

*Draft*

## **CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel im deutschen Verkehrssektor eine multiagentenbasierte Partialanalyse**

Patrick Jochem, Institut für Wirtschaftspolitik und Wirtschaftsforschung (IWW)  
an der Universität Karlsruhe (TH), Gebäude 20.14, Kaiserstr. 12, D-76131 Karlsruhe,  
++49 (0) 721 608 4226, jochem@iww.uni-karlsruhe.de

**Key Words:** Verkehrssimulation, verhaltensbasiert, CO<sub>2</sub>, Zertifikatehandel, Multiagenten

### **Abstract:**

Der ehemalige Chefökonom der Weltbank Sir Nicolas Stern hat in den vergangenen Monaten wiederholt auf die potentiellen Auswirkungen der heutigen CO<sub>2</sub>-Emissionen hingewiesen. Eine forcierte Reduzierung der Treibhausgase sei nun unumgänglich.

Nun hat die Europäische Kommission einen Rechtsrahmen zur Reduktion der Emissionen im (insbesondere Deutschen) Verkehrssektor beschlossen. Letzterer ist der einzige deutsche Sektor, der seine Emissionen im Vergleich zu 1990 steigerte. Ein notwendiges Einlenken ist nicht in Sicht und bereits eingeführte politische Maßnahmen greifen nur unzureichend. Eine potentielle Erweiterung des bestehenden CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandels der Industrie auf den Verkehrssektor könnte eine Lösung darstellen. Durch einen offenen upstream CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel im Verkehr, der bei den Mineralölkonzernen ansetzt, würde das CO<sub>2</sub>-Reduktionsziel des Verkehrssektors durch Reduktionen in anderen Sektoren erreicht werden, ohne dabei die Verkehrsteilnehmer unnötig zu belasten.

Ein solcher Zertifikatehandel wird in diesem Papier in ein vorläufiges verhaltensorientiertes multiagentenbasiertes Simulationsmodell integriert, welches bereits erste Ergebnisse liefert. Mit dem vollständigen Modell soll es dann möglich sein verschiedene Zertifikatesysteme miteinander hinsichtlich der Auswirkungen auf die Verkehrsteilnehmer, Mineralölkonzerne, Automobilhersteller, (Speditionen und Fuhrunternehmer) sowie makro- und umweltökonomische Faktoren zu vergleichen.



## Einleitung

Der Straßenverkehr trägt im erheblichen Maße durch Schall- und Teilchenemissionen (Feinstaub, Luftschadstoffe und Klimagasen) sowie durch Flächen- und Ressourcenverbrauch zu negativen Auswirkungen auf die natürliche Umwelt, die Gesellschaft und die Wirtschaft bei. Während Schallemissionen und konventionelle Schadstoffe durch technische Standards, Verhaltensvorschriften und passive Lärmschutzinvestitionen direkt vermindert bzw. indirekt reduziert werden können, sind die Treibhausgasemissionen unmittelbar mit der Verbrennung fossiler Energieträger gekoppelt. Diese können nur durch höhere Effizienz, Substitution des Kraftstoffs oder Änderung des Modalsplits vermindert werden. Sie tragen wesentlich zum anthropogen verursachten Klimawandel bei.

Die bekannten Szenarien à la Sir Nicolas Stern über die mögliche Beeinträchtigung des künftigen BIP durch heutige CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 20 % auf der einen Seite sowie die bisher weitestgehend ungenutzten großen Minderungspotentiale im Straßenverkehr auf der anderen Seite verdeutlichen die Problematik. Zudem sind unter Vernachlässigung von Prestige-, Sicherheits- und Komfortattributen die Grenzvermeidungskosten im motorisierten Individualverkehr (MIV) für CO<sub>2</sub> negativ (vgl. PRIMES); d.h. für eine eingesparte Tonne CO<sub>2</sub> ließen sich auch ohne Zertifikate schon Gewinne erzielen.

Es besteht also dringender Handlungsbedarf, welcher neben technischen Innovationen politisch unterstützt werden sollte. Politische Instrumente zur Emissionsminderung im Verkehr können in ordnungspolitische (Auflagen, Ge- und Verbote), informatorische, freiwillige (u. a. Selbstverpflichtungen) und ökonomische (Steuern, Abgaben und Zertifikate) Konzepte untergliedert werden. Neben einer Einschätzung der Instrumente bezüglich ihrer Zielkonformität, Systemkonformität, Kosteneffizienz (in denen der Zertifikatehandel überzeugt) und institutionelle Beherrschbarkeit ist die Untersuchung möglicher Auswirkungen auf schwach gestellte Haushalte, sowie Reaktionsverhalten der Verkehrsteilnehmer (Ausweichmechanismen) von großer Wichtigkeit. Hierfür sind Multiagentenmodelle besonders geeignet, da die Entscheidungen im motorisierten Individualverkehr sehr individuell, habitualisiert (d.h. nicht fallspezifisch rational) und auf Grundlage verzerrter Wahrnehmung der Individuen getroffen werden.

