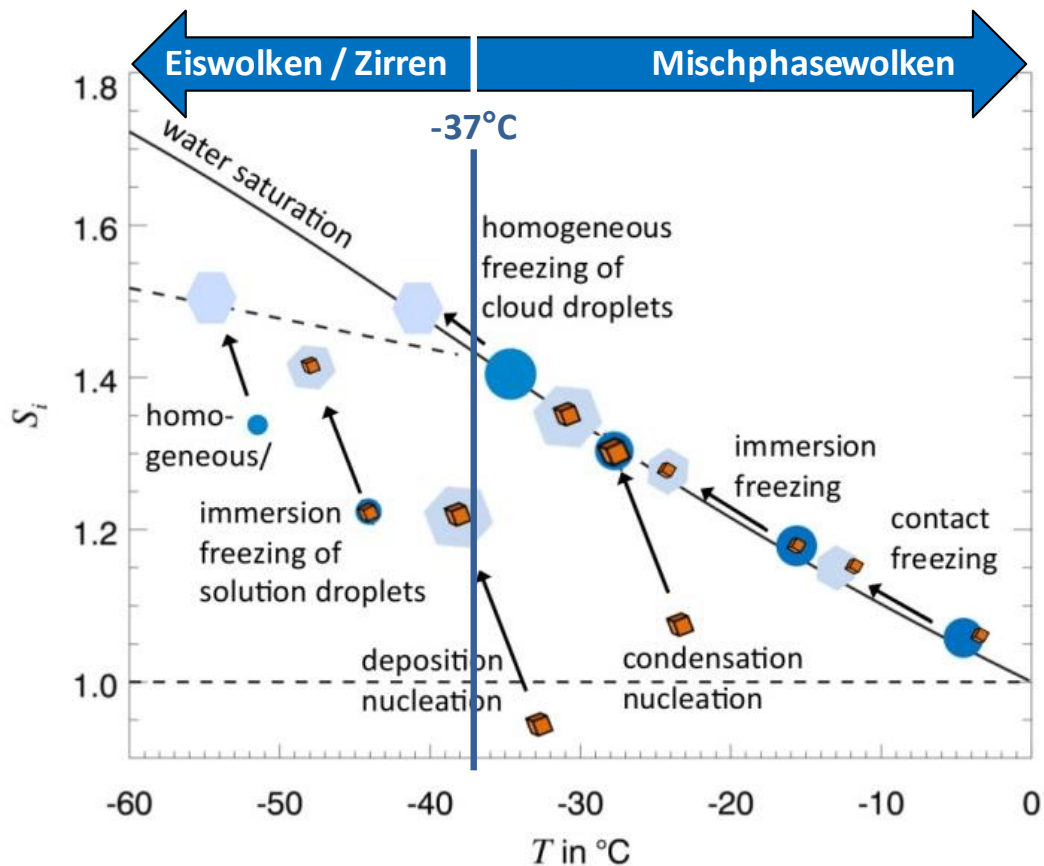


Klimawirkung der Eiswolken

Study	Model	IN types	Selected result	IN effects	Global RF [W/m ²]
Liu et al. (JGR, 2009)	NCAR-CAM3	soot	effects of anthrop. soot	increases in N(ice), IWC, cloud cover	[0.1 , 0.6]
Penner et al. (ACP, 2009)	Offline calculations	soot	total soot effect	changes in N(ice), sign variable	[-0.4 , -0.3]
Hendricks et al. (JGR, 2011)	ECHAM4	mineral dust, soot	total soot + dust effect	reductions in N(ice), IWC, water vapour	< 0.1 (noise level)
Gettelman et al. (JGR, 2012)	CAM5, ECHAM5/HAM	mineral dust, soot	effects of anthrop. soot	small	-0.06 (not significant)
Liu et al. (ACP, 2012)	CAM5	mineral dust	total dust effect	reductions in N(ice), IWC, water vapour	-0.4 ± 0.2
Zhou and Penner (JGR, 2014)	CAM5	mineral dust, soot	effects of aircraft soot	changes in N(ice), sign variable; reductions in IWC	[-0.35 , 0.09]
Penner et al. (JGR, 2018)	CAM5.3	mineral dust, soot	effects of aircraft and anthrop. soot		-0.35 ± 0.143 -0.2 ± 0.06



