

UBA Methodenkonvention 2.0
Umweltbundesamt FKZ 3708 14 101

„Schätzung Externer Umweltkosten und Vorschläge zur
Kosteninternalisierung in ausgewählten Politikfeldern“

Sachstandspapier zu Treibhausgase & Klimawandel

Version an UBA am 30.Mai 2012
Veronika Wille, Philipp Preiss, Rainer Friedrich

Inhaltsverzeichnis

Tabellen	3
Abbildungen	4
1 Klima und Treibhausgase	5
1.1 Einleitung	5
1.2 Methodik	6
1.2.1 Schadenskostenansatz	7
1.2.2 Vermeidungskostenansatz	8
1.2.3 Praktische Anwendung der Ansätze in der Forschung	11
1.2.4 Wesentliche subjektive Einflussgrößen	12
1.3 Modelle für die Berechnung der Schadenskosten	14
1.3.1 FUND	14
1.3.2 DICE	16
1.3.3 PAGE	16
1.3.4 Vergleich FUND, DICE und PAGE	16
1.4 Übersicht zu Annahmen und Ergebnissen relevanter Studien	18
1.4.1 Social Cost of Carbon	18
1.4.2 IMPACT	20
1.4.3 CASES	23
1.4.4 Meta-Analyse verschiedener Studien (Kuik et al., 2009)	23
1.4.5 La valeur tutélaire du carbone	24
1.4.6 DEFRA: Shadow price	25
1.4.7 Stern-Report	25
1.4.8 IPCC	26
1.4.9 NEEDS	26
1.4.10 Methodenkonvention (2007)	30
1.5 Empfehlung des IER für die Methodenkonvention	30
1.5.1 Vermeidungskosten	30
1.5.2 Schadenskosten	31
1.6 Externe Kosten von Treibhausgasemissionen des Flugverkehrs	31
1.6.1 Literaturübersicht über verschiedene relevante Studien	32
1.6.1.1 IPCC	32
1.6.1.2 TRL	32
1.6.1.3 INFRAS	32
1.6.1.4 HEATCO	33
1.6.1.5 CE Delft Studie zu externen Kosten der Luftfahrt	33
1.6.1.6 Lee et al.	35
1.6.2 Radiative Forcing Index vs. Emission Weighting Factor	36
1.7 Referenzen	39

Tabellen

Tabelle 1: Verweildauer und GWPs relativ zu CO ₂	5
Tabelle 2: Zusammenfassung der errechneten CO ₂ -Vermeidungskosten für die betrachteten Technologien und die zugehörigen Referenzsysteme	10
Tabelle 3: Effekte von Aversion gegenüber Ungleichheit wenn Einkommen (R)=10*Einkommen (A).....	13
Tabelle 4: Übersicht Parameter von FUND, DICE und PAGE2002	16
Tabelle 5: Klimaschäden in FUND, DICE und PAGE	17
Tabelle 6: Überblick aller Studien mit getroffenen Annahmen	18
Tabelle 7: Beispiel der Entwicklung von Schadenskosten von CO ₂ über die Zeit (Ergebnisse des Modells PAGE für die social costs of carbon (SCC) über die Zeit (in €/t CO ₂). Die Werte sind im Geldwert des Jahrs der Emission dargestellt.	19
Tabelle 8: Beispiel der Entwicklung von Schadenskosten von CH ₄ über die Zeit	19
Tabelle 9: Beispiel Schattenpreise der Studie in Übereinstimmung mit den in der Studie gemachten Empfehlungen	20
Tabelle 10: Übersicht von Schadenskosten des Klimawandels (in €/t CO ₂) nach mehreren Studien.....	20
Tabelle 11: Übersicht zu CO ₂ -Vermeidungskosten (in €/t CO ₂) nach mehreren Studien.....	21
Tabelle 12: In IMPACT empfohlene Werte für Kosten pro Tonne CO ₂	22
Tabelle 13: Mittlere Werte für Vermeidungskosten von Treibhausgasen (€/2005/t)	23
Tabelle 14: Nationale, regionale und globale Grenzvermeidungskosten in €/2005/t CO ₂	24
Tabelle 15: Empfohlener Wert der Kommission in €/tCO ₂	25
Tabelle 16: Schattenpreis in €/t CO _{2e}	25
Tabelle 17: Übersicht Ergebnisse FUND (Jahr der Emission) in €/2005/t CO ₂	26
Tabelle 18: Empfehlung Projekt NEEDS in €/2005/t CO ₂	30
Tabelle 19: Empfehlung Projekt NEEDS in €/2005/t CO ₂ – hoher Wert aktualisiert	30
Tabelle 20: Empfehlung Vermeidungskosten in €/2005/tCO ₂ – Interpolation mit 3 %	30
Tabelle 21: Vermeidungskosten in €/2005/t CO ₂ - Interpolation mit 5 %	31
Tabelle 22: Empfehlung Schadenskosten in €/2005/t CO ₂	31
Tabelle 23: Schadenskosten mit equity weighting (Europa) in €/2005/t CO ₂	31
Tabelle 24: Schadenskosten mit equity weighting (weltweit) in €/2005/t CO ₂	31
Tabelle 25: Globale durchschnittliche Störung der Strahlungsantriebsausgewogenheit, in W/m ² , differenziert für Situationen mit und ohne Kondensstreifen.....	34

Abbildungen

Abbildung 1: Globale Vermeidungskostenkurve über business-as-usual hinaus - 2030	10
Abbildung 2: Vermeidungskosten unterschiedlicher Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien	11
Abbildung 3: Nutzenfunktionen für verschiedene Werte von E	13
Abbildung 4: Übersicht von Schadenskosten des Klimawandels (in €/t CO ₂) nach mehreren Studien.....	21
Abbildung 5: Übersicht zu CO ₂ -Vermeidungskosten (in €/t CO ₂) nach mehreren Studien	22
Abbildung 6: Werte für Kosten pro Tonne CO ₂ empfohlen in IMPACT	23
Abbildung 7: Grenzvermeidungskosten als Funktion des Stabilisierungsziels (links 2025; rechts 2050) nach Kuik et al., 2009.....	24
Abbildung 8: Übersicht Ergebnisse FUND (Jahr der Emission) in €/t CO ₂	28
Abbildung 9: CO ₂ und nicht- CO ₂ -bezogene Klimaeinflüsse des Luftverkehrs.....	33
Abbildung 10: Komponenten des Strahlungsantriebs des Flugverkehrs	35

1 Klima und Treibhausgase

1.1 Einleitung

Spätestens seit dem 4. Sachstandsbericht des IPCC (2007b) ist deutlich geworden, dass man sich auf den Klimawandel und seine Auswirkungen einstellen muss. Ein zukünftiger Anstieg der Durchschnittstemperaturen wird dort als „praktisch sicher“ bezeichnet. Zudem wird mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % ein häufigeres Auftreten von extremen Wetterereignissen vorausgesagt, weitere teilweise gravierende Auswirkungen werden genannt. Bei politischen Entscheidungen sollten daher deren Auswirkungen auf den Klimawandel berücksichtigt werden. Schäden, die als Folge der Klimaänderung, welche durch die erhöhte Treibhausgas-Konzentration in der Atmosphäre hervorgerufen wird, auftreten, sollten abgeschätzt und mit monetären Werten bewertet werden.

Bei der Bewertung von Schadenskosten wird das Ergebnis meist in Kosten pro emittierter Tonne Schadstoff ausgedrückt. Zu den sogenannten Treibhausgasen zählen neben CO₂ noch weitere Gase, zum Beispiel Methan (CH₄), Lachgas (N₂O), Fluorkohlenwasserstoffe, Schwefelhexafluorid (SF₆) und Ozon (O₃).

Aufgrund menschlicher Aktivitäten sind die globalen atmosphärischen Konzentrationen von CO₂, CH₄ und N₂O markant angestiegen. CO₂ ist das wichtigste anthropogene Treibhausgas und seine Quelle ist primär der Verbrauch fossiler Brennstoffe und Landnutzungsänderungen, während CH₄ und N₂O primär aus der Landwirtschaft stammen.

Man gibt Treibhausgase oft in CO₂-Äquivalenten an (CO₂e). Mithilfe des Treibhauspotenzials (Global Warming Potential=GWP) gibt man das Verhältnis an, wie viel CO₂ eine Einheit eines Treibhausgases in seiner Wirkung entspricht. Tabelle 1 zeigt das für Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O). Das GWP hängt dabei aber vom betrachteten Zeitraum ab, da die Gase unterschiedliche Verweildauern in der Atmosphäre haben. Für einen Zeithorizont von 100 Jahren verursacht also zum Beispiel 1 Tonne CH₄ soviel Treibhauseffekt wie 25 Tonnen CO₂.

Tabelle 1: Verweildauer und GWPs relativ zu CO₂

THG	chemische Formel	Verweildauer (in Jahren)	GWP (100 Jahre)
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	100	1
Methan	CH ₄	12	25
Lachgas	N ₂ O	114	298

Quelle: IPCC, 2007b und http://cdiac.ornl.gov/pns/current_ghg.html

Überdies wird derzeit daran gearbeitet, auch für SO₂, BC (black carbon), OC (organic carbon); VOC (volatile organic compounds) und CO das global warming potential zu bestimmen. Sobald hier abgesicherte Werte vorliegen, können auch Emissionen dieser Stoffe mit bewertet werden.

Im Folgenden werden die Schadenskategorien aufgezählt, die näherungsweise quantifiziert und dann auch monetär bewertet werden können.

Aufgrund des globalen Temperaturanstiegs kommt es zu einem **Anstieg des Meeresspiegels** der zu Landverlusten oder zusätzlichen Kosten beim Küstenschutz führt. Solche Schutzmaßnahmen sind relativ gut bekannt und werden in den meisten Modellen zur Schadenskostenberechnung berücksichtigt. Es gibt aber auch schwieriger zu quantifizierende Effekte, wie eine höhere Wahrscheinlichkeit von Sturmfluten, der Verlust küstennaher Ökosysteme oder verstärkte Migrationsbewegungen der Bevölkerung kleiner Inseln und tiefliegender Küstengebiete, die oft nicht berücksichtigt werden.

Auch auf die **Nahrungsmittelproduktion und die Landwirtschaft** wirkt sich der Klimawandel aus. Dies ist regional sehr unterschiedlich und wird durch die Temperatur, den Niederschlag, den CO₂-Düngeffekt und sozio-ökonomische Rahmenbedingungen wie den Marktzugang bestimmt. In mittleren Breiten beispielsweise kann eine moderate Temperaturzunahme die landwirtschaftlichen Erträge steigern, während in den Tropen eine weitere Erwärmung zu Einbußen führt. Diese Zusammenhänge sind meist in ‚integrated assessment‘-Studien enthalten. Das häufigere Auftreten von Extremwetterereignissen wird die Nahrungsmittelproduktion weiter beeinträchtigen, z. B. durch die Vernichtung von Ernten durch Wirbelstürme oder durch eine Zunahme von Schädlingen. Die meisten Studien berücksichtigen den Zusammenhang zwischen der Nahrungsmittelproduktion und Extremwetterereignissen wie heftigen Niederschlägen nicht, so dass die Schäden hier eher unterschätzt werden.

Eine weitere betrachtete Kategorie sind direkte und indirekte **Gesundheitsschäden**. So kann es durch extreme Wetterereignisse zum Beispiel verstärkt zu Herz-Kreislauferkrankungen oder Asthma kommen. Auch wetterbedingte Katastrophen wie Überschwemmungen oder Erdbeben beeinträchtigen die Gesundheit, weil sie einerseits zu Unfällen und andererseits zu Wasserverunreinigungen führen können. In Studien bisher kaum quantifiziert sind indirekte Gesundheitsschäden, die durch Infektionskrankheiten entstehen, die durch Vektoren (z. B. Mücken, Zecken, Fliegen) übertragen werden, wie beispielsweise Malaria, Dengue-Fieber oder Hirnhautentzündung.

Eine Schadenskategorie, für deren Bewertung nur eher rudimentäre Ansätze vorhanden sind, sind **Ökosysteme und biologische Vielfalt**. Sie können durch die Änderung des Klimas irreversible Schäden erleiden, weil es bei der Anpassungsfähigkeit der Arten Grenzen gibt. Dabei darf man nicht vergessen, dass auch die menschliche Gesellschaft direkt und indirekt von den Gütern und Dienstleistungen der Biosphäre und ihrer Ökosysteme abhängt.

Die voraussichtliche Zunahme von **extremen Wetterereignissen** wie Hitzewellen, Dürren und Stürmen führt zu regional unterschiedlichen Schäden, weil diese von lokalen Gegebenheiten und Anpassungsmechanismen abhängen. So werden z. B. materielle Schäden bei steigendem Wohlstand steigen, aber die Anzahl der Todesfälle dürfte zurückgehen. Die Auswirkungen von Extremwetterereignissen werden bei der Schadensberechnung bisher kaum berücksichtigt, sind allerdings bei einem der dem im Folgenden verwendeten Modelle, nämlich FUND, enthalten (siehe Kapitel 1.3.1).

Eine Kategorie, die nicht zu berechnen ist, sind **singuläre nicht lineare Ereignisse**, wie z. B. der Zusammenbruch oder die Abschwächung der thermohalinen Zirkulation. Die Auswirkungen eines solchen Systemumschwungs könnten so plötzlich und verheerend sein, dass der Schaden sehr groß und eine Anpassung fast unmöglich ist (Krewitt und Schlomann, 2006).

1.2 Methodik

Die Monetarisierung der Schäden sollte in erster Linie auf der Basis der Abschätzung der Schadenskosten erfolgen (siehe hierzu die Erläuterungen in UBA 2007, Kapitel 3 und Kapitel 5.3). Dies erfordert jedoch, dass man die durch den Klimawandel folgenden Schäden weitgehend abschätzen kann. Soweit dies als nicht gegeben angesehen wird, kann man auch hilfsweise auf die Schätzung von Vermeidungskosten zurückgreifen. Dabei werden Grenzvermeidungskosten geschätzt, die ausdrücken, wie viel die letzte vermiedene Tonne CO₂ kostet, die notwendig ist, um ein bestehendes Reduktionsziel zu erreichen. Beide Ansätze, der Schadenskostenansatz und der Vermeidungskostenansatz, werden im Folgenden beschrieben.

1.2.1 Schadenskostenansatz

Der Schadenskostenansatz modelliert die physischen Auswirkungen des Klimawandels (z. B. Gesundheitsschäden), bewertet die Schäden und kombiniert dies ggf. mit Schätzungen weiterer Maßnahmen, die zur Reduzierung der Schäden durchgeführt werden, z. B. für Air Condition (siehe auch z. B. Watkiss, 2005b und Abschnitt 1.3 zu den Modellen). So könnte man die Kosten des Meeresspiegelanstiegs aus den Kapitalkosten des Küstenschutzes, dem ökonomischen Wert des Landes und der verlorenen Infrastruktur bei nicht geschützten Küstenabschnitten zusammensetzen. Ein weiteres Beispiel ist der Einfluss auf die Landwirtschaft, den man als Kosten oder Nutzen für die Produzenten und Konsumenten ausdrücken kann (z. B. Ernteauffälle) oder auch Schätzungen zur Änderung des Wasserabflusses, den man in Schätzungen zu Flutschäden bemessen könnte. Schwieriger gestaltet sich die Monetarisierung nicht am Markt gehandelter Auswirkungen, wie zum Beispiel Effekte auf Ökosysteme oder die menschliche Gesundheit.

Zu dieser Bewertungstheorie und ihrer Anwendung gibt es eine breite und anerkannte Literatur, wie etwa Studien, die den monetären Wert von erhöhten Mortalitätsrisiken, Ökosystemen, Lebensqualität usw. behandeln. Trotzdem ist eine ökonomische Bewertung, gerade im Bereich des Klimawandels nicht unumstritten. Da wären zuerst einmal die allgemeinen Unsicherheiten über die physikalischen Auswirkungen des Klimawandels. So werden einige Auswirkungen ziemlich sicher eintreten und sind durch detaillierte Modelle belegt, während andere mögliche Auswirkungen, wie die Zunahme von Überschwemmungen, Orkane mit einer höheren Energiedichte oder dramatischere nicht-lineare Effekte, wie das Verlangsamen oder sogar ein Stoppen des Golfstroms oft nicht mit einbezogen werden, weil man zu wenig Informationen über die Beziehung zwischen der globalen Erwärmung und den eben genannten Effekten hat. Nebeneffekte, wie gesellschaftlich mögliche Schäden (z. B. regionale Konflikte), sind noch schwieriger zu bewerten.

Vorhandene Schadenskostenabschätzungen sind sehr unterschiedlich, weil es unterschiedliche Annahmen bezüglich Gerechtigkeit und Wahrscheinlichkeiten gibt. In Bezug auf die Gerechtigkeit muss sowohl intergenerationale, wie auch intragenerationale Gerechtigkeit berücksichtigt werden. Neben der Bewertung der physikalischen Auswirkungen und der Frage, welche davon bei der Bewertung berücksichtigt werden, sind es folgende Schlüsselfaktoren, die die unterschiedlichen Schadenskostenabschätzungen der Studien ausmachen:

- die verwendete Diskontrate,
- der Ansatz, welche Gewichtung in verschiedenen Regionen verwendet wird (genannt equity weighting) und
- der berücksichtigte Zeithorizont.

Der Vorteil der Verwendung des Schadenskostenansatzes ist, dass ergebnisoffen der Schaden quantifiziert wird. Wenn diese Schätzung eine vertretbare und erfassbare Unsicherheitsbandbreite aufweist, können die Ergebnisse direkt in einer Kosten-Nutzen Abwägung verwendet werden.

Im Falle der Modellierung der Folgen von Treibhausgasemissionen ist dies jedoch aus folgenden Gründen nicht gewährleistet:

- Schäden entstehen großteils weit in der Zukunft,
- es gibt Schadenskategorien die zwar nur eine geringe Wahrscheinlichkeit, jedoch ein großes potentiell Schaden ausmaß aufzeigen.

Da die quantifizierbaren Schadenskosten relativ niedrig erscheinen werden aus Gründen des Vorsorgeprinzips zusätzlich alternative Bewertungsmethoden geprüft. Wie in UBA 2007, Kapitel 3.4.2. beschrieben, kann man daher auf den Standard-Preis-Ansatz zurückgreifen, um die „Vermeidungskosten“ zur Erreichung eines bestimmten, idealer Weise gesellschaftlich

legitimierten Zieles zu quantifizieren. Das Vorgehen wird im nächsten Kapitel genauer beschrieben.

1.2.2 Vermeidungskostenansatz

Eine alternative Methode zur Schätzung der externen Kosten von Treibhausgasemissionen ist der Vermeidungskostenansatz. Man umgeht die Unsicherheiten der Bewertung der Schäden, indem man die Grenzkosten zur Vermeidung von CO₂-Emissionen zur Erreichung eines bestimmten Zieles abschätzt. Der Nachteil ist aber, dass man nicht beweisen kann, dass das Ziel bereits ausreichend die potentiellen Folgen eines Nichthandels reduziert, oder eventuell auch zu ambitioniert ist, d.h. im Sinne einer optimalen Ressourcenallokation zu viel Umweltschutz betrieben wird. Dies ist der Fall, wenn die potentiellen Schäden viel geringer sind, als die entstehenden Vermeidungskosten, und diese Mittel nicht mehr an einer anderen Stelle effizient verwendet werden können. Wenn man ein Ziel wählt, welches gesellschaftlich legitimiert und somit verpflichtend in Form eines Gesetzes vorliegt, kann man jedoch argumentieren, dass dies zumindest die Zahlungsbereitschaft der Gesellschaft zur Vermeidung von Schäden darstellt. Man nennt diese Kosten Vermeidungskosten, Verringerungskosten oder auch Minderungskosten.