Das vorliegende Modell konzentriert sich zunächst auf eine Ausgestaltungsmöglichkeit eines Zertifikatehandels im MIV. In der vollständigen Version werden dann mehrere Ausprägungen politischer Instrumente im Straßenverkehr (inkl. Straßengüterverkehr) miteinander verglichen werden. Würde man bei einer Zertifikatelösung eine vollständige Überwälz des angenommenen

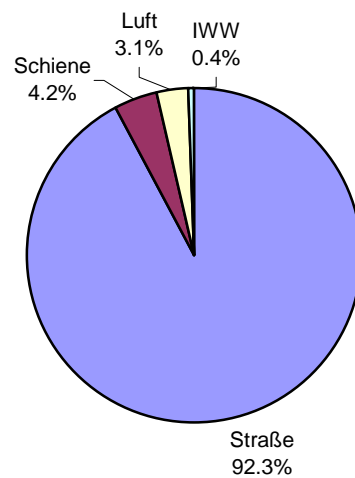
Zertifikatepreisen von etwa 20 €/t (29.01.07: 2,40 €/t!) unterstellen, so würde hieraus ein Aufpreis von etwa vier ein halb Cent pro Liter entstehen, den der Endverbraucher (Verkehrsteilnehmer) jedoch wohl nicht von einer zusätzlichen Steuererhöhung (Mineralöl-, Öko- oder Mehrwertsteuer) unterscheiden würde. Die Modellergebnisse bestätigen ein großes Einsparungspotential unter gleichzeitig zumutbaren Belastungen der Haushalte und unterstützen die Hypothese der Nettozahlerposition des Verkehrssektors sowie einer Stimulierung technischer Innovationen seitens der Industrie.

Neben den partialanalytischen Untersuchungen des Multiagentenmodells können auch weitere makroökonomische Auswirkungen einem Impact Assessment unterzogen werden. Hierfür wird eine Schnittstelle an das systemdynamische Modell ASTRA (Schade, 2005) konzipiert werden.

Im Folgenden wird nach einer kurzen Einführung in die politischen Instrumente zur Reduktion der verkehrsbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen die Einführung eines CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandels begründet und auf seine Ausgestaltungsmöglichkeiten hin untersucht. Anschließend wird eine Ausgestaltungsmöglichkeit in ein verhaltensorientiertes Multiagentenmodell übertragen und dessen Auswirkungen auf den CO<sub>2</sub>-Markt analysiert. Eine Zusammenfassung rundet das Papier ab.

## **Verkehr in Deutschland und politische Instrumente zur Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen**

Da der Straßenverkehr mit einem ansteigenden und weitaus größten Anteil an den vom Verkehr verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen (weit über 85 %) beteiligt ist (Abbildung 1 und 2) werden andere Verkehre zunächst vernachlässigt. Dies gilt insbesondere, wenn indirekte Emissionen (u. a. durch die Stromerzeugung für die Bahn) vernachlässigt werden, wodurch ein Anteil von 92 % der verkehrsverursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen zugerechnet werden kann (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1: CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Verkehrssektors in 2004 ohne indirekte Emissionen (204 Mt).

Quelle: Deutsches Verkehrsforum, 2006.

Neben dem Straßengüterverkehr trägt insbesondere der Flugverkehr zu den ansteigenden Emissionen des Verkehrssektors bei. Dessen CO<sub>2</sub>-Emissionen stiegen in der EU-25 zwischen 1990 und 2003 um 73 % trotz erheblichen Effizienzsteigerungen der Flugzeuge (EEA, 2005). Die Vorhersage, dass die Emissionen sich in der nächsten Dekade verdoppeln werden verdeutlichen die Dringlichkeit des Problems (Eyres et al., 2004 und Wit et al., 2005). Dies gilt insbesondere, da CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Tropopause zwei bis vier mal so effektiv zum Treibhauseffekt beitragen wie Emissionen in der tieferen Troposphäre (IPCC, 1999). Dennoch ist die Einführung eines Politikinstrumentes im Flugverkehr besonders schwierig, da (bei nicht vollständigem Mitspielen der Anrainerstaaten) Ausweichmechanismen schwierig zu vermeiden sind (Wit et al., 2005 und Wit und Dings, 2002). Deswegen wird im Folgenden lediglich der Straßenverkehr betrachtet.