Eisbildungsprozesse in der Troposphäre



Hoose und Möhler (*Atmos. Chem. Phys.*, 2012)

Homogeneous freezing of cloud droplets or supercooled liquid solution aerosol

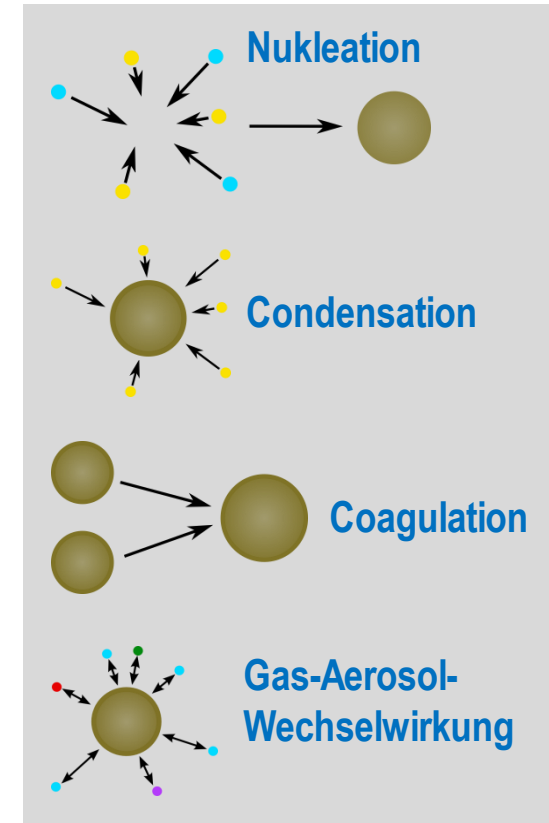
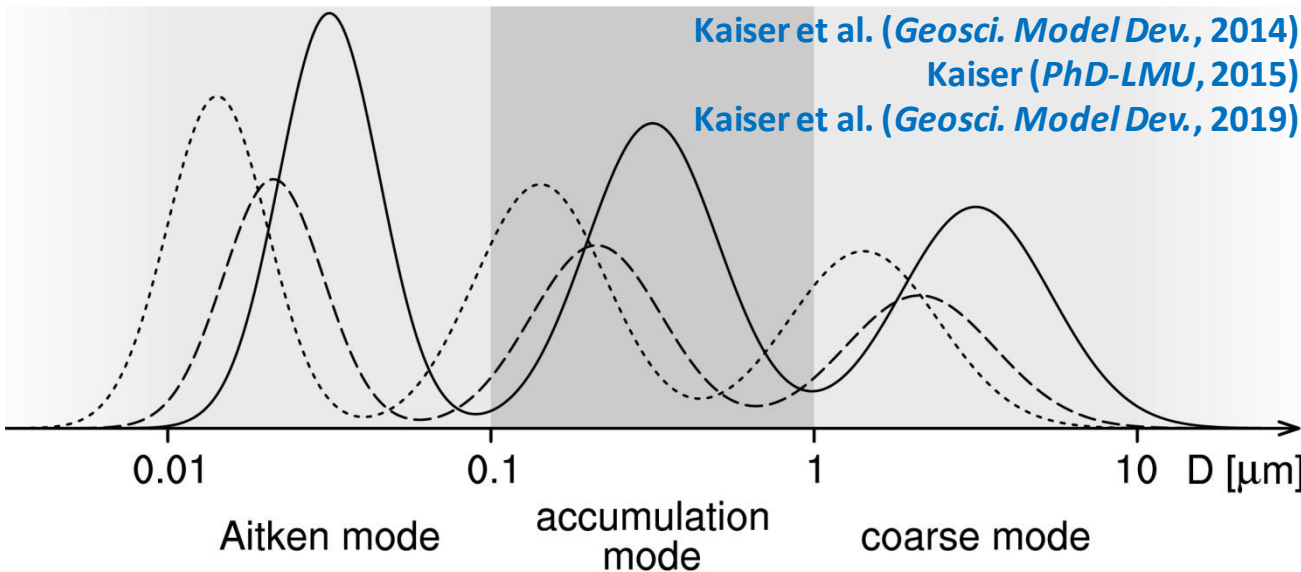
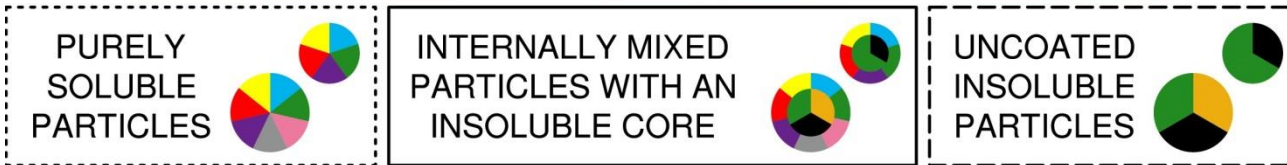
Heterogeneous freezing