Der Kostenkurvenansatz oder andere Modellierungsmethoden werden verwendet um die Kosten für die Zielerreichung eines spezifischen Ziels zu kalkulieren. Das Ziel kann für verschiedene räumliche Einheiten und Zeitspannen bestimmt werden, z. B. national, EU- oder weltweit.

Um marginal externe Kosten abzuschätzen muss man marginale, d.h. Grenzvermeidungskosten berechnen.

Der Vermeidungskostenansatz ist aus Sicht der Wohlfahrtsökonomie nicht die „first-best“-Lösung, aber unter der Annahme, dass das gewählte Reduktionsziel die Präferenzen der Menschen gut repräsentiert, ist der Ansatz theoretisch betrachtet korrekt. Unter dieser Annahme können die Grenzvermeidungskosten, die mit dem Reduktionsziel verbunden sind als „Willingness-to-pay“-Wert angesehen werden. Aus diesem Grund sollte der Vermeidungskostenansatz vorrangig in Kombination mit Reduktionszielen verwendet werden, die in bestehenden und bindenden Politiken oder Gesetzen niedergelegt sind. In Sensitivitätsrechnungen können auch die Vermeidungskosten anderer Ziele ermittelt werden, die zum Beispiel auf Expertenurteilen gründen aber noch nicht in die Politik eingeflossen sind. Auf jeden Fall sollten die bei der Schätzung zugrunde gelegten Ziele und deren Begründung offen gelegt werden.

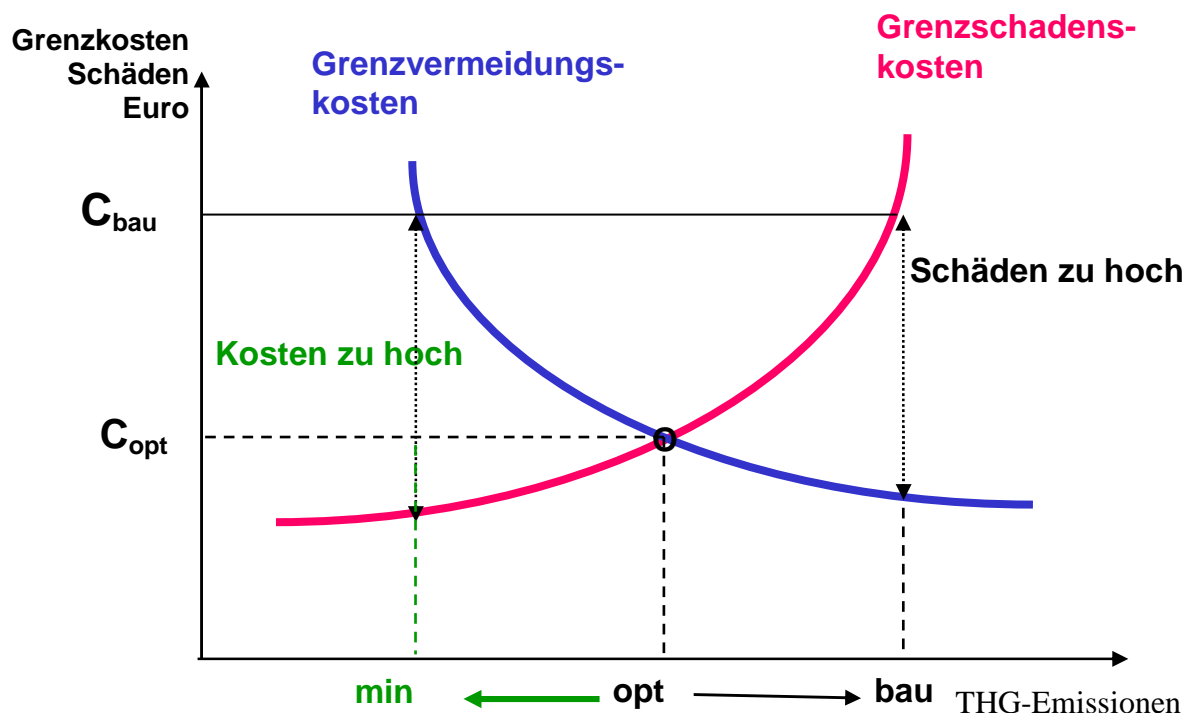
Für CO₂-Emissionen sind zunächst die Ziele des Kyoto-Protokolls in vielen Ländern als verbindlich akzeptiert. Als Ziel für 2020 hat die EU zudem eine Minderung von 20 % gegenüber 1990 als Ziel festgelegt und darüber hinaus eine Strategie entwickelt (das energy and climate package), welche zur konkreten Zielerreichung beiträgt. Langfristige darüber hinausgehende Ziele, z. B. das Ziel, die durchschnittliche Erwärmung der Erdoberfläche auf 2° zu begrenzen, sind zwar als Langfristziel in der EU und in Deutschland explizit akzeptiert; jedoch sind weder die dazu erforderliche internationale Zusammenarbeit und Aufgabenverteilung noch die Wege und Maßnahmen zur Erreichung dieses Ziels festgelegt; bevor dies nicht feststeht, kann noch nicht von einer endgültigen Entscheidung für dieses Ziel ausgegangen werden. Eine Ermittlung der Grenzvermeidungskosten zur Erreichung dieses Ziels ist für die Politikberatung dennoch ein wichtiger Input.

Wenn im Laufe der Zeit die Minderungsziele für CO₂ in einem oder mehreren Schritten angezogen werden, dann werden die Kosten von CO₂ in €/t gemäß dem Anstieg der Grenzvermeidungskosten zur Erreichung dieser strikteren Ziele ansteigen. Die Internalisierung dieser höheren externen Kosten wird so die Einführung von CO₂-Reduktionsmaßnahmen vorantreiben, die höhere Vermeidungskosten haben.

Im ersten Schritt genügt es, die Einführung von relativ billigen Maßnahmen zu fördern, während in späteren Schritten stärkere Preisanreize notwendig sind um die Anwendung von teureren Maßnahmen zu unterstützen. (CE Delft et al., 2008). Hierbei muss man unterscheiden zwischen den Vermeidungskosten in Bezug auf das Ziel und den Anreizen die die Politik setzen sollte. Die Vermeidungskosten beziehen sich auf die Kosten der Vermeidung der letzten Einheit (im Optimum). Es kann aber sinnvoll sein, die Preissignale sukzessive zu erhöhen, um die Gesamtkosten der Anpassung geringer zu halten.

Häufig wird auf die hohen marginalen Schadenskosten von Szenarien ohne Klimaschutzmaßnahmen hingewiesen und es wird gefordert, Maßnahmen mit Vermeidungskosten in entsprechender Höhe umzusetzen. Dies ist jedoch aus ökonomischer Sicht nicht richtig, da dies zu Minderungen und Kosten führen würde, die weit über das optimale Maß hinausgehen. Vielmehr muss man zur Entscheidungsfindung über Maßnahmen zur Verminderung des Klimawandels die Grenzschaadenskosten einer pareto-optimalen Lösung heranziehen und sie somit internalisieren. Zur Erreichung der Anpassung kann es aber auch sinnvoll sein, zunächst höhere Preissignale zu setzen (entsprechend den Schadenskosten) und diese dann sukzessive zu senken. Im Optimum entsprechen die Grenzschaadenskosten den Grenzvermeidungskosten. Wenn man Grenzschaadenskosten für die Entscheidungsfindung verwendet, die höher sind als jene im Optimum, dann würden die Emissionen weit unter dem Optimum liegen und somit wäre die Wohlfahrt kleiner.

Das wird im folgenden Schaubild genauer dargestellt:



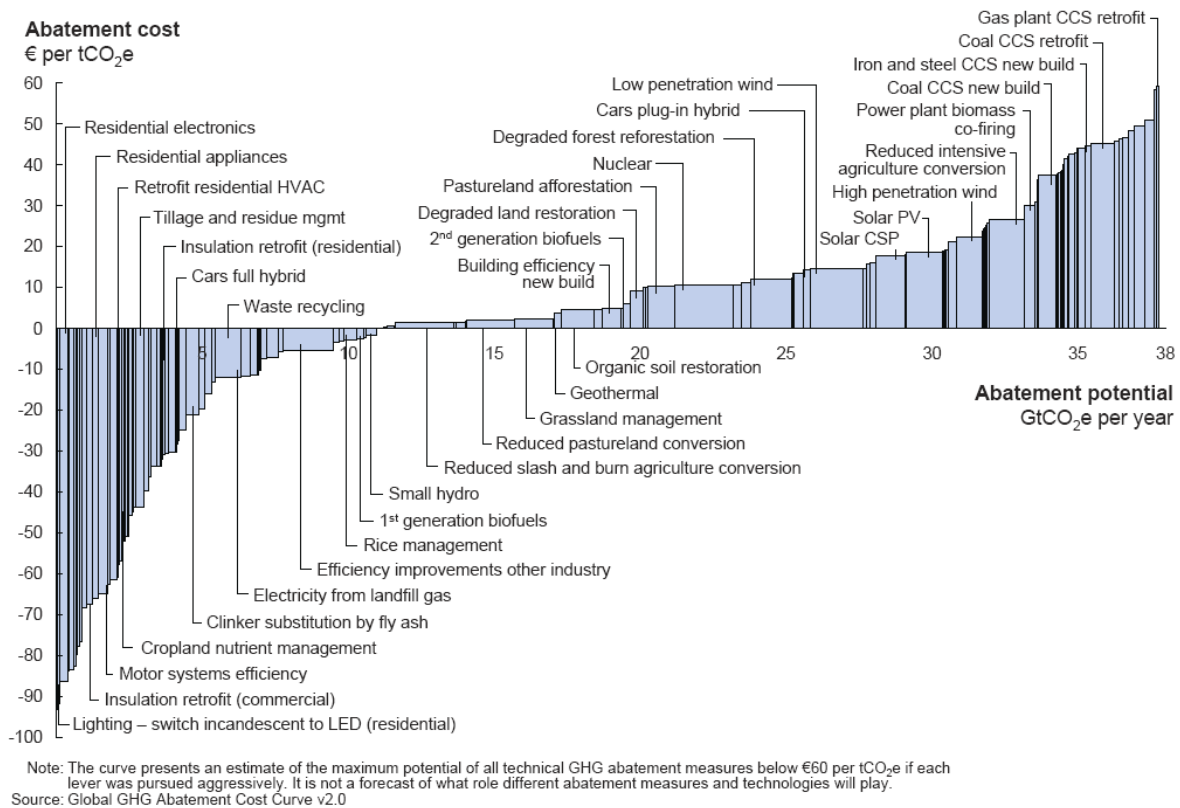
Die x-Achse spiegelt die ansteigenden kumulierten Treibhausgasemissionen wieder. Mit ansteigenden Emissionen werden auch die Grenzschaadenskosten ansteigen, was in der Kurve „Grenzschaadenskosten“ gezeigt wird. Wenn man beginnt Treibhausgasemissionen zu senken, beginnt man mit den effizientesten Maßnahmen. Mit sinkenden Emissionen müsste man vermehrt teurere Maßnahmen ergreifen und somit steigen die Grenzvermeidungskosten an (Kurve „Grenzvermeidungskosten“) (Friedrich, 2008).

Exkurs: Beispiele Vermeidungskosten

Vermeidungskostenkurve McKinsey:

Die Vermeidungskostenkurve von McKinsey (2009) zeigt, welche Maßnahmen am effizientesten sind um Treibhausgasemissionen zu senken.

Abbildung 1: Globale Vermeidungskostenkurve über business-as-usual hinaus - 2030
Global GHG abatement cost curve beyond business-as-usual – 2030



Quelle: McKinsey, 2009

Beispiel deutsche Vermeidungskosten Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. (2010):
Ein weiteres Beispiel zu Vermeidungskosten sind die Daten der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, die verschiedene CO₂-Vermeidungskosten für erneuerbare Energietechnologien auflisten.

In Tabelle 2 sind die durchschnittlichen errechneten CO₂-Vermeidungskosten bei einer ganzheitlichen Bewertung vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 2: Zusammenfassung der errechneten CO₂-Vermeidungskosten für die betrachteten Technologien und die zugehörigen Referenzsysteme

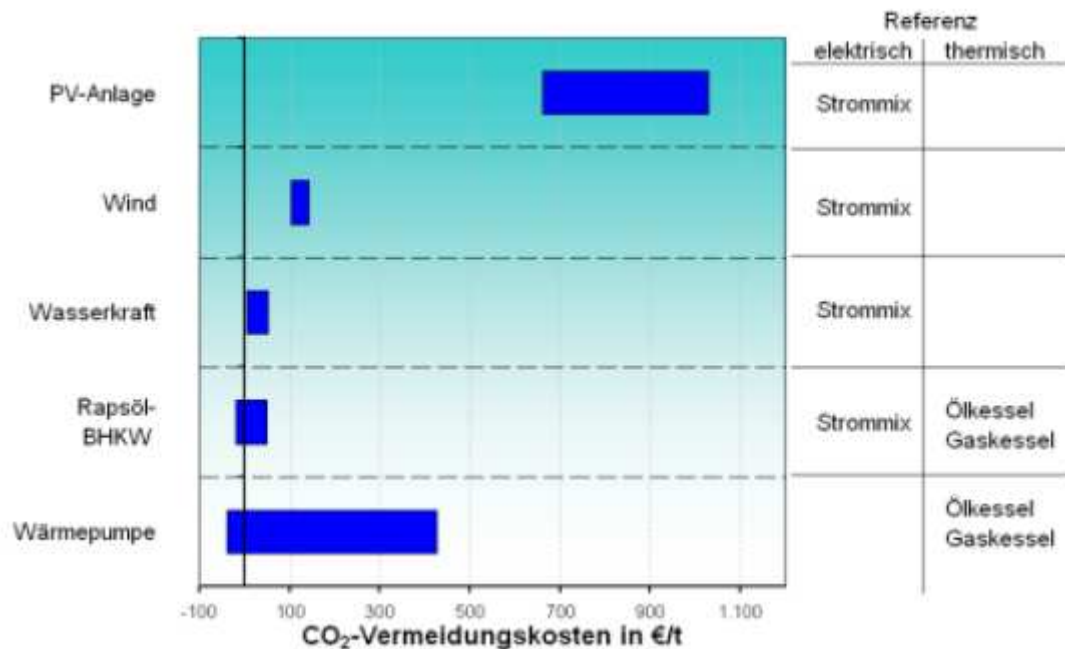
Technologie	Mittlere Vermeidungskosten in €/t	Referenz	
		thermisch	Elektrisch
Wasserkraft	30	Nicht erforderlich	Strommix Deutschland
Wind	124		
PV-Anlage	846		
Rapsöl-BHKW	-18	Ölkessel	Nicht erforderlich
	52	Gaskessel	
Wärmepumpe	-38	Ölkessel	
	430	Gaskessel	

Quelle: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2010

Abbildung 2 zeigt die Bandbreite der ermittelten CO₂-Vermeidungskosten in graphischer Darstellung sortiert nach den niedrigsten Vermeidungskosten. Bei den Stromerzeugungsanlagen entsteht die Bandbreite durch die unterschiedlichen

Investitionskosten der Anlagen. Bei den Wärmeerzeugern, bzw. dem BHKW sind v. a. die unterschiedlichen Referenzen dafür verantwortlich. So errechnen sich die negativen Vermeidungskosten durch den Vergleich mit dem Niedertemperaturölkessel, der bedingt durch den Brennstoff höhere Emissionen und gleichzeitig auch höhere Wärmegestehungskosten besitzt.

Abbildung 2: Vermeidungskosten unterschiedlicher Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien



Quelle: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2010

1.2.3 Praktische Anwendung der Ansätze in der Forschung

Die beiden oben beschriebenen Ansätze werden in sogenannten „Integrated Assessment“-Modellen angewandt. Integrated Assessment Modelle (IAM) versuchen die gesamte Wirkungskette des Klimawandels von den anthropogen verursachten Umwelteinwirkungen über atmosphärische und klimatische Veränderungen bis hin zu den Auswirkungen auf natürliche Systeme und Gesellschaft zu berücksichtigen. Mithilfe der IAM kann man also die monetären Auswirkungen des globalen Klimawandels beschreiben.

Das Ziel ist es, einen Ansatz zu schaffen, der physikalische und ökonomische Aspekte vereint, um den globalen Klimawandel besser bewerten zu können. IAM versuchen Information zu integrieren, indem sie mathematische Darstellungen von verschiedenen Komponenten umweltbezogener, ökonomischer und sozialer Systeme in einem Computermodell verbinden (Risbey et al. (1996, S. 369)). Dabei werden ökonomische Modelle durch stilisierte klimatische Wirkungsbeziehungen oder Untermodelle erweitert. IAM haben mehrere Aufgabenbereiche für sich in Anspruch genommen. Einmal wollen sie die möglichen Antworten auf den Klimawandel bewerten. Indem mögliche Folgen des Klimawandels mit Kosten und Auswirkungen beschrieben werden, können mit IAM die Kosten und Nutzen von Gegenmaßnahmen abgewogen werden. Ein weiterer Bereich ist die Strukturierung des Wissens. Durch Integration von Wissen aus verschiedenen Wissensgebieten können sie einen Rahmen schaffen, der das gegenwärtige Wissen zum Klimawandel zusammenführt. So können Vorteile und auch Unsicherheiten identifiziert werden. Dazu kommt, dass sie helfen können das Klima mit anderen sozialen und ökonomischen Veränderungen in Zusammenhang zu bringen, die zeitgleich auftauchen. Außerdem können die IAM auch Forschungsinstrumente sein, die unabhängig von einer

direkten Bewertungsfunktion dazu dienen, das Basiswissen und Verständnis voranzubringen (Parson, Fisher-Vanden (1997, S. 593)).

Es lässt sich festhalten, dass die Aussagekraft der IAM zwar Grenzen hat, sie insgesamt gesehen aber ein nützliches Werkzeug darstellen. Aktuell sind sie der beste Weg um die aggregierten Kosten und Risiken des Klimawandels zu schätzen (Stern (2007, S. 145)).

Beispiele für IAM sind das FUND Modell (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution) von Richard Tol, das von Nordhaus geschaffene DICE-Modell (Dynamic Integrated Model of Climate and the Economy) und das Modell PAGE (Policy Analysis for the Greenhouse Effect) 2002 von Chris Hope; diese drei Modelle werden in Kapitel 1.3 näher beschrieben.

1.2.4 Wesentliche subjektive Einflussgrößen

Eine Schwierigkeit bei der Bewertung der Folgen des Klimawandels besteht darin, dass Emissionen zwar regional verursacht werden, die Folgen aber weltweit wirken.

So ist die Schätzung von monetären Werten pro Tonne Kohlenstoffdioxid stark davon abhängig, ob diese Werte an das Einkommensniveau angeglichen sind und ob sie, falls sie in der Zukunft liegen, abdiskontiert wurden. Die Werte hängen also von zahlreichen Annahmen und Werturteilen ab. Im Folgenden werden die Schlüsselfaktoren, die zu Unterschieden in den Schätzungen führen näher beschrieben.