- ❄ **Contact freezing** occurs when a solid particle collides with a supercooled liquid droplet resulting in ice nucleation
- ❄ **Immersion freezing** occurs when ice nucleates on a solid particle immersed within a supercooled liquid droplet
- ❄ **Condensation nucleation** occurs when vapour condenses on a solid particles and then freezes
- ❄ **Deposition nucleation** occurs when vapour directly deposits onto a solid surface as ice



MADE ⇒ MADE3 Weiterentwicklung

SO₄ NH₄ NO₃ Na Cl POM BC DU H₂O

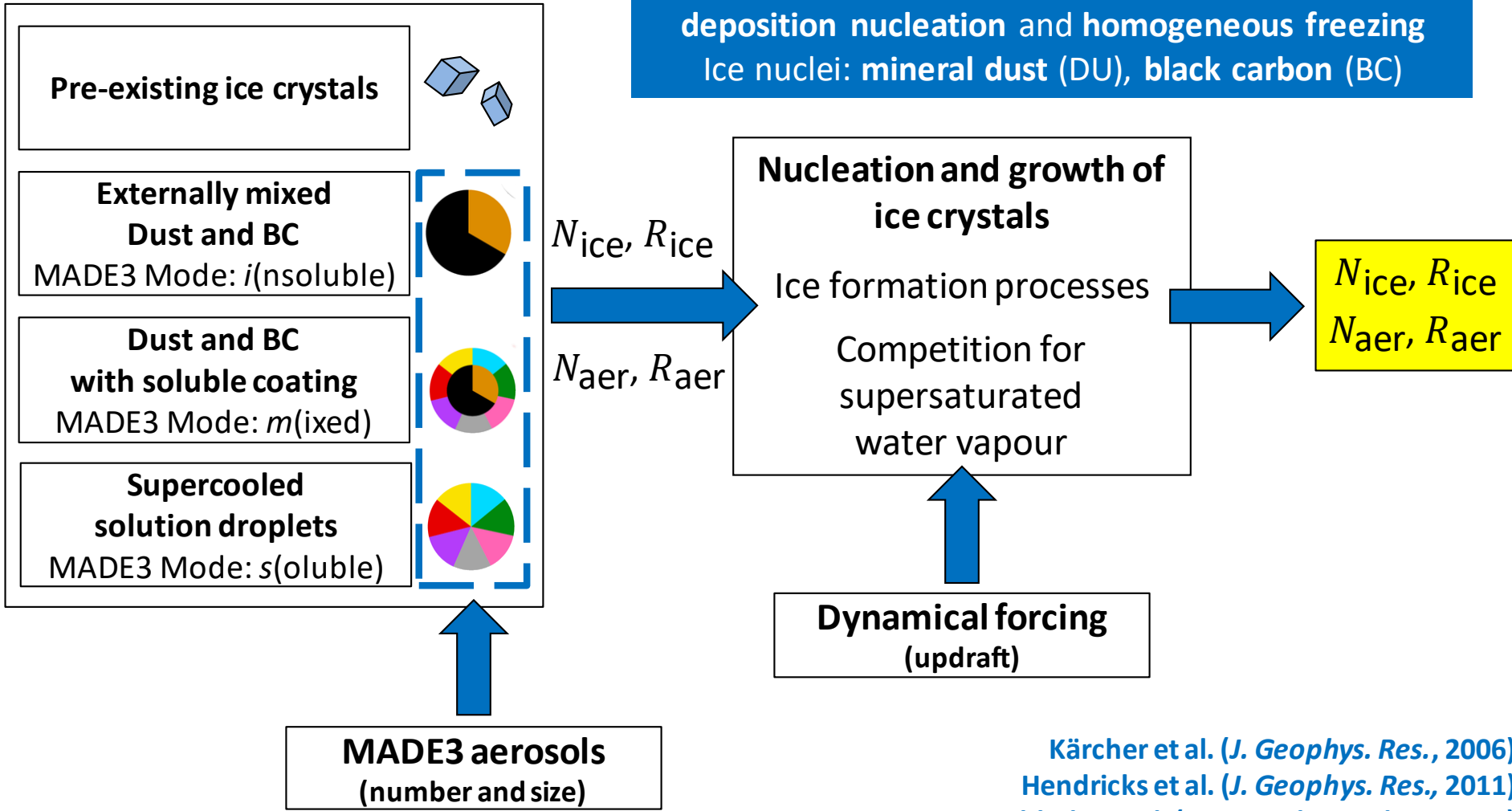


- ✓ Weiterentwicklung von **MADE** und **MADE-in**
- ✓ 2 zusätzliche **Mischungszustände**, Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Fein- und Grobmoden und der Gas-Aerosol-Wechselwirkung grober Partikel
- ✓ Umfangreiche **Evaluation** mit Daten aus Satelliten, Bodenstationen und Flugzugmessungen



Parametrisierung für Zirrusregime

Ice formation processes: immersion freezing, deposition nucleation and homogeneous freezing
 Ice nuclei: mineral dust (DU), black carbon (BC)