Equity Weighting:

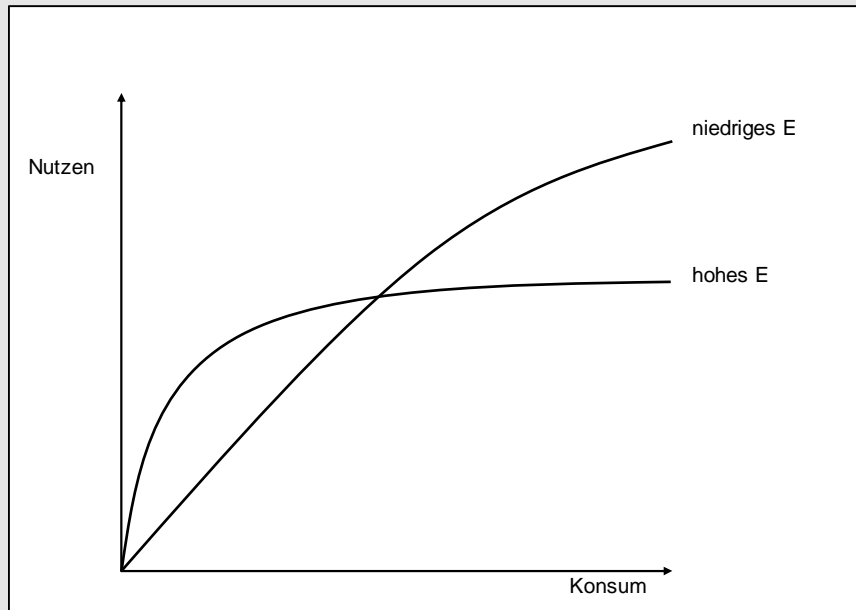
Nach bisherigen Erkenntnissen sind heute ärmere Länder wie Afrika, Südamerika und Indien stärker negativ vom Klimawandel betroffen als die reicheren Länder in den mittleren und nördlichen Breitengraden. Damit hat die Art und Weise, wie Schäden und Nutzen in verschiedenen Regionen zu einem globalen Wert aggregiert werden, einen entscheidenden Einfluss auf die Höhe der gesamten Schadenskosten. Inzwischen hat sich in der Praxis der ökonomischen Bewertung, der durch den globalen Klimawandel verursachten Schäden, durchgesetzt, dass die Unterschiede im Wohlstand der betroffenen Regionen durch Equity Weighting bei Sensitivitätsanalysen berücksichtigt werden. Dies beruht auf der Theorie, dass bei steigendem Einkommen der Grenznutzen abnimmt. Somit besitzt ein zusätzlicher Euro für eine arme Person einen höheren Wert als für eine reiche Person, umgekehrt ist ein Schaden von einem Euro bei einer armen Person als deutlich gravierender zu bewerten als bei einer reichen Person. Anschaulich wird dies bei folgender Überlegung: durch den Klimawandel wird ein angenommener Schaden von 1 € verursacht – unabhängig von der Region. Tritt dieser Schaden in einem ärmeren Land auf, welches ein durchschnittliches Einkommen von 100 € pro Kopf aufweist, so beträgt der Schaden $1/100$ des pro Kopf Einkommens und man müsste dieser Höhe entsprechend eine Kompensation vornehmen bzw. die Zahlungsbereitschaft zur Schadensvermeidung liegt bei bis zu 1 €. Tritt der Schaden in einem reichen Land mit einem durchschnittlichen Einkommen von 5000 € auf, dann beträgt der Schaden $1/5000$ des pro Kopf Einkommens. Auch hier müsste man den Schaden mit 1 € kompensieren. Im Verhältnis zum Einkommen ist der Schaden aber im reichen Land weniger gravierend. Um nun zu verdeutlichen, wie schwer der Schaden in der ärmeren Region wiegt wendet man Equity Weighting an und zeigt, dass der Schaden von 1 € in der ärmeren Region 50mal schwerer wiegt als in der reicheren Region – $1/100$ des Einkommens in der reichen Region beträgt 50 €. Gibt man nun den gewichteten Schaden von 50 € an, wird deutlich, dass man mithilfe des „Equity Weighting“ (EW) die unterschiedliche Gewichtung von Schäden in verschiedenen Regionen berücksichtigen kann.

Equity Weighting kann die Schadenskosten des Klimawandels um einen Faktor von bis zu 10 vergrößern, was Watkiss et al. (2005) mit Hilfe von FUND und Sensitivitätsrechnungen zeigten.

Exkurs: Equity Weighting

Unter utilitaristischen¹ Rahmenbedingungen ist der Nutzen jeder Person gleich wichtig. Es gibt also keine Gewichtung von Nutzen. Allerdings ist in der Wirtschaftstheorie die Annahme vorherrschend dass es einen abnehmenden Grenznutzen des Konsums gibt. Konkret heißt dass, dass eine reiche Person aus einem Euro weniger Nutzen hat als eine arme Person. Der Nutzen steigt also mit dem Konsum, aber mit einer sinkenden Rate. Abbildung 3 verdeutlicht diesen Zusammenhang für verschiedene angenommene Werte von E, der Elastizität des Grenznutzens:

Abbildung 3: Nutzenfunktionen für verschiedene Werte von E



Je höher E ist, desto schneller fällt der Grenznutzen mit zunehmendem Reichtum. Ein hoher Wert von E bedeutet, dass eine starke Aversion gegenüber Ungleichheit vorherrscht, weil reiche Menschen aus zusätzlichem Konsum weniger zusätzlichen Nutzen ziehen.

Der Einfluss von verschiedenen Werten für E wird deutlich, wenn man zwei Länder, eines reich (R) und eines arm (A) vergleicht. Angenommen R hat das 10fache Pro Kopf-Einkommen von A. Dann kann man den Wert eines marginalen Euros für R relativ gesehen zum Wert eines marginalen Euros für A berechnen. Für $E=0$ (kein Equity Weighting), ist ein Euro für R genau gleich viel Wert wie für A. Für $E=1$ (in der Literatur verwendeter Wert für Großbritannien) gilt, dass eine Gabe von 10 Cent an A denselben Nutzenanstieg zur Folge hätte, wie die Gabe von einem Euro an R.

Tabelle 3: Effekte von Aversion gegenüber Ungleichheit wenn Einkommen (R)=10*Einkommen (A)

E	0	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	4
Verlust für R als Bruchteil des Nutzens von A	1	0.31	0.16	0.1	0.06	0.03	0.01	0

Obwohl ein Utilitarist nicht den Nutzen gewichtet, würde er Verbrauchsverläufe wegen des abnehmenden Grenznutzens gewichten.

In der Literatur zur Bewertung von Klimaschäden wird oft das durchschnittliche Welteinkommen als Bezugspunkt verwendet. Dies ist angemessen, wenn die gewichteten

¹ Die utilitaristische Ethik legt fest, dass die Wohlfahrt jeder Person in jedem Land gleich gewichtet wird. Der Nutzen eines Ghanaers (reich oder arm) wird gleich bewertet wie der Nutzen eines deutschen Bürgers (reich oder arm).

Schäden (equity weighted) dann mit Vermeidungskosten verglichen werden, die mit demselben Bezugspunkt gewichtet wurden (Hepburn, 2005).

Die Gewichtung wird durch verschiedene Größen beeinflusst. Zum einen spielen die Annahmen zur Elastizität des marginalen Nutzens des Einkommens eine Rolle. Darüber hinaus ist auch die Verteilung der Schäden zwischen reichen und armen Ländern und die zeitliche Verteilung der Schäden von Bedeutung. Durch die zeitliche Komponente muss auch die Wahl der Diskontrate berücksichtigt werden, die im Folgenden näher erläutert wird.

Diskontrate:

Bei der Berechnung der Schadenskosten ist die Wahl der Diskontrate von hoher Bedeutung. Die zu verschiedenen Zeitpunkten anfallenden Kosten und Nutzen werden durch sie in einen Gegenwartswert umgerechnet und somit vergleichbar gemacht. Viele Integrated Assessment Modelle verwenden eine konstante Diskontrate oder eine konstante individuelle reine Zeitpräferenzrate (pure rate of time preference). Neuere Arbeiten schlagen bei sehr langen Zeiträumen eine abnehmende Diskontrate vor. Durch niedrige oder abnehmende Diskonraten entstehen tendenziell höhere Schadenskosten, weil zukünftige Schäden ein höheres Gewicht erhalten. Aufgrund des großen Einflusses der Diskontrate auf die Werte, werden Schadenskosten des Klimawandels oft für verschiedene angenommene Diskonraten angegeben.

Nach Watkiss et al. (2005) zeigen Sensitivitätsrechnungen mit dem Modell FUND, dass die in FUND berücksichtigten Schadenskosten bei einer puren Zeitpräferenzrate von 0 % um einen Faktor 5 höher liegen als bei einer Zeitpräferenzrate von 1 %. Bei einer höheren Zeitpräferenzrate und ohne Equity Weighting können die kurzfristigen positiven Effekte ein größeres Gewicht bekommen, so dass der aggregierte Nettowert der Schadenskosten negativ werden kann und somit einen Nutzen des Klimawandels ausweist. (DLR, 2006)

Unsicherheit:

Schätzungen der Grenzschaen von Treibhausgasen sind mit vielen Unsicherheiten behaftet. Gründe sind die Annahmen zur sozioökonomischen Entwicklung, unvollständiges Wissen über physikalische Prozesse in der Atmosphäre, Schwierigkeiten bei der Bemessung des Ausmaßes von Schäden und Einflüsse die nicht in Modelle einfließen. (Anthoff, 2007)

Bei einer Untersuchung über Risikoaversion und Zeitpräferenz im Zusammenhang mit Grenzschaenskosten von Kohlenstoff von Anthoff et al., 2009 zeigte sich in den Ergebnissen, dass die angenommene Rate der Risikoaversion genauso wichtig ist, wie die angenommene Zeitpräferenz. Die Schätzungen der Grenzschaenskosten können negativ sein (was einen sozialen Nutzen bedeutet), aber auch die positiven Schätzungen können um einen Faktor bis zu sechs Größenordnungen auseinander liegen, was sowohl auf der Rate der Risikoaversion als auch auf der angenommenen Zeitpräferenzrate beruht.

1.3 Modelle für die Berechnung der Schadenskosten

Wie bereits oben beschrieben verwendet man „Integrated Assessment“ - Modelle (IAM) zur Abschätzung von Schadenskosten. Drei bekannte und anerkannte Modelle werden hier näher beschrieben.

1.3.1 FUND

Das Modell FUND² (Climate Framework for Uncertainty, Negotiation and Distribution), entwickelt von Richard Tol, besteht aus einer Reihe von exogenen Szenarien und endogenen Störungen. Dabei differenziert das Modell zwischen 16 verschiedenen Regionen, der

² Nähere Informationen und Publikationen zum Modell unter www.fund-model.org

Zeithorizont beginnt 1950 und verläuft in Einjahresschritten bis 2300. Eine Annahme des Modells ist, dass das Vorjahr die Auswirkungen des Klimawandels im Folgejahr beeinflusst. Somit können auch Anpassungsmaßnahmen berücksichtigt werden. Der Zeitraum von 1950-1990 dient der Kalibrierung des Modells, während der Zeitraum von 1990-2000 auf Beobachtungen basiert. Die Klimaszenarien von 2010-2100 beruhen auf dem EMF14 standardisierten Szenario, welches zwischen den IPCC-Szenarien IS92a und IS92f liegt. Das Bevölkerungswachstum, das Wirtschaftswachstum, autonome Verbesserungen der Energieeffizienz (AEEI), die Entkarbonisierung der Energienutzung (ACEI) und Landnutzungsänderungen bestimmen die Szenarien.

Verschiedene Ursachen für zusätzliche Todesfälle durch den Klimawandel werden berücksichtigt. Hierzu zählen:

- Hitzestress,
- Kältestress,
- Malaria und tropische Zyklonen.

Langfristig reduziert der Klimawandel das Wirtschaftswachstum, wobei dazu auch die Maßnahmen zur Minderung von Kohlenstoffdioxid beitragen.

Atmosphärische Konzentrationen von Kohlenstoffdioxid, Methan und Stickoxiden, die durchschnittliche globale Temperatur, der Einfluss von Minderungsmaßnahmen von Kohlenstoffdioxid auf das Wirtschaftswachstum und Emissionsentwicklung sowie Schäden und Bevölkerungsänderungen durch den Klimawandel sind endogene Einflüsse in FUND. Im Basisfall steigt die durchschnittliche globale Temperatur im Gleichgewicht um 2,5 °C, wobei eine Verdoppelung der Kohlenstoffdioxidäquivalente angenommen wird.

Die regionale Temperatur folgt aus der Multiplikation der globalen durchschnittlichen Temperatur mit einem festen Faktor der aus dem Mittelwert über 14 GCMs (Global Climate Models) gebildet wurde und der mit dem räumlichen Klimamuster übereinstimmt.

Das von Richard Tol entwickelte Klimaeinflussmodul, schließt die folgenden Kategorien ein:

- Landwirtschaft,
- Forstwirtschaft,
- Meeresspiegelanstieg,
- kardiovaskuläre und respiratorische Beschwerden im Zusammenhang mit Kälte- und Hitzestress,
- Malaria,
- Denguefieber,
- Bilharziose,
- Diarrhöe,
- Energieverbrauch,
- Wasserhaushalt und
- Einflüsse auf natürliche Ökosysteme.

Die Einflüsse des Klimawandels auf Küstenzonen, Forstwirtschaft, natürliche Ökosysteme, Wasserhaushalt, Diarrhöe, Malaria, Denguefieber und Bilharziose werden anhand einfacher Leistungsfunktionen modelliert. So sind die Einflüsse entweder negativ oder positiv und sie ändern ihr Vorzeichen nicht. Das Schadenspotential aufgrund des Klimawandels ändert sich mit dem Bevölkerungswachstum, Wirtschaftswachstum und technologischem Fortschritt. Es wird erwartet, dass manche Systeme anfälliger werden, wie zum Beispiel der Wasserhaushalt (mit einer steigenden Bevölkerung), die hitzebedingten Erkrankungen (mit Verstädterung) und Ökosysteme und Gesundheit (mit einem höheren Pro-Kopf-Einkommen). Bei anderen Systemen wird angenommen, dass sie weniger anfällig werden, wie der Energieverbrauch (mit technischem Fortschritt), die Landwirtschaft (mit Wirtschaftswachstum) und vektor- und wasserbezogene Erkrankungen (mit verbessertem Gesundheitswesen) (Anthoff, 2007).

1.3.2 DICE

Das Modell DICE (Dynamic Integrated model of Climate and the Economy) von William Nordhaus ist ein vereinfachtes Modell der Wirtschaft und des Klimas.

Es ist eine Variante von Ramseys Modell des optimalen Wachstums, allerdings hat es Erweiterungen in Bezug auf direkte Klimaschäden und Ressourcenverschiebungen aufgrund von Emissionsreduktionsmaßnahmen. DICE vereint Faktoren wie Wirtschaftswachstum, Kohlenstoffdioxidemissionen, den Kohlenstoffkreislauf, Klimawandel, Klimaschäden und Klimaschutzpolitik. Sein Ursprung ist die ökonomische Wachstumstheorie in welcher Volkswirtschaften in Kapital, Bildung und Technologien investieren. Nordhaus fügt hier noch das „Natur-/Umweltkapital“ hinzu. Parameter wie Bevölkerung, Rohstoffvorräte und technischer Fortschritt werden als gegeben angenommen. Endogene Variablen sind der globale Output und Kapitalstock, Kohlenstoffdioxidemissionen und –konzentrationen, globale Temperaturveränderungen und Klimaschäden (z. B. Landwirtschaft, Meeresspiegelanstieg, Gesundheit, Katastrophenschäden). Es findet eine Maximierung des diskontierten Gesamtnutzens des Pro-Kopf-Konsums statt. Dabei wird lediglich eine geografische Region und ein einziger aggregierter wirtschaftlicher Sektor verwendet.

Das Modell gibt, je nach untersuchter Politik, die politische Antwort in Form von Kohlenstoffsteuern oder Emissionsminderungen an. Trotz allgemein anerkannter Gleichungen bleiben viele Unsicherheiten. (Nordhaus, 2007)

1.3.3 PAGE

Das Modell PAGE (Policy Analysis for the Greenhouse Effect) 2002 enthält Gleichungen, die nachbilden, was im Folgenden beschrieben wird. Zunächst einmal die Entwicklung der Emissionen von drei primären Treibhausgasen (CO_2 , CH_4 und SF_6). Andere Treibhausgase wie N_2O werden als zeitvariierende Zusätze zum Hintergrundstrahlungseffekt modelliert. Zudem wird im Modell der Treibhauseffekt nachgebildet, indem die Konzentrationen von anthropogenen Treibhausgasen in der Atmosphäre und die daraus folgende Strahlungswärme modelliert wird. Auch der kühlende Effekt von Schwefelaerosolen sowie die direkten und indirekten Verminderungen der Strahlungswärme werden einzeln nachgebildet. PAGE2002 umfasst acht Regionen und durch Bildung der Differenz zwischen dem wärmenden Treibhauseffekt einerseits und dem regionalen kühlenden Effekt von Schwefelaerosolen andererseits werden regionale Temperatureffekte betrachtet. Die Einflüsse auf regionales Wirtschaftswachstum werden nach dem prozentualen Verlust des BIP in jeder Region bewertet. Auch Investitionen in Anpassungsmaßnahmen wie Dämme werden berücksichtigt. Ökonomische Effekte sind in sehr aggregierter Form enthalten. Es werden Klimaschäden z. B. folgender Sektoren betrachtet: Landwirtschaft, Energieverbrauch, Gesundheit und Klimakatastrophen (z. B. Abschmelzen des Westantarktischen Eisschildes). Eine komplette Auflistung aller Gleichungen und Standardeinstellungen von PAGE2002 kann in Hope (2006) nachgelesen werden.

1.3.4 Vergleich FUND, DICE und PAGE

Die drei oben beschriebenen IAMs sind die am weitesten verbreiteten. So werden sie zum Beispiel auch in der aktuellen Veröffentlichung des Committee on Health, Environmental, and Other External Costs and Benefits of Energy Production and Consumption des National Research Council der USA verwendet (National Academies of Science, 2010).

In Tabelle 4 werden die Eingangsparameter der drei Modelle gegenüber gestellt.

Tabelle 4: Übersicht Parameter von FUND, DICE und PAGE2002

	FUND	DICE	PAGE2002
Regionen	16	1	7
Zeithorizont	1950-2300 (Jahresschritte)	10-Jahresschritte	2000-2200 (verschiedene

			Jahresschritte)
Szenarien	EMF14 ³		SRES A2 ⁴
Exogen	Bevölkerungswachstum	Bevölkerung	
	Wirtschaftswachstum	Rohstoffvorräte	
	AEEI ⁵	technischer Fortschritt	
	ACEI ⁶		
	Landnutzungsänderungen		
Endogen	CO ₂ -Emissionen	globaler Output	technischer Fortschritt
	CH ₄ -Emissionen	Kapitalstock	
	NO _x -Emissionen	CO ₂ -Emissionen	
	Durchschnittstemperatur	CO ₂ -Konzentrationen	
	Minderungsmaßnahmen	Temperaturveränderungen	
	Emissionsentwicklung	Klimaschäden	
	Schäden		
	Bevölkerungsänderungen durch Klimawandel		

Durch die Aufzählung in der Tabelle wird deutlich, dass FUND das transparenteste der drei Modelle ist. Öffentlich zugänglich, das heißt frei im Internet verfügbar, sind FUND (www.fund-model.org) und DICE (<http://nordhaus.econ.yale.edu/DICE2007.htm>).

Die später im Dokument getroffenen Empfehlungen für Schadenskosten (s. u.) beruhen auf FUND, weil dieses Modell weltweit anerkannt ist und oft verwendet wird, so z. B. in den EU-Projekten „The economics of climate change adaptation in EU coastal areas“ von 2009, ENSEMBLES (ENSEMBLE-based Predictions of Climate Changes and their Impacts), ATLANTIS (Atlantic Sea Level Rise: Adaptation to Imaginable Worst Case Climate Change), NEEDS (New Energy Externalities Development for Sustainability), CIRCE (Climate change and impact research: the Mediterranean environment) usw..

Tabelle 5 dient der Verdeutlichung der enthaltenen Klimaschäden in den Modellen FUND, DICE und PAGE.

Tabelle 5: Klimaschäden in FUND, DICE und PAGE

FUND	DICE	PAGE
Landwirtschaft Forstwirtschaft Meeresspiegelanstieg kardiovaskuläre und respiratorische Beschwerden bei Kälte- und Hitzestress Malaria Denguefieber Bilharziose Diarrhöe Energieverbrauch Wasserhaushalt Ökosysteme	Zusammenhang Klima-Schäden: Schäden sind Funktion von Temperatur, Meeresspiegelanstieg und CO ₂ -Konzentrationen keine „Katastrophen“	Gesamtschaden ist die Summe der Schäden unterschiedlicher Sektoren. Schäden basieren auf Temperaturanstieg, nicht THG-Konzentration. Beeinhaltet: Risiken für Ökosysteme und extreme Klimaereignisse

³ Szenario des Energy Modeling Forum 14: Integrated Assessment of Climate Change.

⁴ Eines der Szenarien aus dem IPCC-Bericht: Special Report on Emission Scenarios (2000).

⁵ Autonomous Energy Efficiency Improvement

⁶ Autonomous Carbon Efficiency Improvement

1.4 Übersicht zu Annahmen und Ergebnissen relevanter Studien

In Kapitel 1.4 wird zunächst eine Übersicht zu anerkannten und relevanten Studien präsentiert. Daraus leitet sich am Ende eine konkrete Empfehlung, sozusagen als „Ergebnis“ der Überlegungen und betrachteten Studien ab.

Tabelle 6 listet die relevanten Studien auf. Die jeweiligen verwendeten Modelle und getroffenen Annahmen werden kurz beschrieben. Im Weiteren wird auf die jeweiligen Studien näher eingegangen.

Tabelle 6: Überblick aller Studien mit getroffenen Annahmen

Studie	verwendetes Modell	getroffene Annahmen
Social Cost of Carbon	PAGE	Szenario A2; SRTP ⁷ sinkend, entsprechend „Green book“ ⁸ ; equity weight =1
	FUND	nicht gesondert aufgeführt, Werte höher als die von PAGE
	Endergebnis ist Mischung aus SCC ⁹ und MAC ¹⁰	
IMPACT	Literaturstudie (u.a. mit FUND, PAGE, POLES, GEM E3)	kurzfristig empfohlene Werte (2010-2020) beruhen auf Vermeidungskosten nach dem EU Ziel -20 % bis -30 % bis 2020; langfristige Werte (2030-2050) basieren auf Schadenskosten
CASES	Meta-Analyse	Grenzvermeidungskosten zur Erreichung des Ziels 500ppm CO ₂ -Konzentration,
Kuik et al. 2009	Meta-Analyse (62 Studien)	Grenzvermeidungskosten (Kostenkurven in Abhängigkeit von CO ₂ -Stabilisierungszielen)
Quinet et al. 2008	verschiedene (eigenes (ähnlich DICE), POLES, IMACLIM, GEMINI-E3)	450 ppm CO ₂ e, Diskontierung mit 4 % nach 2030, bis 2030 progressive Entwicklung auf 100 €/t CO ₂ hin
DEFRA	Keine Angabe	550 ppm CO ₂ e, Schattenpreise
Stern Report	PAGE	450-550 ppm CO ₂ e, Grenzschaadenskosten, Kosten steigen in Zukunft an
IPCC	Keine Angabe	550 ppm CO ₂ e
NEEDS, Anthoff (2007)	FUND	EMF ¹¹ 14 Szenario, Diskontrate variabel, PRTP ¹² variabel, equity weighting variabel
NEEDS, EcoSenseWeb	FUND und Meta-Analyse	verschiedene Szenarien (2 °C-Ziel, Kyoto+, EMF14 ohne EW)

1.4.1 Social Cost of Carbon

Eine detaillierte Bewertung von Schadenskosten wurde im Projekt Social Cost of Carbon durch AEA Technology und das Stockholm Environment Institute im Auftrag von Defra UK durchgeführt (Watkiss (2005b)). Der Ausdruck Social Cost of Carbon (SCC) bezeichnet Schadenskosten (im Unterschied zu Vermeidungskosten (Marginal Avoidance Costs = MAC). In der Studie wurde eine große Zahl von existierenden Studien zu Schadenskostenschätzungen gesichtet und diese mit eigenen modellierten Ergebnissen

⁷ SRTP = Social Rate of Time Preference

⁸ Vgl. Green book (2003)

⁹ SCC = Social Cost of Carbon (Schadenskosten)

¹⁰ MAC = Marginal Abatement Cost (Vermeidungskosten)

¹¹ EMF = Energy Modelling Forum (<http://emf.stanford.edu/>)

¹² PRTP = Pure Rate of Time Preference (reine Zeitpräferenzrate)

verglichen. Ergebnisse dieser Studie, die mit dem Modell PAGE berechnet wurden, werden in Tabelle 7 und Tabelle 8 präsentiert. Nach Watkiss (2005b) steigen die SCC über die Zeit an¹³. Die ansteigenden SCC erklären sich durch:

- Die zwar endliche, aber lange Lebenszeit von Kohlenstoff in der Atmosphäre.
- Sinkende Diskontraten (soziale reine Zeitpräferenzraten) für zukünftige Schäden aufgrund von Unsicherheiten über die zukünftige ökonomische Entwicklung.
- Nicht-Linearität der Einflüsse von CO₂-Emissionen.

Tabelle 7: Beispiel der Entwicklung von Schadenskosten von CO₂ über die Zeit (Ergebnisse des Modells PAGE für die social costs of carbon (SCC) über die Zeit (in €/t CO₂). Die Werte sind im Geldwert des Jahrs der Emission¹⁴ dargestellt.

	SCC im Jahr der Emission (€/t CO ₂)		
	5 % ¹⁵	Mittelwert	95 %
2001	3,6	18,4	52
2010	4,8	24,4	63,6
2020	5,6	30,8	86
2040	10,8	50,8	129,6
2060	13,6	74,8	205,2

Basiert auf dem A2 Szenario, mit PPP Umtauschraten, Green book SRTP (Social Rate of Time Preference)¹⁶, equity weight Parameter von 1¹⁷. Die Ergebnisse des PAGE Modells beinhalten einige (aber nicht alle) großen Klimaereignisse. Nicht berücksichtigt sind soziale Effekte. Quelle: Watkiss, 2005b

Die sozialen Kosten von Methanemissionen wurden in diesem Projekt explizit, d.h. basierend auf dem Strahlungsantrieb berechnet und sind nicht das Produkt der Werte von CO₂ mit einem bestimmten GWP (Global Warming Potential – z. B. 25 für CH₄ IPCC 2007b). Die Kosten von CH₄ wachsen mit der Zeit schneller als die SCC Werte für CO₂, die oben abgebildet sind. Damit zeigt sich, dass eine einfache Multiplikation der Kosten von CO₂ mit dem GWP zunächst zu höheren und dann zu niedrigeren als den tatsächlichen Kosten von Methan führen würde.

Tabelle 8: Beispiel der Entwicklung von Schadenskosten von CH₄ über die Zeit

	SC im Jahr der Emission (€/t CH ₄)		
	5 %	Mittelwert	95 %
2001	59,45	281,30	768,50
2010	108,75	459,65	1220,90
2020	147,90	664,10	1769,00
2040	284,20	1334,00	3606,15
2060	437,90	2528,80	7335,55

¹³ N.B.: In der Originalquelle sind die Werte in £/tC dargestellt, werden aber der Verständlichkeit halber hier in Euro pro Tonne CO₂ dargestellt. Mit einem Umwandlungsfaktor von 1,45 €/£ entsprechen die Schadenskosten von 1 £ pro Tonne Kohlenstoff (£/t C) 0,4 € pro Tonne CO₂ (€/t CO₂).

¹⁴ Bei einer Diskontierung auf das Jahr der Emission bestimmt man den Nettowert des Jahrs der Emission.

¹⁵ Es wird hier die Spannweite zwischen 5 und 95 % angegeben. Unter der Spannweite versteht man die Länge des kleinsten Intervalls, das alle Daten enthält. Es wird berechnet indem man die kleinste Beobachtung (Stichprobenminimum) von der Größten (Stichprobenmaximum) abzieht. Im vorliegenden Fall werden die 5 % kleinsten und 5 % größten Werte der Stichprobe abgeschnitten und dann die Spannweite berechnet. Sie liegt 2001 dann zwischen 3,6-52 €/t CO₂.

¹⁶ Die SRTP liegt laut Green book (2003) in den ersten 30 Jahren bei 3,5 %, Jahr 31-75 bei 3 %, Jahr 76-125 bei 2,5 %, Jahr 126-200 bei 2 %, Jahr 201-300 bei 1,5 % und bei mehr als 300 Jahren bei 1 %.

¹⁷ Ein Parameter von 1 bedeutet, dass der Verlust von 1 € für jemandem mit einem Einkommen von 1.000 € zehn mal schlimmer gewertet wird als der Verlust von 1 € für jemanden mit einem Einkommen von 10.000 € pro Jahr.

Basiert auf dem Szenario A2, mit PPP Umtauschraten, Green book SRTP, equity weight Parameter von 1. Die Ergebnisse des PAGE Modells beinhalten einige (aber nicht alle) großen Klimaereignisse. Nicht berücksichtigt sind soziale Effekte. Quelle: Watkiss, 2005b

In Tabelle 9 beruhen die unteren Werte auf Schadenskosten, während die oberen Werte aus einem Vergleich von Schadenskosten und Vermeidungskostenkurven abgeleitet wurden.

Tabelle 9: Beispiel Schattenpreise der Studie in Übereinstimmung mit den in der Studie gemachten Empfehlungen

	untere Grenze	unterer Wert	zentraler Wert	oberer Wert	obere Grenze
2000	4	14	22	52	88
2010	4.8	16	26	64	104
2020	6	20	32	82	124
2030	8	26	40	104	148
2040	10	36	56	132	180
2050	12	52	84	168	220

Quelle: Watkiss, 2005b

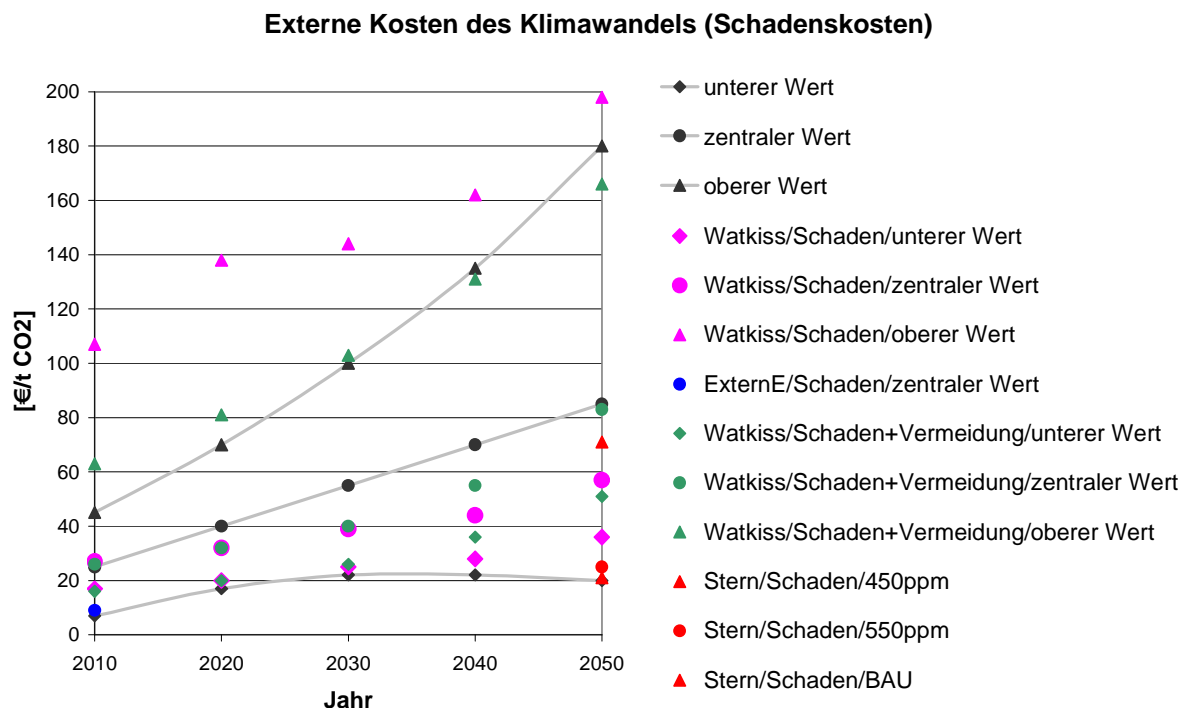
1.4.2 IMPACT

Die eben beschriebenen Ergebnisse fließen auch in die nun folgende Studie zu externen Kosten des Transports (CE Delft, 2008 (IMPACT)) ein. Tabelle 10 zeigt die Übersicht von IMPACT zu Schadenskosten des Klimawandels.

Tabelle 10: Übersicht von Schadenskosten des Klimawandels (in €/t CO₂) nach mehreren Studien

Quelle	Jahr der Anwendung	Schadenskosten (€/t CO ₂)			Kommentar
		Min	zentraler Wert	Max	
ExternE, 2005	2010		9		
Watkiss, 2005b	2000	14	22	87	Ergebnisse basieren nur auf Schadenskosten
	2010	17	27	107	
	2020	20	32	138	
	2030	25	39	144	
	2040	28	44	162	
	2050	36	57	198	
Watkiss, 2005b	2000	14	22	51	Ergebnisse basieren auf Vergleich von Schadens- und Vermeidungskosten
	2010	16	26	63	
	2020	20	32	81	
	2030	26	40	103	
	2040	36	55	131	
	2050	51	83	166	
Tol, 2005		-4	11	53	Basiert auf Studien mit PRTP = 1 %
Stern, 2006	2050		71		Business-as-usual Szenario
	2050		25		Stabilisierung bei 550 ppm
	2050		21		Stabilisierung bei 450 ppm
DLR, 2006		15	70	280	Basiert auf Downing, 2005

Abbildung 4: Übersicht von Schadenskosten des Klimawandels (in €/t CO₂) nach mehreren Studien



Die grauen Werte und Linien geben die von IMPACT empfohlenen Werte wieder (siehe unten Tabelle 12 und Abbildung 6).

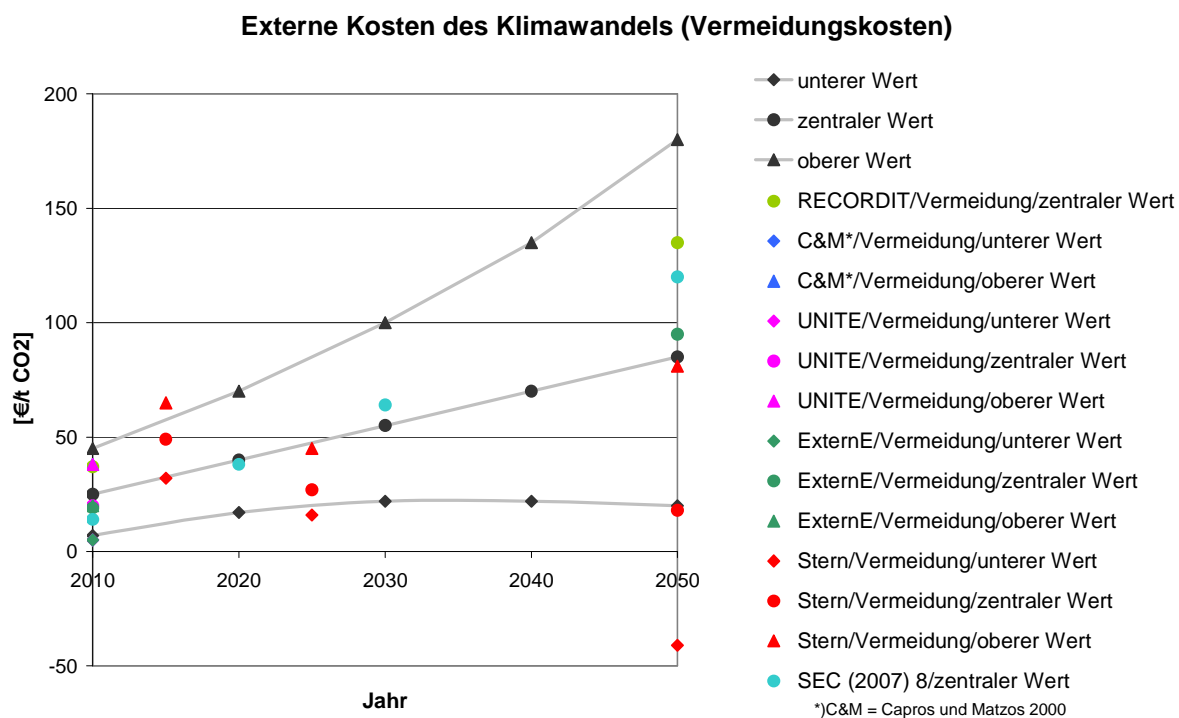
Auch eine Übersicht von Vermeidungskosten von CO₂ wurde in IMPACT erstellt.

Tabelle 11: Übersicht zu CO₂-Vermeidungskosten (in €/t CO₂) nach mehreren Studien

Quelle	Jahr der Anwendung	Vermeidungskosten (€/t CO ₂)			Bezug der Vermeidungskosten
		Min	zentraler Wert	Max	
RECORDIT, 2000/1	2010		37		Kyoto-Ziel
	2050		135		Langfristiges IPCC 50 % Reduktionsziel
Capros und Mantzos, 2000	2010	5		38	Kyoto-Ziel: unterer Wert basiert auf Handel außerhalb der EU, oberer Wert auf Situation ohne Handel außerhalb der EU
UNITE, 2003	2010	5	20	38	Basiert auf Capros und Mantzos, 2000
INFRAS, 2004	2010		20		Kyoto-Ziel
	2050		140		Langfristiges IPCC 50 % Reduktionsziel
ExternE, 2005	2010	5	19	20	Kyoto-Ziel
	2050		95		Stabilisierung bei 2 °C Temperaturanstieg
Stern, 2006	2015	32	49	65	Durchschnittliche Vermeidungskosten
	2025	16	27	45	
	2050	-41	18	81	
SEC, (2007)8	2010		14		Stabilisierung bei 2 °C Temperaturanstieg
	2020		38		Lineare Extrapolation
	2030		64		

	2050	120	basierend auf Daten von 2020-2030
--	------	-----	-----------------------------------

Abbildung 5: Übersicht zu CO₂-Vermeidungskosten (in €/t CO₂) nach mehreren Studien

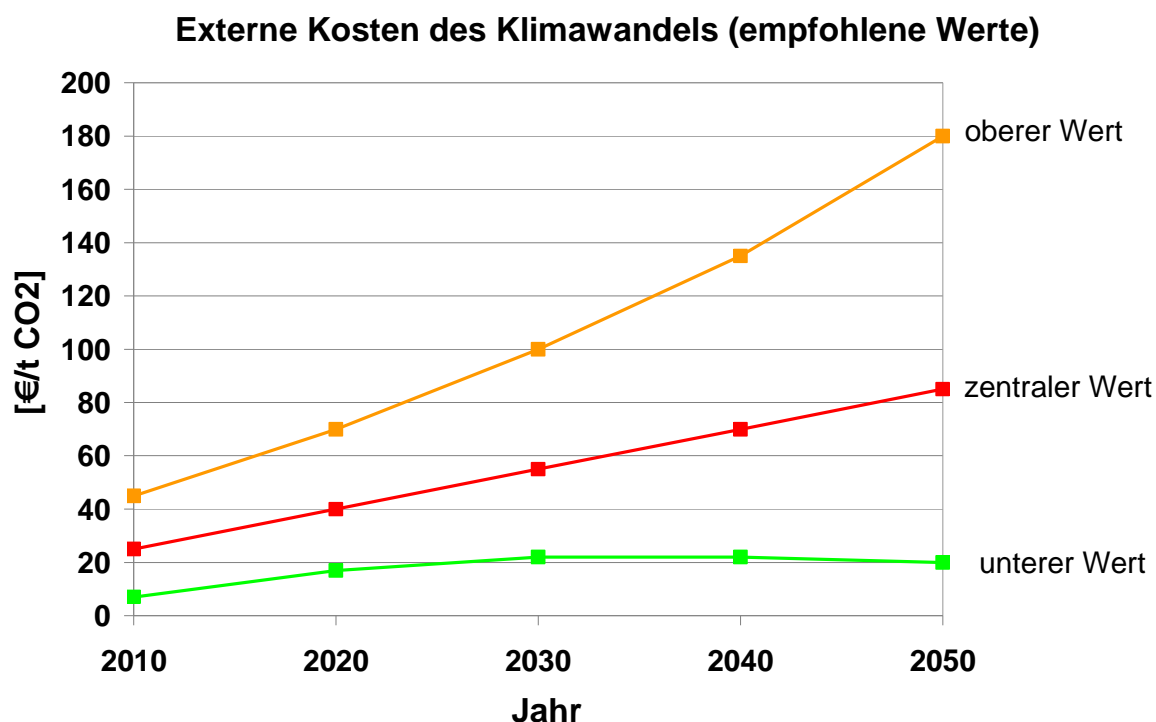


Schließlich folgen die von IMPACT empfohlenen Werte für die Kosten pro Tonne CO₂:

Tabelle 12: In IMPACT empfohlene Werte für Kosten pro Tonne CO₂

Jahr der Anwendung	Zentrale Werte (€/t CO ₂)		
	unterer Wert	zentraler Wert	oberer Wert
2010	7	25	45
2020	17	40	70
2030	22	55	100
2040	22	70	135
2050	20	85	180

Abbildung 6: Werte für Kosten pro Tonne CO₂ empfohlen in IMPACT



Die kurzfristigen Werte (2010 bis 2020) wurden auf Basis der Vermeidungskosten ausgewählt, weil hier die Ziele der Politik bekannt sind. So wurde 2010 das Kyoto-Protokoll berücksichtigt und 2020 die Ziele der Europäischen Kommission (20 % Minderung der Emissionen bis 2020).