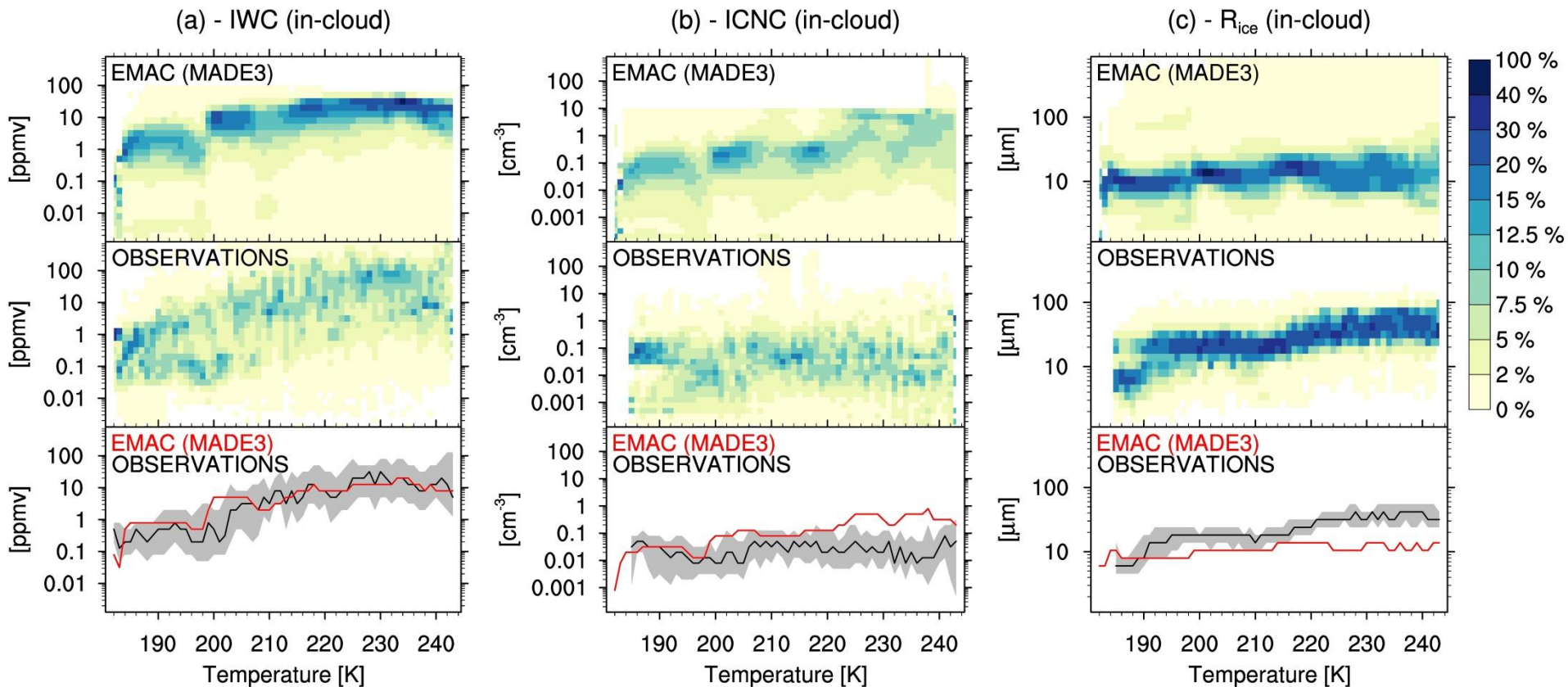


Kärcher et al. (*J. Geophys. Res.*, 2006)
 Hendricks et al. (*J. Geophys. Res.*, 2011)
 Kuebbeler et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2014)



Evaluierung von Zirren

Klimatologie 1999-2014 aus verschiedenen Flugzeugkampagnen
71 Flugstunden in Zirren (75°N – 25°S) – Krämer et al. (*Atmos. Chem. Phys.*, 2016)



Schlussfolgerungen – Teil 2

- ✓ Eine neue Version des mikrophysikalischen Aerosol-Submodells MADE (**MADE3**) wurde entwickelt und in das globale Klima-Chemie Modell **EMAC** implementiert
- ✓ Das neue Aerosol Submodell enthält eine deutlich verbesserte Darstellung von **Mischungszuständen** des Aerosols, die für die Simulation von potentiellen **Eiskernen** wichtig sind
- ✓ Ein neues 2-Momenten-**Wolkenschema**, das eine detaillierte Parametrisierung der aerosol-induzierter **Zirrusbildung** bietet, wurde mit MADE3 gekoppelt
- ✓ Die neue gekoppelte Modellkonfiguration EMAC-MADE3, einschließlich Aerosol-Wechselwirkungen mit **Eiswolken**, wurde getuned und **evaluiert** und ist nun **einsatzbereit**
- ✓ Ersten Pilotstudien zur Klimawirkung des Straßen- und des Luftverkehrs zeigen eine (potentielle) **signifikante Wirkung von Rußemissionen auf Zirren**, mit einem resultierenden Abkühlungseffekt
- ✓ Weitere Sensitivitätsexperimente werden derzeit durchgeführt, um diese Effekte besser zu charakterisieren

Kaiser et al. (*Geosci. Model Dev.*, 2014)

Kaiser et al. (*Geosci. Model Dev.*, 2019)

Righi et al. (*Geosci. Model Dev. Discuss.*, 2019)

Beer et al. (*in prep.*)





Danke!