Die langfristigen Werte (2030 bis 2050) basieren auf Schadenskosten, weil das Konzept der Schadenskosten dem der Vermeidungskosten vorgezogen wird und auf lange Sicht die Politikziele nicht so deutlich und bindend formuliert sind. Verbesserte Einblicke bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels (wie sie zum Beispiel in FUND modelliert sind) deuten an, dass die Schadenskosten höher sind, als bisher angenommen, weshalb neuere Studien höhere Schadenswerte verwenden.

1.4.3 CASES

Im Rahmen des Projektes CASES wurden von Kuik (2007) mit Hilfe einer Meta-Analyse von 26 verschiedenen Modellen in einem eigens geschaffenen Meta-Regressionsmodell¹⁸ Vermeidungskosten für ein Stabilisierungsziel bei 500ppm CO₂ ermittelt:

Tabelle 13: Mittlere Werte für Vermeidungskosten von Treibhausgasen (€₂₀₀₅/t)

	2010	2015	2020	2025	2030	2040	2050
CO ₂	19	19	19	23	30	46	61
CH ₄	399	399	399	475	636	958	1120
N ₂ O	5890	5890	5890	7006	9387	11768	16529

1.4.4 Meta-Analyse verschiedener Studien (Kuik et al., 2009)

In einer weiteren Studie von Kuik et al. (2009) wurden die Grenzvermeidungskosten von 62 Studien untersucht. Diese Studien haben die Grenzvermeidungskosten zur Erreichung verschiedener langfristiger Stabilisierungsziele untersucht.

¹⁸ In CASES wurde mit dem Regressionsmodell eine Meta-Funktion für Grenzvermeidungskosten geschätzt, die dann zur Berechnung der empfohlenen Werte verwendet wurde.

Für die Meta-Analyse wurden 62 Beobachtungen von Vermeidungskosten für 2025 und 2050 gesammelt. Diese Beobachtungen wurden von verschiedenen Dimensionen und Währungen auf €₂₀₀₅/t CO₂ normalisiert. Das durchschnittliche Stabilisierungsziel der Datenbasis liegt bei 611 ppm CO₂e und 17 Beobachtungen beinhalten technologischen Fortschritt. Der Meta-Analyse liegen in der Datenbasis 26 Modelle zugrunde. Durch die Analyse zeigt sich, dass das Stabilisierungsziel, wie zu erwarten, einen signifikant negativen Effekt auf die Grenzvermeidungskosten hat. Der Koeffizient liegt bei etwa -6,5. Das bedeutet, dass die Senkung des Ziels um 1 % (also ein strengeres Ziel) die Grenzvermeidungskosten um 6,5 % steigen lässt. Das zeigt sich in folgendem Beispiel: die durchschnittlichen Grenzvermeidungskosten 2025 für ein Stabilisierungsziel von 600ppm CO₂e lägen bei 25 €/t und würden auf 39 €/t ansteigen, wenn das Stabilisierungsziel um 8 % strenger bei 550ppm läge. Zusammenfassend lässt die Meta-Analyse den Schluss zu, dass die Unterschiede zwischen Grenzvermeidungskosten sich in einem gewissen Ausmaß durch die unterschiedlichen Stabilisierungsziele, die Zahl der betrachteten Regionen, den Energiequellen, der intertemporalen Optimierung und der Einbeziehung von nicht-CO₂-Gasen erklären lassen.

Abbildung 7: Grenzvermeidungskosten als Funktion des Stabilisierungsziels (links 2025; rechts 2050) nach Kuik et al., 2009

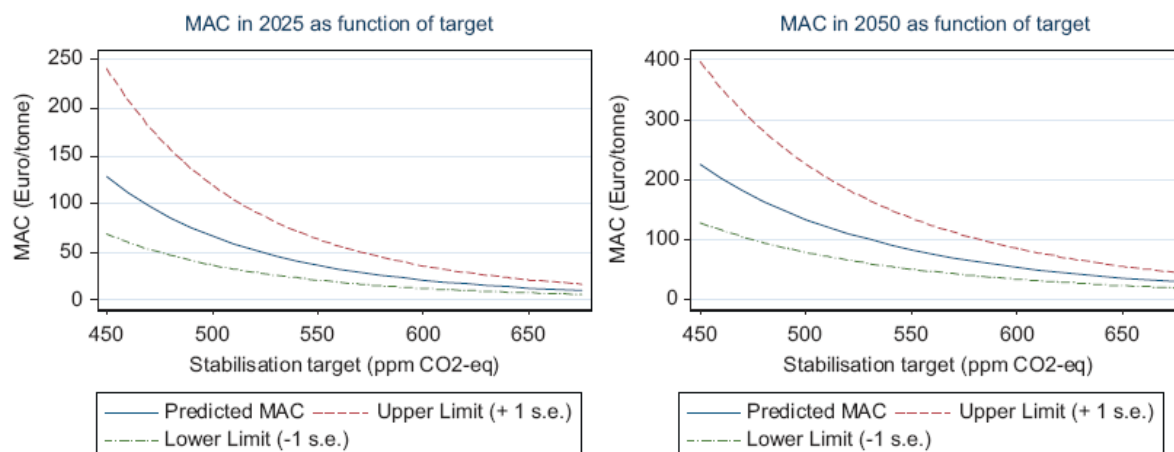


Abbildung 7 zeigt die ermittelten Grenzvermeidungskosten sowie das Konfidenzintervall für verschiedene Stabilisierungsziele zwischen 450 und 675 ppm CO₂e. Die Abbildung zeigt, dass die Grenzvermeidungskosten stark mit der Strenge des langfristigen Ziels ansteigen und dass die Unsicherheit der Prognose ansteigt, wenn das Ziel ambitionierter wird. Konkret sagt die Kurve aus: je strenger, also niedriger, das Stabilisierungsziel, desto höher sind die Grenzvermeidungskosten pro Tonne CO₂. Grenzvermeidungskosten mit dem strengen 450ppm-Ziel liegen 2025 bei 129 €/t CO₂e (mit der Spannweite 69-241 €) und 225 €/t CO₂e im Jahr 2050 (128-396 €).

Tabelle 14 zeigt weitere Grenzvermeidungskosten, und zwar für Großbritannien eine Minderung der Treibhausgasemissionen um 60 % bis 2050 und für EU27 für das Ziel einer Minderung der Treibhausgasemissionen um 20 % bis 2020.

Tabelle 14: Nationale, regionale und globale Grenzvermeidungskosten in €₂₀₀₅/t CO₂

	2020	2050	Quelle
UK	15-60	142-193	Watkiss, 2005b
EU27	23-93		Elzen et al., 2007

1.4.5 La valeur tutélaire du carbone

Die französische Regierung beauftragte 2008 das Centre d'analyse stratégique einen aktuellen Wert für eine Tonne Kohlenstoffdioxid zu ermitteln, der dann in die Berechnungen von

öffentlichen Investitionen einbezogen werden sollte (vgl. Quinet et al. 2009). Daraufhin wurde eine Expertenkommission (Industrie, Forschung und öffentliche Hand) gebildet und diese kam zu den im Folgenden beschriebenen Ergebnissen.

Zugrunde liegt den Ergebnissen das 2 °C-Ziel und damit eine Stabilisierung bei 450 ppm CO₂e. Dabei wurden die Ziele der EU (-20 % bis 2020 und -60-80 % bis 2050) berücksichtigt. Grundsätzlich nimmt die Expertenkommission 2030 einen Wert von 100 €/t CO₂ an. Dieser Wert beruht auf Berechnungen mit verschiedenen Modellen, wobei für ein weltweites Ziel mit 450 ppm CO₂e ein Wert von 86 € berechnet wurde. Allerdings wurde in der Studie im Szenario „Europe Unilatéral“¹⁹ ein Wert von 100 € ermittelt, der dann auch als Grundlage empfohlen wird.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden zwischen 2010 und 2030 zwei mögliche Szenarien in Betracht gezogen. Im ersten geht man davon aus, dass der Wert 2030 bei 100 € liegt und dann jeweils mit 4 % (Hotelling) diskontiert wird. Das Problem bei dieser Vorgehensweise ist, dass der Wert 2010 real bei 27 € liegt und bei einer Diskontierung ausgehend von 100 € 2030 mit 4 % 2010 bei 45 €. Mit der Annahme von 4 % Diskontierung liegt der Wert 2050 dann in einer Größenordnung von 200 €.

Im zweiten Szenario geht man davon aus, dass bei einem Wert von 100 € 2030 mit 5,8 % bis 2010 diskontiert wird, damit ergeben sich 2010 32 €. Nach 2030 wird mit 4 % diskontiert und so ergibt sich 2050 ein Wert in der Größenordnung um 200 €, wobei die Kommission für diesen Wert noch einen Bereich zwischen 150-350 € aufgrund von Unsicherheiten angibt.

Dieses zweite Szenario ist die Empfehlung der Studie.

Tabelle 15: Empfohlener Wert der Kommission in €/tCO₂

	2010	2020	2030	2050
empfohlener Wert	32	56	100	200 (150-350)
Wert von Boiteaux (aktualisiert)	32	42	57	103

1.4.6 DEFRA: Shadow price

Das Department for Environment, Food and Rural Affairs von Großbritannien veröffentlichte 2007 einen Leitfaden zur Verwendung von SCC und Schattenpreisen bei ökonomischen Bewertungen im Vereinigten Königreich (Defra, 2007a und b). Bei den empfohlenen Werten in Tabelle 16 liegt ein Stabilisierungsziel von 550 ppm CO₂e zugrunde.

Tabelle 16: Schattenpreis in €/t CO₂e

Jahr	2010	2020	2025	2030	2040	2050
Schattenpreis Kohlenstoffdioxid	39.5	48.1	53.2	58.6	71.5	87.1

Quelle: DEFRA, 2007b

Der Leitfaden empfiehlt, die Schattenpreise jeweils an das Anfangsjahr der Politikmaßnahme anzupassen um Inflation zu berücksichtigen. Beginnt die Maßnahme also 2011, so wird empfohlen den Wert von 2010 mit 2 % pro Jahr zu steigern. Anschließend sollen alle Werte des Schattenpreises nochmals mit 2 % pro Jahr ansteigen um die ansteigenden Schäden zu berücksichtigen.

1.4.7 Stern-Report

Der Stern-Report ist ein Bericht, der von Nicholas Stern (2007) im Auftrag der britischen Regierung erstellt wurde. Ziel der Untersuchung war eine Abschätzung der wirtschaftlichen Folgen der globalen Erwärmung. Als derzeitige Grenzschadenskosten (Social Cost of Carbon = SCC) unter einem business-as-usual-Szenario (BAU) ergeben sich bei Stern 85 \$/t CO₂,

¹⁹ Ziel: die EU erreicht gemeinschaftlich -20 % bis 2020 und -60 % bis 2050.

(<http://lesrapports.ladocumentationfrancaise.fr/BRP/094000195/0000.pdf>, S. 136)

was 71,6 €/t CO₂ entspricht. Diese Kosten steigen in der Zukunft an. Für einen Stabilisierungspfad zwischen 450-550ppm CO₂e liegen die Schadenskosten heute bei 25-30 \$/t CO₂, was 21,1-25,3 €/t CO₂ entspricht. Auch hier wird angenommen, dass die Kosten in der Zukunft ansteigen²⁰.

Die Schadenskosten des Stern-Reports sind im Vergleich zu anderen Studien relativ hoch. Zudem wurde der Stern-Report weltweit wahrgenommen. Daher gab es einige Reaktionen von Wissenschaftlern auf die Veröffentlichung, die auch hier erwähnenswert sind. So stimmen beispielsweise Tol und Yohe (2006) zwar mit den Aussagen überein, dass es ein ökonomisches Argument für Klimaschutzpolitik gibt und dass die Kosten jeder Klimaschutzpolitik ansteigen, im Detail halten sie jedoch die Höhe der Schadensschätzungen für zweifelhaft. So kritisieren sie, dass der Stern-Report keine neuen Schätzungen von Schadens- oder Vermeidungskosten des Klimawandels bietet, sondern nur vorhandenes Material wider gibt. Die höheren Abschätzungen gegenüber den vorherigen Studien lassen sich mit den verwendeten, sehr niedrigen Diskontraten erklären. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass die Kosten der Klimaschutzpolitik aufgrund des kurzen betrachteten Zeithorizonts (bis 2050) sehr niedrig angesetzt wurden. Auch passen ihrer Meinung nach die Schätzungen von Kosten und Nutzen nicht zu den Schlussfolgerungen, denn sonst müsste man ein viel strengeres Konzentrationsziel fordern als im Stern Report gefordert.

1.4.8 IPCC

Das IPCC hat 2007a in seinem Vierten Sachstandsbericht zum wissenschaftlichen Kenntnisstand zur globalen Erwärmung in Modellstudien folgende Vermeidungskosten für eine Stabilisierung auf 550ppm CO₂e bis 2100 errechnet: 20-80 US\$/ t CO₂e im Jahr 2030 und 30-155 US\$/t CO₂e 2050. Dies entspricht 17-67 €/t CO₂e 2030 und 25-131 €/t CO₂e 2050²¹. Berücksichtigt man den Technologiewandel, so sinken die Kosten auf 5-65 US\$/t CO₂e 2030 und 15-130 US\$/t CO₂e 2050. Dies entspricht 4-55 €/ CO₂e 2030 und 13-109 €/t CO₂e 2050.

1.4.9 NEEDS

Im Projekt NEEDS hat Anthoff (2007) Werte mit FUND 3.0 kalkuliert; das verwendete Emissionsszenario, genannt „standardisiertes EMF 14“ Szenario, geht von Emissionen aus, die zwischen 15-17 Gt C/a im Jahr 2050 und 20-26 Gt C/a 2100 liegen. Dies entspricht etwa dem IPCC-Szenario A1 (zumindest bis 2080) und spiegelt ein moderates business as usual Szenario wider.

In Tabelle 17 werden die Ergebnisse detailliert dargestellt. Nach den 1000 Läufen²² ergibt sich eine große Bandbreite. Bei der Darstellung der Werte werden verschiedene Arten des Equity Weighting, der Diskontrate und der Durchschnittsbildung berücksichtigt.

Tabelle 17: Übersicht Ergebnisse FUND (Jahr der Emission) in €2005/t CO₂

	2005	2015	2035	2055
Median				
NoEW_0%PRTP_m	9.90	14.89	16.12	25.62
AvEW_0%PRTP_m	31.38	35.48	33.47	41.37

²⁰ Die Schadenskosten steigen über die Zeit an, weil die Grenzschaäden mit dem vorhandenen Bestand von Treibhausgasen in der Atmosphäre ansteigen und der Bestand von Treibhausgasen über die Zeit ansteigt.

²¹ Unter der Annahme eines Umrechnungsfaktors von 1 \$=0.842 € für das Jahr 2005

(<http://www.methodex.org/CurrencyConversionTool.xls>)

²² Zu den Parametern, die in den Monte-Carlo-Läufen variiert werden gehören zum Beispiel der Verfall von Kohlenstoff, der Einfluss einer Erwärmung um 1 °C auf die Basissterblichkeit durch Dengue-Fieber, Bilharziose oder Malaria und die Szenariounsicherheit.

WeuEW_0%PRTP_m	149.49	175.20	170.04	203.27
NoEW_1%PRTP_m	0.38	1.50	1.71	5.53
AvEW_1%PRTP_m	6.29	8.44	7.21	11.66
WeuEW_1%PRTP_m	29.96	41.69	36.62	57.42
NoEW_3%PRTP_m	-2.09	-2.17	-2.37	-1.37
AvEW_3%PRTP_m	-1.67	-1.43	-1.73	-0.16
WeuEW_3%PRTP_m	-7.93	-7.08	-8.78	-0.80
NoEW_ddr_m	0.55	1.36	0.95	2.99
AvEW_ddr_m	2.71	3.52	2.93	5.13

Durchschnitt

NoEW_0%PRTP_Av	46.01	59.11	92.13	160.53
AvEW_0%PRTP_Av	105.65	117.45	132.48	161.81
WeuEW_0%PRTP_Av	503.01	579.54	672.51	794.69
NoEW_1%PRTP_Av	10.33	14.52	25.63	52.73
AvEW_1%PRTP_Av	28.10	32.84	41.50	54.24
WeuEW_1%PRTP_Av	133.78	162.00	210.62	266.36
NoEW_3%PRTP_Av	-0.12	0.69	3.05	10.53
AvEW_3%PRTP_Av	2.82	4.01	6.74	10.89
WeuEW_3%PRTP_Av	13.42	19.76	34.18	53.45
NoEW_ddr_Av	13.55	16.05	20.96	35.37
AvEW_ddr_Av	16.22	18.77	23.44	30.42

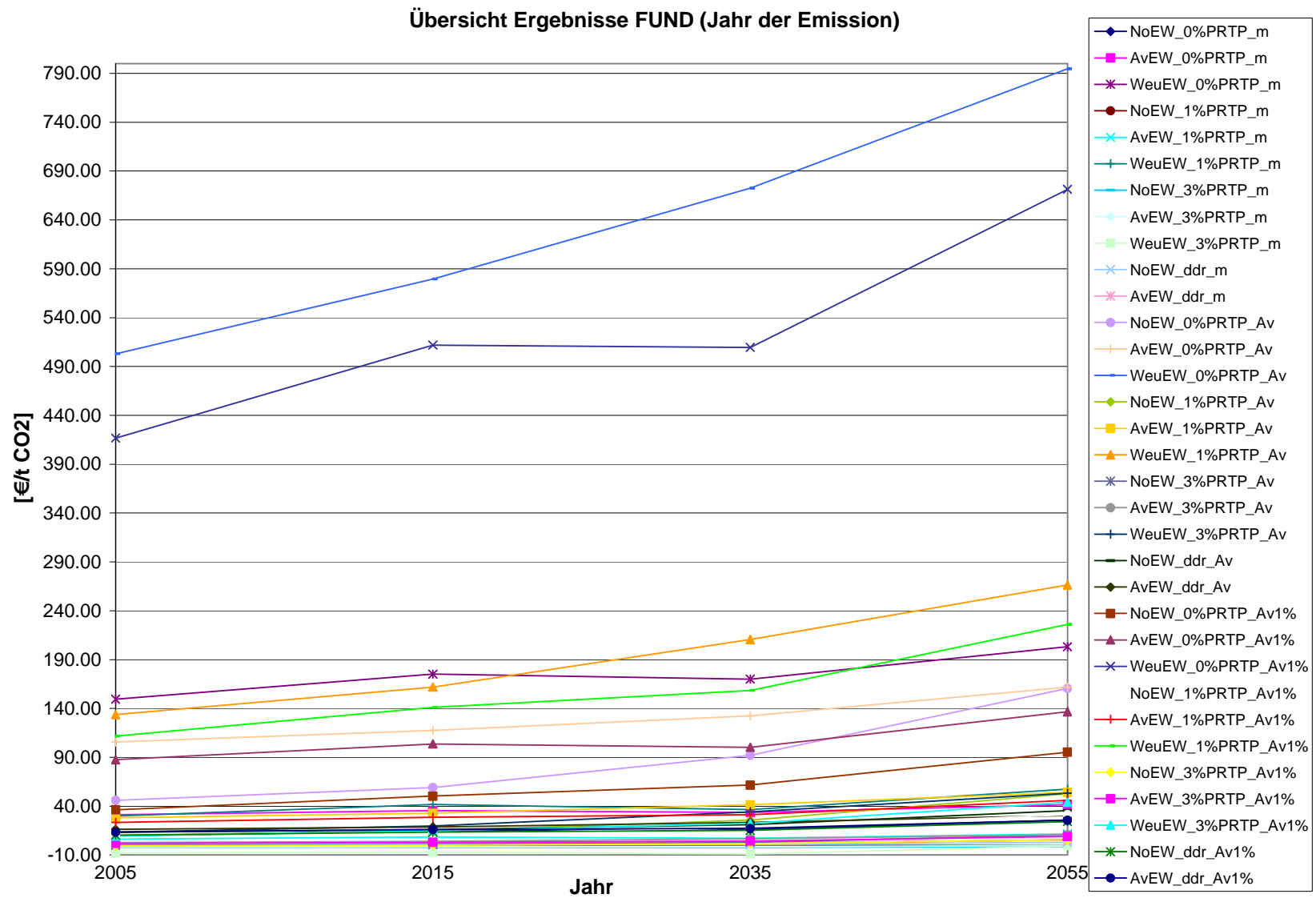
Durchschnitt 1 % trimmed

NoEW_0%PRTP_Av1%	36.36	50.34	61.56	95.31
AvEW_0%PRTP_Av1%	87.53	103.75	100.38	136.69
WeuEW_0%PRTP_Av1%	416.72	511.97	509.50	671.33
NoEW_1%PRTP_Av1%	8.03	12.17	17.56	31.25
AvEW_1%PRTP_Av1%	23.49	28.62	31.24	46.01
WeuEW_1%PRTP_Av1%	111.81	141.23	158.51	225.95
NoEW_3%PRTP_Av1%	-0.54	0.15	1.56	5.50
AvEW_3%PRTP_Av1%	1.97	3.01	4.41	8.98
WeuEW_3%PRTP_Av1%	9.39	14.83	22.38	44.04
NoEW_ddr_Av1%	10.37	13.46	15.29	24.28
AvEW_ddr_Av1%	13.39	16.15	17.34	25.67

Erläuterung zu Abkürzungen: NoEW = kein Equity Weighting (Zahlungsbereitschaft je nach Land), AvEW = durchschnittlich equity weighted (Zahlungsbereitschaft Weltdurchschnitt), WeuEW = Westeuropa equity weighted (Zahlungsbereitschaft wie in der EU), PRTP = reine Zeitpräferenzrate, ddr = Declining discount rate, m= Median, Av = Durchschnitt, Av1% = Durchschnitt 1 % trimmed

Quelle: Anthoff (2007) umgerechnet in €/t CO₂

Abbildung 8: Übersicht Ergebnisse FUND (Jahr der Emission) in €/t CO₂



Im Projekt NEEDS gab es unterschiedliche Auffassungen zur Verwendung von „equity weighting“, aus diesem Grund wurden vom Koordinator und dem Konsortium folgende drei Möglichkeiten des Vorgehens beschlossen, dem die Mehrheit im Projekt zustimmte:

1) reine ökonomische Kosten-Nutzen-Analyse (NoEW):

Man verwendet die Ergebnisse aus FUND (Grenzschadenskosten) für eine reine Zeitpräferenzrate von 1 % (da es sich um Monte-Carlo-Simulationen handelt, ist dies gleichbedeutend mit einer abnehmenden zukünftigen Zeitpräferenzrate bei einer deterministischen Rechnung) und kein equity weighting.

2) Vorsorgeprinzip, Verwendung von beschlossenen Zielen (MAC_Kyoto+):

Grenzvermeidungskosten für Kyoto-Ziele im Jahr 2010; -20 % im Jahr 2020, dann ein Anstieg mit der Diskontrate von 3 %/Jahr.

Für Kyoto liegen die aktuellen CO₂-Preise ein wenig höher als die 19 €/t CO₂ die man aktuell annimmt. Andererseits könnte die volle Inkraftsetzung der Handelsmechanismen zu einer Verringerung der Preise in der Zukunft führen, so dass ein durchschnittlicher Kohlenstoffdioxidpreis von 23,5 €/t CO₂ für das Jahr 2010 verwendet werden könnte.

Die Grenzvermeidungskosten steigen dann mit einer Diskontrate von 3 % an, was zu Grenzvermeidungskosten von 77 €/t CO₂ im Jahr 2050 führt. Dieses Ergebnis stimmt mit der HEATCO- und der Watkiss-Studie überein. Es ähnelt auch der französischen Empfehlung „Boiteux“ (zitiert aus „Valeur tutelair du carbone“ (2008)).

Mit diesen Grenzvermeidungskosten wird das 2 °C-Ziel wahrscheinlich nicht erreicht. Nach Kuik's Metamodell würde man etwa bei 450ppm CO₂ (nicht CO₂-Äquivalenten) ankommen, was einer Erwärmung um 2,8 °C entspricht. Dies entspricht wiederum ungefähr dem von Nordhaus ermittelten pareto-optimalen Klimaschutzpfad.

3) Vorsorgeprinzip, ehrgeiziges Ziel, 2 °C-Ziel (MAC_2°):

Hier werden Werte aus dem Metamodell von Kuik aus dem CASES-Projekt herangezogen (Grenzvermeidungskosten), welches eine Reihe von verschiedenen Modellen untersucht und vergleicht. Wenn man 365 ppm CO₂ als Ziel für das 2 °C-Ziel annimmt, dann ergibt das Modell Werte von ca. 100 €/t CO₂ für das Jahr 2025 und ca. 200 €/t für das Jahr 2050²³. Der Wert für 2025 ist sehr viel höher als im JRC Report von 2007 (Global Climate Policy Scenarios for 2030 and Beyond), welcher nur 37 €/t für 2020 und 64 €/t für 2030 zur Erreichung des 2 °C-Ziels ausgibt, jedoch sind keine Werte für Jahre nach 2030 angegeben. Die Ergebnisse des NEEDS-Modells sind: 37 €/t CO₂ für 2020 (in Übereinstimmung mit der JRC-Studie), 21 €/t für 2025, 670 €/t für 2050. Das letzte Ergebnis ist ein Artefakt, weil keine expansiven Emissionsminderungsmaßnahmen im Modell enthalten sind – man muss im Auge behalten, dass 40 Jahre Zeit vorhanden ist, um neue innovative technische Lösungen zu erreichen. Das ist besonders der Fall, wenn man annimmt, dass Vermeidungskosten von 670 €/t nicht sozial akzeptiert wären.

Basierend auf diesen Betrachtungen schlagen wir vor, den Wert von ca. 200 €/t CO₂ für 2050 aus Kuik zu verwenden, aber zwischen 2010 und 2050 exponentiell zu interpolieren. Das führt die Werte von 2020 näher an die JRC und NEEDS Schätzungen. Man kann das als Best guess sehen, weil man das Wissen hat, dass nach 2030 die Werte noch weniger verlässlich sind und sich ändern könnten, wenn man bessere Ergebnisse zur Verfügung hat.

²³ In der neueren Untersuchung von Kuik et al. (2009) liegt der Wert für das 2 °C-Ziel (entspricht 450ppm CO₂e) sogar noch höher, nämlich bei 129 €/t CO₂e im Jahr 2025 und für 2050 bei 225 €/t CO₂e.

Dies führte im Projekt NEEDS zu den folgenden empfohlenen Werten von €₂₀₀₅/t CO₂ im Jahr der Emission.

Tabelle 18: Empfehlung Projekt NEEDS in €2005/t CO₂

[Euro ₂₀₀₅ pro Tonne CO ₂ eq]	2010	2015	2025	2035	2045	2050
1) NoEW	9	11	14	15	17	22
2) MAC_Kyoto+	23.5	27	32	37	66	77
3) MAC_2°	23.5	31	52	89	152	198

(Friedrich, 2008)

Die Steigerungsrate beträgt bei der hohen Variante 5,5 %/a. Dies entspricht durchaus einer eher niedrigen Opportunitätskostenrate für private Investitionen, also auch für Klimaschutzmaßnahmen. Oft wird als soziale Zeitpräferenzrate aber auch eine niedrigere Rate von 3%/a empfohlen. Verwendet man diese Rate, so ergibt sich etwa der folgende Verlauf der hohen Variante:

Tabelle 19: Empfehlung Projekt NEEDS in €2005/t CO₂ – hoher Wert aktualisiert

[Euro ₂₀₀₅ pro Tonne CO ₂ eq]	2010	2015	2025	2035	2045	2050
MAC_2°, 3 %/a	61	70	95	127	171	198

Interpolation mit 3 %, statt 5,5 %

Dabei ist allerdings nicht berücksichtigt, dass wegen der höheren Kosten in den Jahren vor 2050 die marginalen Vermeidungskosten 2050 deutlich niedriger sein könnten, die Werte in Tabelle 19 überschätzen die Kosten daher vermutlich erheblich.

1.4.10 Methodenkonvention (2007)

In der Methodenkonvention (2007) wurde aufgrund der vorliegenden Literatur empfohlen einen Schätzwert von 70 €/t CO₂ zu verwenden um externe Kosten von Treibhausgasemissionen abzuschätzen. Berücksichtigt sind in diesem Wert Schäden in den nächsten 100 Jahren, eine Zeitpräferenzrate von 1 % und equity weighting. Es wird auch empfohlen Sensitivitätsrechnungen mit 20 €/t CO₂ und 280 €/t CO₂ durchzuführen. Der untere Wert ergibt sich einerseits aus der Expertenmeinung, dass die Kosten mit großer Sicherheit höher als 14 €/t CO₂ sind und andererseits aus Modellrechnungen ohne Gewichtung der regionalen Schäden, bei denen der Wert bei 22 €/t CO₂ liegt. Der obere Wert von 280 €/t CO₂ ergibt sich bei der Verwendung einer Zeitpräferenzrate von 0 %.

1.5 Empfehlung des IER für die Methodenkonvention

In den folgenden Tabellen sind alle Ergebnisse in Euro₂₀₀₅ dargestellt. Da die Kostensätze einheitlich in Euro₂₀₁₀ berechnet wurden, weichen die hier dargestellten Werte von den in den Kostensätzen dargestellten Werte um diese Inflation entsprechend ab.

1.5.1 Vermeidungskosten

Als Vermeidungskosten werden die Werte der Meta-Studie von Kuik et al. (2009) für ein Ziel bei 450ppm CO₂e empfohlen. Ein Stabilisierungsziel bei 450ppm CO₂e entspricht dem weltweit angestrebten 2 °C-Ziel, das auch bei der Klimakonferenz 2010 in Cancun bestätigt wurde. Die Vermeidungskosten liegen 2050 bei 225 €/t CO₂e (128-396 €). Durch Interpolation der gegebenen Werte mit 3 % gelangt man zu den Werten in Tabelle 20.

Tabelle 20: Empfehlung Vermeidungskosten in €2005/tCO₂ – Interpolation mit 3 %

	2010	2020	2025	2030	2040	2050
unterer Wert	39	53	61	71	95	128
mittlerer Wert	69	93	107	125	167	225

oberer Wert	121	163	189	219	295	396
-------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Da Vermeidungskosten direkt, sozusagen am Markt angewandt werden, folgt in Tabelle 21 noch eine Berücksichtigung des dortigen (etwas höher anzusetzenden) Marktzinses. Die Werte von 2050 werden hier mit 5 % interpoliert. Daraus folgt für das Jahr 2010 ein mittlerer Wert von 32 €/t CO₂e (18-56 €/t CO₂e).

Tabelle 21: Vermeidungskosten in €2005/t CO₂ - Interpolation mit 5 %

	2010	2020	2025	2030	2040	2050
unterer Wert	18	30	38	48	79	128
mittlerer Wert	32	52	66	85	138	225
oberer Wert	56	92	117	149	243	396

1.5.2 Schadenskosten

Die empfohlenen Werte für Schadenskosten stammen aus dem Modell FUND und wurden im Rahmen des NEEDS-Projekts berechnet (Anthoff, 2007)²⁴. Zugrunde liegt ein Klimaszenario, das sogenannte „standardisierte EMF 14“ Szenario. Es geht von Emissionen aus, die zwischen 15-17 Gt C/a im Jahr 2050 und 20-26 Gt C/a 2100 liegen. Dies entspricht etwa dem IPCC-Szenario A1 (zumindest bis 2080) und spiegelt ein moderates business as usual Szenario wider. Der wissenschaftliche Konsens bei der Wahl der Diskontrate und der Durchschnittsbildung liegt bei 1 % PRTP und 1 % trimmed.

Die folgende Tabelle zeigt die Werte für Schadenskosten unter der Annahme einer reinen Zeitpräferenzrate zwischen 0-3 %, einem Durchschnitt der bei 1 % beschnitten ist und ohne equity weighting.

Tabelle 22: Empfehlung Schadenskosten in €2005/t CO₂

	2005	2015	2025	2035	2045	2055
NoEW_0%PRTP_Av1%	36.4	50.3	59.0	61.6	66.7	95.3
NoEW_1%PRTP_Av1%	8.0	12.2	15.8	17.6	20.1	31.2
NoEW_3%PRTP_Av1%	-0.5	0.2	1.1	1.6	2.3	5.5

Die Berücksichtigung von equity weighting führt zu höheren Werten. Die folgenden Tabellen zeigen dieselben Annahmen wie Tabelle 22, unter Berücksichtigung einer europäischen und einer weltweiten Durchschnittsbildung – die Anwendung dieser Annahme könnte man mit dem Vorsorgeprinzip begründen.

Tabelle 23: Schadenskosten mit equity weighting (Europa) in €2005/t CO₂

	2005	2015	2025	2035	2045	2055
WeuEW_0%PRTP_Av1%	416.72	511.97	569.00	509.50	508.33	671.33
WeuEW_1%PRTP_Av1%	111.81	141.23	170.55	158.51	164.96	225.95
WeuEW_3%PRTP_Av1%	9.39	14.83	23.97	22.38	26.63	44.04

Tabelle 24: Schadenskosten mit equity weighting (weltweit) in €2005/t CO₂

	2005	2015	2025	2035	2045	2055
AvEW_0%PRTP_Av1%	87.5	103.7	112.7	100.4	101.0	136.7
AvEW_1%PRTP_Av1%	23.5	28.6	33.8	31.2	32.8	46.0
AvEW_3%PRTP_Av1%	2.0	3.0	4.7	4.4	5.3	9.0

1.6 Externe Kosten von Treibhausgasemissionen des Flugverkehrs

Neben den Emissionen von CO₂ haben auch andere Substanzen, die von Flugzeugen in großen Höhen emittiert werden durch den Strahlungsantrieb Auswirkungen auf die globale Erwärmung. Die Hauptkomponenten der Emissionen sind (neben CO₂) Wasserdampf (H₂O), Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Schwefeldioxid (SO₂)

²⁴ http://www.needs-project.org/docs/results/RS1b/NEEDS_Rs1b_D5.4.pdf

und Rußpartikel. Die nicht-CO₂-bezogenen Auswirkungen auf den Klimawandel sind zum Teil wärmende Effekte, zum Teil kühlende Effekte: die atmosphärischen chemischen Reaktionen auf der Basis von NO_x, die die Ozonkonzentrationen in der Atmosphäre erhöhen (wärmend) und die Methan umwandeln (kühlend), Rußemissionen aus Flugzeugmotoren (wärmend), Schwefelaerosole (kühlend) und die Bildung von Kondensstreifen²⁵ (kühlend am Tag und wärmend bei Nacht) und möglicherweise Zirruswolken.

1.6.1 Literaturübersicht über verschiedene relevante Studien

1.6.1.1 IPCC

Die Quantifizierung und Bewertung von Klimaeffekten des weltweiten Luftverkehrs wird in der aktuellen wissenschaftlichen Literatur kontrovers diskutiert. Im Jahr 1999 publizierte der IPCC das Grundlagenwerk 'Aviation and the global atmosphere' (IPCC 1999), das erstmals eine zusammenfassende Darstellung der Klimawirkungen des weltweiten Luftverkehrs ermöglichte. Als Maß für die Klimawirkungen wurde das sog. Radiative Forcing (RF) für den Strahlungsantrieb definiert (Einheit W/m²). Der Strahlungsantrieb quantifiziert den Einfluss verschiedener Treibhausgase, Spurengase, Partikel sowie weiterer Effekte (Zirruswolken, Kondensstreifen) auf die Energiebilanz der Erdatmosphäre.

Aus den Analysen folgte der IPCC Report im Jahr 1999 (IPCC 1999), dass der Luftverkehr im Jahr 1992 für ca. 3,5 % des totalen anthropogenen Strahlungsantriebs verantwortlich war und sich dieser Anteil im Rahmen eines mittleren Emissionsszenarios bis 2050 auf 5 % erhöhen wird. Abgeleitet aus dem Strahlungsantrieb wurde der sog. Radiative Forcing Index (RFI) definiert, der als Quotient aus dem totalen Strahlungsantrieb des Luftverkehrs und dem Strahlungsantrieb von CO₂ allein gebildet wird.

Im Rahmen des 4. Sachstandsberichts des IPCC (IPCC 2007b) wurde der Strahlungsantrieb des Luftverkehrs nochmals neu berechnet und für das Jahr 2005 auf ca. 3 % des anthropogenen Strahlungsantriebs geschätzt. Dies ist etwas niedriger als in der ursprünglichen Berechnung für das Jahr 1992 (IPCC 1999). Grund hierfür sind eine realistischere Quantifizierung der Effekte von Kondensstreifen sowie ein besseres Verständnis der NO_x Effekte. Bei der Berechnung liegt ein beträchtlicher Unsicherheitsbereich von 2-8 % vor, der aus den großen Unsicherheiten des nicht-luftverkehrsbedingten Strahlungsantriebs resultiert.

1.6.1.2 TRL

TRL präsentierte 2001 eine Fallstudie für die Luftfahrt. Methodisch ging man so vor, dass man die Gesamtemissionen der Luftfahrt abschätzte (in dieser Fallstudie für eine Rückreise zu einem bestimmten Ort) und diese dann mit externen Kostenfaktoren multiplizierte.

Für CO₂ und NO_x stammten die Grenzschadenskosten aus DETR, 2000, und haben folgende Werte: 33-133 €/t C (zentraler Schätzwert 86 €/t C) für den Fall von CO₂ und 3900 €/t für NO_x.

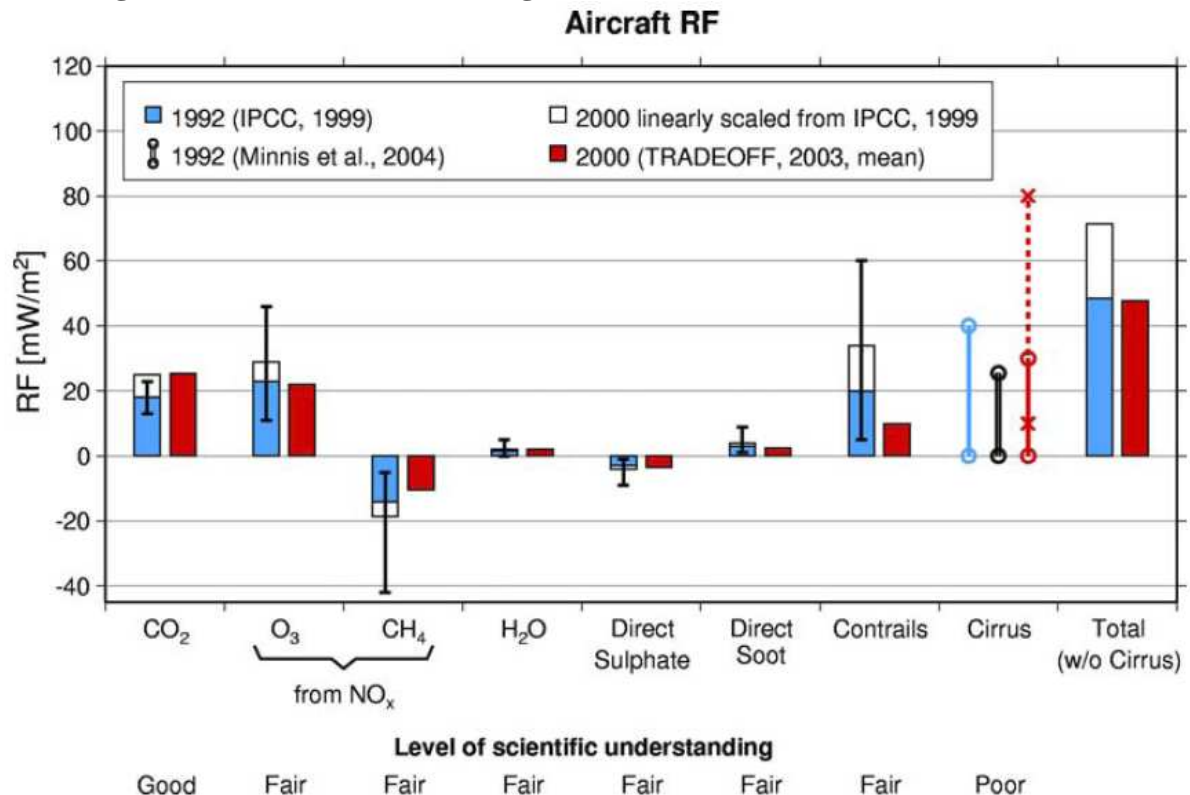
TRL, 2001 erwähnt nicht explizit, wie die Schadenskosten von NO_x die verschiedenen Strahlungsantriebsmechanismen berücksichtigen, die beteiligt sind.

1.6.1.3 INFRAS

Um die Auswirkungen des Strahlungsantriebs aufgrund von Flugemissionen in großen Höhen abschätzen zu können, wurde in INFRAS, 2004 ein Faktor von 2,5 verwendet um den reinen CO₂-bezogenen Strahlungsantrieb in einen kombinierten Strahlungsantrieb von CO₂ und anderen Flugemissionen zu übersetzen. In Bezug auf Sausen et al. (2005) ist der Gesamtstrahlungsantrieb der Luftfahrt etwa um den Faktor 2 höher als der Strahlungsantrieb von CO₂ Emissionen aus der Luftfahrt (siehe Abbildung 9).

²⁵ Unter bestimmten Bedingungen können Kondensstreifen aus Ruß und Wasserdampf entstehen.

Abbildung 9: CO₂ und nicht- CO₂-bezogene Klimaeinflüsse des Luftverkehrs



Quelle: Sausen et al., 2005

1.6.1.4 HEATCO

HEATCO, 2006 erwähnt den Einfluss von anderen Luftfahrtemissionen (Wasserdampf, Sulfat, Rußaerosole und Stickoxiden) in großer Höhe auf die globale Erwärmung und schlägt vor, dass die CO₂-Emissionen aus der Luftfahrt mit einem Faktor von 2 multipliziert werden um die Effekte einzurechnen, die auf der Bewertung des IPCC bezüglich des gesamten Einflusses auf den Klimawandel im Vergleich zum direkten Einfluss des CO₂ beruhen.

1.6.1.5 CE Delft Studie zu externen Kosten der Luftfahrt

Für die Bewertung von Auswirkungen der Luftfahrt auf das Klima wurde sowohl der Schadenskostenansatz also auch der Vermeidungskostenansatz verwendet. In der betrachteten Studie (CE Delft, 2002) führte das zu einer mittleren Schätzung von 30 €/t CO₂e, mit Sensitivitäten von 10 und 50 € pro Tonne.

Da Kondensstreifen einen relativ großen klimatischen Einfluss haben und ihre Entstehung ziemlich genau vorhergesagt werden kann, wurde der klimatische Einfluss für Situationen mit und ohne Entstehung von Kondensstreifen unterschieden.

Für diese Analyse war die wichtigste Annahme, dass Kondensstreifen in 10 % der geflogenen Kilometer gebildet werden. Für Flugzeuge die in Entfernungen bis zu ein paar hundert Kilometern fliegen, sind die externen Kosten in Bezug auf LTO Emissionen (Landing and Take-off) dominant, besonders Lärmkosten. Bei Flügen über etwa 1000 Kilometer, überschreiten die externen Kosten der klimatischen Auswirkungen die der LTO-Auswirkungen. Dies gilt auch, wenn keine Kondensstreifen entstehen.

Neue Technologie im Flugbereich hat mehr Einfluss auf LTO-bezogene Kosten als auf Kosten die sich auf klimatische Auswirkungen beziehen und damit auf die externen Kosten die auf diesen klimatischen Einfluss zurückzuführen sind.

Basierend auf einer Zahl von Annahmen ist die mittlere Schätzung, dass der klimatische Einfluss eines Kondensstreifenauslösenden Flugzeugs, im Durchschnitt, etwa achtmal so hoch wie ein Flugzeugkilometer der nicht zu anhaltenden Kondensstreifen führt.

Kondensstreifen und andere nicht- CO₂-gebundene Klimaauswirkungen:

Gemäß einer mittleren Schätzung des IPCC im Jahr 1992 war der gesamte klimatische Einfluss der Luftfahrtemissionen um das 2,7-fache höher als der alleinige von CO₂. Neben CO₂-Emissionen sind Kondensstreifenbildung und NO_x-Emissionen die wichtigsten Umwelteinflüsse.

Besondere Aufmerksamkeit wurde in dieser Studie der Kondensstreifenbildung gewidmet. Das hat zwei Gründe: erstens leisten Kondensstreifen einen beachtlichen Beitrag zum gesamten Strahlungsantrieb aufgrund von Luftfahrt und zweitens sind die Umstände unter denen Kondensstreifen auftreten speziell und auch ziemlich gut vorhersagbar.

In der Studie wurde angenommen, dass Kondensstreifen im Durchschnitt auf 10 % der Flugkilometer gebildet werden. Darüber hinaus wurde angenommen, dass die Kondensstreifenbildung nicht mit einem anderen Umwelteinfluss von Luftfahrt korreliert. Nicht betrachtet wurde der mögliche zusätzliche Einfluss von Zirruswolkenbildung aus langlebigen Kondensstreifen.

Unter den eben genannten Annahmen, hat CE Delft 2002 nun die klimatischen Auswirkungen verschiedener Arten von durchschnittlichen Flügen unterschieden. Einmal jene Flüge die Kondensstreifen verursachen und zum anderen jene, die keine Kondensstreifen verursachen (Tabelle 25). Tabelle 25 zeigt die globale durchschnittliche Störung der Strahlungsausgewogenheit in W/m², differenziert für Situationen mit und ohne Kondensstreifen sowie für einen Durchschnittsfall (der in der Realität so aber kaum auftritt). Die Tabelle beruht auf Daten von 1992 und dem IPCC Report 1999.

Tabelle 25: Globale durchschnittliche Störung der Strahlungsantriebsausgewogenheit, in W/m², differenziert für Situationen mit und ohne Kondensstreifen.

Störung aufgrund von	Durchschnittliche Situation (mit angenommener 10 %-iger Wahrscheinlichkeit von Kondensstreifen für jeden geflogenen km)	Situation ohne Kondensstreifen (etwa 90 % der Flugzeit)	Situation mit Kondensstreifen (etwa 10 % der Flugzeit)
CO ₂	+0,018	+0,0162	+0,0018
Kondensstreifen	+0,02	0	+0,02
Andere (NO _x , H ₂ O, Schwefel, Ruß)	+0,011	+0,0099	+0,0011
Gesamt	+0,049	+0,026	+0,023
Pro Flugkilometer (picoW/m²)	+2,4	+1,4	+11

Quelle: CE Delft, 2002.

Tabelle 25 zeigt: unter den angegebenen Annahmen ist der gesamte durchschnittliche klimatische Einfluss eines kondensstreifenerzeugenden Flugkilometers etwa achtmal höher als der gesamte durchschnittliche Einfluss eines Flugkilometers ohne Kondensstreifen (letzte Zeile - 11 vs. 1,4). Für einen durchschnittlichen kondensstreifenerzeugenden Flugkilometer (letzte Spalte) ist der klimatische Einfluss des Kondensstreifens allein etwa elfmal so hoch, wie der von CO₂ alleine (0,02 vs. 0,0018).

Der „durchschnittliche“ klimatische Einfluss von Flügen, wie in der ersten Spalte aufgezeigt, wird in der Praxis nie erreicht. Deshalb ist er immer „falsch“. Die abgegrenzten Zahlen der zweiten und dritten Spalte hingegen geben einen Einblick in die zusätzlichen Auswirkungen von Kondensstreifen und kommen realen Situationen wahrscheinlich näher.

Der klimatische Einfluss von NO_x-Emissionen entspringt zwei völlig verschiedenen Prozessen: einmal der Nettoproduktion von troposphärischem Ozon und zum anderen dem Nettoverlust von Methan. Jeder Mechanismus hat unterschiedliche chemische Hintergründe und taucht unter verschiedenen Umständen auf. Obwohl die zwei Mechanismen streng genommen getrennt bewertet werden sollten, wurde aus Gründen der Vereinfachung entschieden hier mit dem globalen durchschnittlichen Nettoergebnis zu arbeiten.

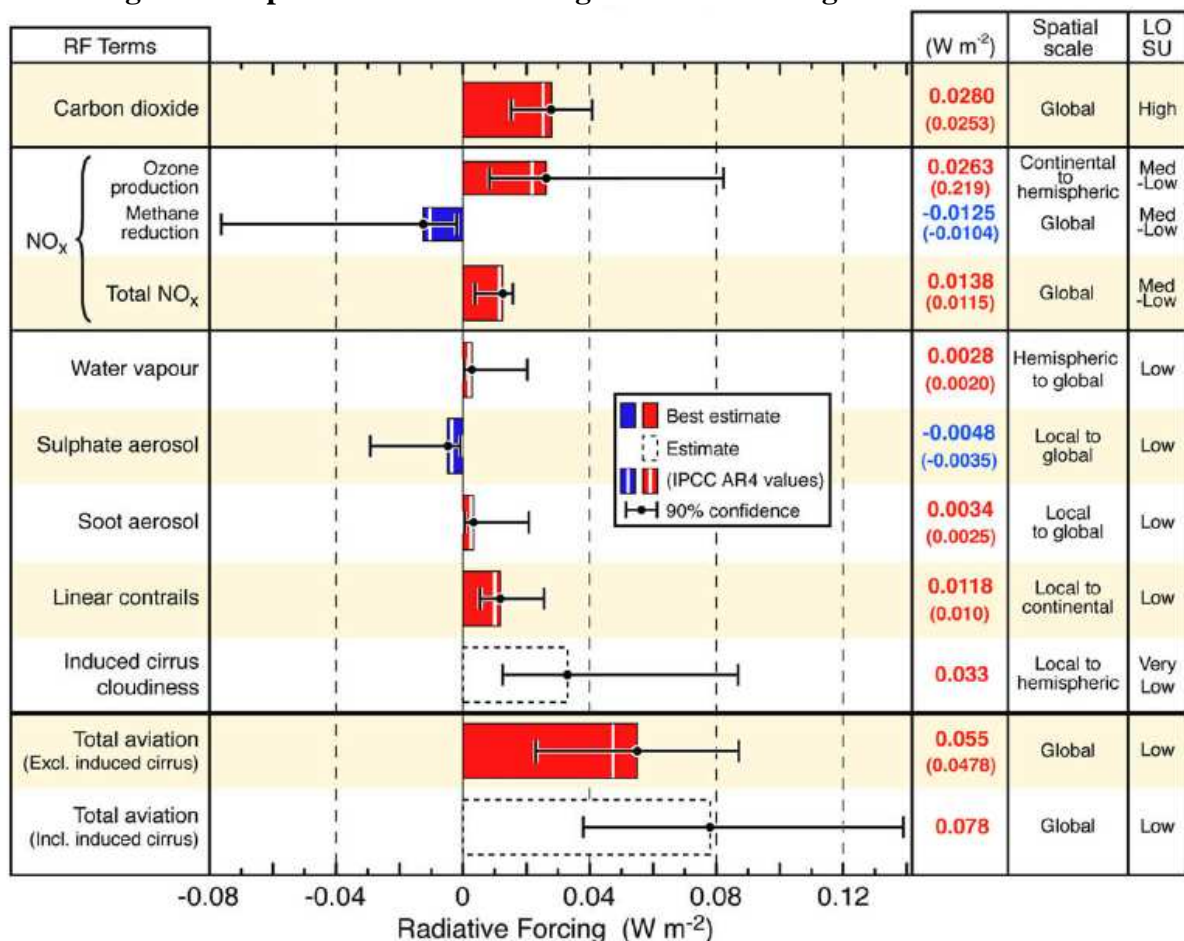
Nicht-LTO NO_x-Emissionen werden nach dieser Vorgehensweise folgendermaßen bewertet: 1,2 €/kg als niedrige Variante, 3,6 €/kg als mittlere Variante und 6 €/kg als hohe Variante. Mit diesen Werten wird ein W/m² des Strahlungsantriebs durch NO_x-Emissionen gleich bewertet wie ein W/m² Antrieb durch CO₂-Emissionen.

Die klimatischen Einflüsse von Schwefel und Rußaerosol-Emissionen wurden in CE Delft 2002 nicht finanziell bewertet, weil man annimmt, dass die zwei Effekte sich auf dem globalen Niveau aufheben.

1.6.1.6 Lee et al.

Lee et al. (2009) haben, mit Hilfe eines aktualisierten Mengengerüsts, nochmals eine Quantifizierung des Strahlungsantriebs des Luftverkehrs durchgeführt. Sie erhalten für das Jahr 2005 – nicht zuletzt aufgrund des erheblichen Mengenzuwachses der weltweiten Flugverkehrsleistungen (+38 % zwischen 2000 und 2007) – einen um 14 % erhöhten Strahlungsantrieb des Luftverkehrs im Jahr 2005 im Vergleich zum Jahr 2000 (Lee et al. 2009). Abbildung 10 zeigt die Resultate von Lees Berechnungen.

Abbildung 10: Komponenten des Strahlungsantriebs des Flugverkehrs



Quelle: Lee et al. 2009

Der RFI des Luftverkehrs in obiger Darstellung ist der Quotient aus 'Total Aviation' (zweitunterster Balken) und 'Carbon dioxide' (oberster Balken) und beträgt für das Jahr 2005

ca. 1,96 (ohne Berücksichtigung von Zirrus-Wolken, deren Strahlungsantrieb mit sehr großen Unsicherheiten behaftet ist).

1.6.2 Radiative Forcing Index vs. Emission Weighting Factor

Schon frühzeitig kam es zu Diskussionen hinsichtlich der Anwendbarkeit des RFI zur Gewichtung von Luftverkehrsemissionen für Politikmaßnahmen zur Reduktion von Treibhausgasen im Luftverkehr (z. B. im Rahmen des ETS). In der aktuellen Literatur²⁶ wird davor gewarnt, den RFI als simplen Multiplikator von CO₂-Emissionen zu verwenden. Diese Ansicht wurde auch im 4. Sachstandsbericht des IPCC vertreten (siehe Forster et al. 2007). Hauptgrund ist die Tatsache, dass im RFI die unterschiedlichen atmosphärischen Lebensdauern der verschiedenen Komponenten des Strahlungsantriebs (CO₂ über 100 Jahre, Kondensstreifen wenige Stunden, etc.) nur ungenügend abgebildet werden können.²⁷ Gleichwohl stellt die Einschränkung hinsichtlich der Anwendbarkeit des RFI keine Fundamentalkritik an der Tatsache dar, dass der Luftverkehr einen größeren Einfluss auf den Strahlungsantrieb hat als den Strahlungsantrieb seiner CO₂-Emissionen allein (siehe u.a. Kahn Ribeiro et al. 2007 sowie Abbildung 10 oben).²⁸ Da der RFI als Verhältnis von Strahlungsantrieben wesentlich von den Emissionen der Vergangenheit bestimmt wird, eignet er sich allerdings eher nicht für Regelwerke zum Klimaschutz. Bei konstanten Luftverkehrsemissionen verringert sich der RFI im Lauf der Zeit, weil sich das sehr langlebige CO₂ akkumuliert (Fischer et al. 2009).²⁹

Neben dem RFI wird heute noch ein zweiter Index diskutiert, der das Verhältnis der Gesamtwirkung der luftverkehrsbedingten Klimaeffekte zur Wirkung von CO₂-Emissionen alleine abbilden kann, der sog. Emissionsgewichtungsfaktor (EGF, engl. Emission Weighting Factor, EWF). Dieser basiert auf dem Treibhauspotenzial (Global Warming Potential). Das GWP eines bestimmten Stoffes ist das Verhältnis des AGWP (Absolute Global Warming Potential) dieses Stoffes zum AGWP von CO₂. Das AGWP ist der über einen bestimmten Zeithorizont integrierte Strahlungsantrieb aufgrund einer Einheitsemission eines strahlungsaktiven Stoffes. Damit vergleicht das GWP die integrierten zukünftigen Strahlungswirkungen zweier Substanzen. Aus diesem Grund wurde das GWP auch im Kyoto Protokoll berücksichtigt (für einen Zeithorizont von 100 Jahren). Der Emissionsgewichtungsfaktor des Flugverkehrs ist definiert als Summe der AGWP aller Einzelbeiträge dividiert durch das AGWP für CO₂ (Fischer et al. 2009). Forster et al. (2007b) schätzen den EGF des Luftverkehrs für einen Zeithorizont von 100 Jahren auf 1,2, wenn neben CO₂ Ozon (O₃), Methan (CH₄) sowie Kondensstreifen berücksichtigt werden. Zirruswolken werden bei Forster et al. (2007b) aufgrund hoher Unsicherheiten nicht in den EGF einbezogen.

²⁶ Eine gute Zusammenfassung findet sich u. a. in Lee et al. (2009) und in Fischer et al. (2009).

²⁷ Dies hängt mit der Definition des RF zusammen, der immer über das Integral eines bestimmten Zeitraums betrachtet wird. So kann man verlässliche Aussagen über den integralen Strahlungsantrieb der Vergangenheit machen, aber in die Zukunft blickend hängt der Wert eines RFI im entscheidenden Maß von der betrachteten Zeitspanne (z. B. die nächsten 10, 50 oder 100 Jahre) ab.

²⁸ Auch andere anthropogene, bodennahe Verbrennungsprozesse weisen neben den reinen CO₂-Effekten noch sekundäre Effekte mit allenfalls zusätzlichen Strahlungsantrieben auf. Hierzu existieren bis heute noch wenig verlässliche Grundlagen.

²⁹ Die gleichen Autoren verdeutlichen diesen Effekt anhand eines Beispiels: Es wird ein hypothetischer RFI mit Beginn im Jahr 2000 bei konstanten Emissionen berechnet: Betrachtet werden zunächst nur die Emissionen des Jahres 2000. In diesem Jahr sind die Strahlungsantriebe von Ozon oder Kondensstreifen zunächst deutlich (mehr als 20 mal) höher als jener von CO₂. In den darauffolgenden Jahren sind jedoch Ozon und Kondensstreifen nicht mehr relevant, während der CO₂ – Beitrag aus jenem Jahr nur sehr langsam abnimmt. Verfolgt man die Entwicklung des Strahlungsantriebs bei konstantem Verkehr über eine gewisse Zeitspanne, so bleiben die Ozon- und Kondensstreifen-Beiträge konstant, die Konzentration von CO₂ wächst jedoch weiter, wodurch dessen Strahlungsantrieb bereits nach 20 Jahren dominant wird (ab dem Jahr wäre der RFI kleiner als zwei).

Der RFI sowie der EGF sind beide geeignet, gewisse Aspekte der nicht-CO₂-Beiträge des Flugverkehrs zu illustrieren. Fischer et al. (2009) folgern allerdings, dass unabhängig davon, ob es sich um eine rückwärts- (RFI) oder vorwärtsschauende (EGF) Metrik handelt, ein Faktor zur Multiplikation der CO₂-Emissionen dazu führen würde, dass Maßnahmen zur Reduktion der nicht-CO₂-Beiträge nicht belohnt würden, sondern lediglich Maßnahmen zur Treibstoffeinsparung.³⁰ Als wissenschaftlich korrekten Weg schlagen sie vor, die nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs über orts- und zeitabhängige Maßzahlen für Einheitsemissionen zu berücksichtigen. Hierzu stehen heute noch relativ wenig gesicherte Grundlagen zur Verfügung. Für die Berechnungen der Klimakosten des Luftverkehrs in der Studie von Fischer et al. (2009) werden aufgrund der verschiedenen Schwierigkeiten der Quantifizierung der nicht-CO₂-Effekte nur die effektiven CO₂-Emissionen bewertet (RFI = 1). Damit wird sichergestellt, dass die emittierte Tonne CO₂ unabhängig vom Verkehrsträger gleichartig bewertet wird. Betrachtet man die über 100 Jahre integrierten Klimawirkungen einer im Luftverkehr zu einem bestimmten Zeitpunkt emittierten Tonne CO₂, so wird deutlich, dass die Gesamtwirkung gegenüber einer durch andere Verkehrsträger bodennah emittierten Tonne CO₂ nur gering abweicht. Die Multiplikation der Luftverkehrsemissionen von CO₂ mit dem EGF von 1,2 aus Forster et al. (2007b) könnte allenfalls als Sensitivität dienen, es bleibt aber zu berücksichtigen, dass dadurch keine Lenkungswirkung hinsichtlich der Reduktion der nicht-CO₂-Effekte des Luftverkehrs erzielt werden kann. Verschiedene aktuell laufende Forschungsprojekte (beschrieben u.a. in Lee et al. (2009) bzw. Fischer et al. (2009)) könnten in Zukunft zu einer Neubeurteilung der Anwendbarkeit von Indikatoren zur Berücksichtigung dieser Effekte bei der Berechnung externer Kosten für den Luftverkehr führen.

Fazit für die Bewertung von Luftverkehrsbedingten Klimaeffekten

Zwar ist die Tatsache unbeschränkt, dass der Strahlungsantrieb des Luftverkehrs denjenigen des reinen CO₂ um einen Faktor von ca. 2 übersteigt, allerdings ist der RFI als rückwärtsgewandter Indikator wenig geeignet, um als zukunftsgerichteter Gewichtungsfaktor von heute erfolgenden CO₂-Emissionen zu dienen, und dies aus folgendem Grund:

Der heutige RFI zeigt auf, wie groß der Strahlungsantrieb des Luftverkehrs 2005 (aktuellstes verfügbares Jahr aus Lee et al. 2009) war. Dabei werden einerseits sämtliche in der Vergangenheit bis zum Referenzjahr erfolgten CO₂-Emissionen des Luftverkehrs berücksichtigt. Auch die weiteren Effekte wie NO_x-Emissionen (die ein komplexes Wirkungsmuster aus Erwärmung durch Ozonbildung und Abkühlung aus Methanabbau zeigen) sowie Kondensstreifen und die mit großen Unsicherheiten behafteten Wirkungen der Zirrus-Wolkenbildung werden berücksichtigt. Dieser Faktor beträgt heute ohne Zirrus-Wolken ca. 2, mit Zirruswolken ca. 2,8.

Langfristig wird der RFI durch die Langlebigkeit von CO₂ in der Atmosphäre weiter akkumuliert werden und die weiteren Effekte – in Abhängigkeit des Verkehrswachstums sowie möglicher technischer Verbesserungen bei den Triebwerken zur Vermeidung von NO_x Emissionen – in ihrer Bedeutung langfristig zurückgehen, da sie zwar Effekte mit relativ großem Strahlungsantrieb, aber nur sehr kurz wirksam sind.

Für die Bepreisung einer heute emittierten Tonne CO₂ im Luftverkehr, die danach noch ca. 100 Jahre in der Atmosphäre verbleibt, ist es deshalb nicht korrekt, diese mit einem Faktor von 2 zu multiplizieren, weil diese kurzfristigen zusätzlichen Effekte nur für wenige Stunden (Kondensstreifen) bis Tage oder wenige Wochen (NO_x und zusammenhängende Prozesse) wirksam sind. Der gesamte, über die Lebensdauer der Einzelkomponenten integrierte Strahlungsantrieb, wird dabei bereits nach 20 Jahren kleiner als der Faktor 2.

³⁰ CO₂ und H₂O sind prozessbedingt nicht vermeidbare Treibhausgase. Alle anderen zusätzlichen Strahlungsantriebe durch wie NO_x, Kondensstreifen oder auch Zirruswolken, die aus Kondensstreifen entstehen, sind potentiell durch technische oder operative Maßnahmen beeinflussbar und allenfalls reduzierbar.

Insofern ist der Emissionsgewichtungsfaktor, der das aggregierte GWP der Einzelbeiträge darstellt, vermutlich der geeignetere Indikator. Forster et al. 2007 haben diesen auf 1,2 berechnet. Allerdings ist dieser laut den Autoren mit einem Unsicherheitsbereich von >50 % behaftet. Berücksichtigt man diesen, z. B. gemäß dem Vorsorgeprinzip, so liegt der Wert bei 1,8. Dazu kommt, dass der Effekt von Zirruswolken im Wert von 1,2 nicht enthalten ist. Nach Auffassung von Experten sollte man diesen Effekt aber trotz der Unsicherheiten berücksichtigen. Nach Sausen et al. (2005) ergeben sich damit folgende AGWP von Zirruswolken: 5,6 für einen Strahlungsantrieb von 30 mWm^{-2} (mittlerer Strahlungsantrieb im Jahr 2000) und 15 für die obere Grenze von 80 mWm^{-2} . Damit ergibt sich ein EGF von 1,8 bzw. 2,8. Dieser liegt 50 % bzw. 130 % über dem von Forster et al. 2007 berechneten Wert. Experten empfehlen, einen **EGF von 2** für den Bereich des Flugverkehrs anzuwenden. Er ergibt sich einerseits aus dem errechneten Wert von Forster et al. 2007 zuzüglich des Unsicherheitsbereichs, andererseits ergibt er sich auch, wenn man den Effekt von zusätzlichen Zirruswolken durch den Flugverkehr für einen mittleren Strahlungsantrieb von 30 mWm^{-2} mit einrechnet.

Die Berechnung von Kosten pro Flugkilometer erfolgt durch die Multiplikation von Emissionen pro Flugkilometer und dem Kostenfaktor für den spezifischen Emissionstyp (dies geschieht analog zur Berechnung anderer Verkehrsmittel, wie zum Beispiel PKW). Die externen Kosten werden pro Einheit des verwendeten Brennstoffs ausgedrückt. Um dann die Besonderheit des Flugverkehrs mit aufzunehmen und die nicht-CO₂-bezogenen Auswirkungen mit einzubeziehen, wird empfohlen diese Werte dann noch mit dem EGF zu multiplizieren. Dieser Wert kann dann mit den gesamten CO₂-Emissionen eines Flugzeugs multipliziert werden um zu den Gesamtkosten dieses Flugzeugs für den Klimawandel zu gelangen. (CE Delft et al., 2008)

1.7 Referenzen

Anthoff et al., 2009

D. Anthoff, R.S.J. Tol, G.W. Yohe, Risk aversion, time preference, and the social cost of carbon, *Environmental Research Letters* 4, 2009

Anthoff, 2007

D. Anthoff, Report on marginal external damage costs inventory of greenhouse gas emissions, NEEDS Delivery n° 5.4 – RS 1b, 2007, http://www.needs-project.org/docs/results/RS1b/NEEDS_RS1b_D5.4.pdf

CAS, 2008

Quinet, Baumstark et al., La valeur tutélaire du carbone, Centre d'analyse stratégique (CAS), 2008

CASES, 2008

<http://www.feem-project.net/cases/>

CE Delft 2002

J.M.W. Dings, R.C.N. Wit, B.A. Leurs, ...[et al.], *External Costs of Aviation*, Delft : CE Delft, 2002

CE Delft et al., 2008

CE Delft et al., *Handbook on estimation of external cost in the transport sector*. Produced within the study: Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport (IMPACT), Delft, 2008.

DEFRA, 2007a

Economics Group, Defra, *The Social Cost of Carbon and the Shadow Price of Carbon: What they are, and how to use them in Economic Appraisal in the UK*, London, 2007.

DEFRA, 2007b

Economics Group, Defra, *How to use the Shadow Price of Carbon in policy appraisal*, London, 2007.

DETR, 2000

Valuing the External Costs of Aviation, London: Department of the Environment, Transport and the Regions, 2000.

DLR, 2006

Wolfram Krewitt, Barbara Schlomann, *Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern* Stuttgart/Karlsruhe : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)/ Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI), 2006

Downing 2005

T. Downing et al., *Social Cost of Carbon : A Closer Look at Uncertainty*, Final project report Oxford: SEI, Stockholm Environment Institute, 2005

Elzen et al., 2007

M.G.J.d. Elzen, P.L. Lucas, A. Gijsen, *Exploring European Countries' Emission Reduction Targets, Abatement Costs and Measures Needed Under the 2007 EU Reduction Objectives*. Netherlands Environmental Assessment Agency (MNP), Bilthoven, p. 155, 2007.

EU, 2007

Europäische Kommission (2007): *Begrenzung des globalen Klimawandels auf 2 Grad Celsius Der Weg in die Zukunft bis 2020 und darüber hinaus*. (SEK(2007) 7; SEK(2007) 8). <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0002:FIN:DE:PDF>

ExternE, 1997

P. Bickel (IER) et al., External Costs of Transport in ExternE, Luxembourg : European Commission, 1997

ExternE, 1998

N. Eyre et al., Global Warming Damages,, Luxembourg : European Commission, 1998

ExternE, 1999a

Externalities of Energy: Methodology Annexes, Luxembourg : European Commission, 1999

ExternE, 1999b

Externalities of Energy, Volume 7: Methodology 1998 update, 1999, Luxembourg : European Commission, 1999

ExternE, 2005

P. Bickel, R. Friedrich (eds.), Externalities of Energy, Methodology 2005 update, Luxembourg : European Commission, 2005

Fischer et al., 2009

A.M. Fischer, R. Sausen, D. Brunner, J. Staehelin, U. Schumann, Flugverkehr und Klimaschutz - Ein Überblick über die Erfassung und Regulierung der Klimawirkungen des Flugverkehrs, GAIA 18/1, S. 32 – 40, 2009

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., 2010

Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., CO2-Vermeidungskosten erneuerbarer Energietechnologien, <http://www.ffe.de/taetigkeitsfelder/techniken-und-potenziale-regenerativer-energien/70-co2-vermeidungskosten-erneuerbarer-energietechnologien>, 20.07.2010

Forster et al., 2007

P. Forster, V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G.M.S. Raga, R. van Dorland, 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: S. Solomon et al. (Editors), Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Forster et al., 2007b

P. Forster, K.P. Shine, N. Stuber, Corrigendum to “It is premature to include non-CO2 effects of aviation in emission trading schemes”, [Atmos. Environ. 40, S. 1117–1121, 2006], Atmospheric Environment 41 S. 3941, 2007

Friedrich, 2008

R. Friedrich, Note on the choice of values of marginal external costs of greenhouse gas emissions, Internal Discussion Paper in Project NEEDS, Stuttgart, 2008

Green book, 2003

Great Britain H.M. Treasury, The Green Book - Appraisal and Evaluation in Central Government, 2003

HEATCO, 2005

P. Bickel (et al.), Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO), Deliverable 2: State-of-the-art in project assessment, Stuttgart : Universität Stuttgart, 2005

HEATCO, 2006a

P. Bickel (et al.), Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and Project Assessment (HEATCO), Deliverable D5: Proposal for Harmonised Guidelines - Stuttgart: IER, Germany, Stuttgart, 2006.

HEATCO, 2006b

P. Bickel, Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and

- Project Assessment (HEATCO), Deliverable D6: Case Study Results, Stuttgart: IER, University of Stuttgart, 2006
- Hepburn, 2005**
C. Hepburn, Memorandum by Dr Cameron Hepburn, St Hugh's College, University of Oxford, 28. Februar 2005,
<http://www.publications.parliament.uk/pa/ld200506/ldselect/ldeconaf/12/12we10.htm>
- Hope, 2006**
C. Hope, The marginal impact of CO₂ from PAGE2002: an integrated assessment model incorporating the IPCC's five reasons for concern, *Integrated Assessment* 6 (2006), p. 1., 2006
- INFRAS, 2004**
M. Keller, Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA 2.1), INFRAS Berlin/Berne/Vienna : German Umweltbundesamt ; Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL), Austrian Umweltbundesamt, Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management, Austrian Ministry of Transport, Innovation and Technology, 2004
- IPCC, 1999**
IPCC, Aviation and the global atmosphere - A special report of IPCC working groups I and III. Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge : Cambridge University Press, UK, 1999
- IPCC, 2007a**
IPCC, Klimaänderung 2007: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger - Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4), Berlin 2007.
- IPCC, 2007b**
IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4), 2007
- JRC, 2007**
P. Russ, T. Wiesenethal et al., Global Climate Policy Scenarios for 2030 and beyond – Analysis of Greenhouse Gas Emission Reduction Pathway Scenarios with the POLES and GEM-E3 models,
<http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/111111111/6951>, 2007
- Kahn Ribeiro et al., 2007**
S. Kahn Ribeiro, S. Kobayashi, M. Beuthe, J. Gasca, D. Greene, D. S. Lee, Y. Muromachi, P. J. Newton, S. Plotkin, D. Sperling, R. Wit, P. J. Zhou, 2007: Transport and its infrastructure. In Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Krewitt und Schlomann, 2006**
W. Krewitt, B. Schlomann, Externe Kosten der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich zur Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern - Gutachten im Rahmen von Beratungsleistungen für das BMU, 2006
- Kuik et al., 2009**
O. Kuik, L. Brander, R. Tol, Marginal abatement costs of greenhouse gas emissions: A meta-analysis, *Energy Policy* 37, S. 1395–1403, 2009, doi:10.1016/j.enpol.2008.11.040, 2009
- Kuik, 2007**
O. Kuik, The Avoidance Costs of Greenhouse Gas Damage: A Meta- Analysis, 1th DRAFT, 30 November 2007 For the CASES project
- Lee et al., 2009**
D.S. Lee; D.W. Fahey; P.M. Forster; P.J. Newton; R.C.N. Wit; L.L. Lim; B. Owen; R.

- Sausen, Aviation and global climate change in the 21st century, Atmospheric Environment 43, S. 3520–3537, 2009
- Methodenkonvention, 2007**
Umweltbundesamt, Ökonomische Bewertung von Umweltschäden – Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten, Dessau, 2007
- McKinsey, 2009**
McKinsey & Company, Pathways to a Low-Carbon Economy - Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve, 2009
- National Academies of Science, 2010**
National Academies of Science, Hidden costs of energy - Unpriced consequences of energy production and use, Washington DC, 2010
- NEEDS, 2009**
<http://www.needs-project.org/>
- Nordhaus, 2007**
W. Nordhaus, The Challenge of Global Warming: Economic Models and Environmental Policy, New Haven, 2007
- Nordhaus, 2008**
W. Nordhaus, A Question of Balance, New Haven, 2008
- Parson, Fisher-Vanden, 1997**
E. A. Parson, K. Fisher-Vanden, Integrated assessment models of global climate change, Annual Review of Energy and the Environment, Vol. 22: 589-628 (Volume publication date November 1997), (doi:10.1146/annurev.energy.22.1.589), 1997
- Quinet et al., 2008**
A. Quinet, L. Baumstark, J. Célestin-Urbain, H. Pouliquen, D. Auverlot, C. Raynard, La valeur tutélaire du carbone, Centre d'analyse stratégique, Paris, 2008
- Risbey et al., 1996**
J. Risbey, M. Kandlikar, A. Patwardhan, Assessing integrated assessments, Climatic Change 34, p. 369-395, 1996
- Sausen et al., 2005**
R. Sausen, I. Isaksen, V. Grewe, D. Hauglustaine, D.S. Lee, G. Myhre, M.O. Köhler, G. Pitari, U. Schumann, F. Stordal, C. Zerefos, Aviation radiative forcing in 2000: An update on IPCC (1999), Meteorologische Zeitschrift, Vol. 14, No. 4, 555-561 (August 2005)
- SEC, (2007) 8**
Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius, The way ahead for 2020 and beyond, Impact Assessment, SEC(2007) 8, Brussels : Commission of the European Communities, 2007
- Stern, 2006**
Nicholas Stern, The Economics of Climate Change : The Stern Review, London : Cabinet Office - HM Treasury, 2006, http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm
- Stern, 2007**
N. Stern, The economics of climate change – The Stern review, Executive Summary, Cambridge, 2007
- Tol und Yohe, 2006**
R.S.J. Tol, G.W. Yohe, A Review of the Stern Review, World Economics Vol. 7 No. 4, S. 233-250, 2006
- TRL, 2001**
Consortium TRL, IWW, PTV, NEA and UA, A study on the cost of transport in the European Union in order to estimate and assess the marginal costs of the use of

transport, Volume 1, Literature Survey Berkshire : Transport Research Laboratory (TRL), 2001

Watkiss, 2005a

P. Watkiss et al., The Impacts and Costs of Climate Change, final Report prepared as task 1 of the project 'Modelling support for Future Actions : Benefits and Cost of Climate Change Policies and Measures', Brussels : Commissioned by European Commission DG Environment, 2005,
http://europa.eu.int/comm/environment/climat/pdf/final_report2.pdf

Watkiss, 2005b

P. Watkiss et al., The Social Cost of Carbon (SCC) Review: Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment, Final Report November, London: UK Defra, 2005

UBA, 2007

Umweltbundesamt, Ökonomische Bewertung von Umweltschäden -
Methodenkonvention zur Schätzung externer Umweltkosten, Dessau, April 2007