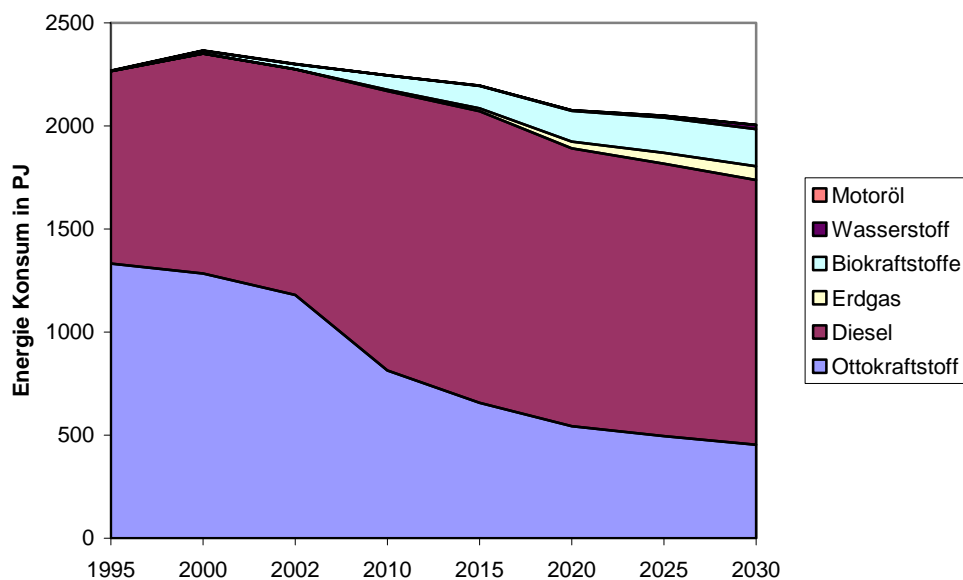
### Prognosen des Straßenverkehrs

In den neunziger Jahren wurden Effizienzsteigerungen im Kraftstoffverbrauch der Pkw jedoch (gelenkt von den Verbrauchern) dazu verwendet die Fahrzeuge starker zu motorisieren, deren Außenmaße zu vergrößern sowie mit weiteren Annehmlichkeiten auszustatten („upsizing“). Hierdurch wurden die Pkw bei konstantem Verbrauch größer und schneller. Durch die gestiegene

Fahrleistung erhöhten sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in Deutschland zwischen 1990 und 2004 um 5,4 %.

Aber es gibt wesentliche Unterschiede zwischen dem Güter- und dem Personenstraßenverkehr. Während die Emissionen des Ersteren besonders durch die EU-Osterweiterung (Wegfall der Handelsbarrieren und Produktionsstättenverlagerung) um ca. 20 % anwuchsen, sanken die Emissionen im Personenverkehr im gleichen Zeitraum um 4 %. So verkleinerte sich der Anteil der durch den motorisierten Individualverkehr verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen am Gesamtausstoß des Straßenverkehrs von 72 % in 1990 auf 68 % in 2004.

Abbildung 2: Entwicklung der Energienachfrage des deutschen Straßenverkehrs zwischen 1995 und 2030

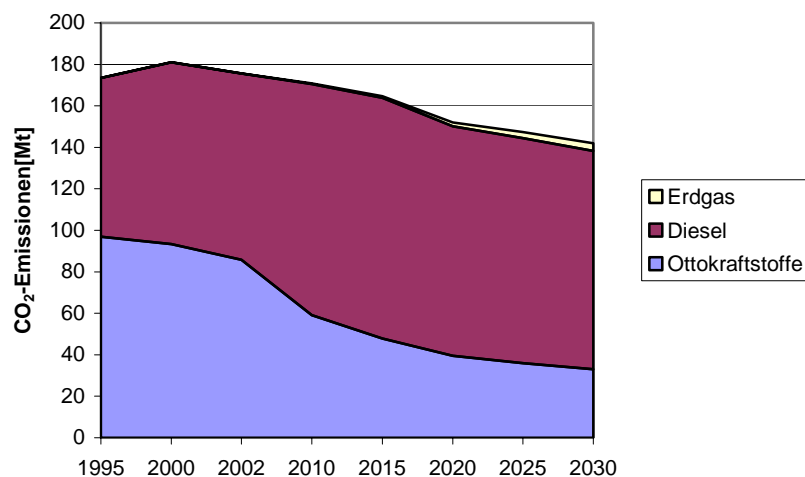


Quelle: EWI und PROGNOSE, 2005.

Die weitere Entwicklung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des deutschen Verkehrssektors bis 2020 wurden u. a. vom Modell TREMOD (IFEU, 1999) sowie von EWI und Prognos prognostiziert. Das TREMOD-Modell legte hierbei die Annahme einer ansteigenden Kilometerleistung des MIV von 25 % zwischen 2000 und 2020 zugrunde. Zumkeller et al. (2005) hingegen gehen zwar auch weiterhin von einer fortschreitenden Motorisierung der Bevölkerung aus, jedoch gleichzeitig von einer stagnierenden Kilometerleistung des Straßenverkehrs („Verlagerung“). Hierdurch liegt eine Abnahme des Kraftstoffkonsums nahe, da im Hinblick auf den konventionellen Kraftstoffverbrauch eine deutliche Effizienzsteigerung der Pkw in den kommenden Jahren angenommen werden kann (vgl. Abbildung 3). Entsprechend werden CO<sub>2</sub>-Emissionen vermieden (vgl. Abbil-

dung 4). Eine Reduktion der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen von Pkw unter 100 g/km bis 2020 erscheint realistisch, so dass die Prognosen von EWI und Prognos (2005) überzeugen; das TREMOD Modell (Diaz-Bone et al., 2001) jedoch durch die o. g. Annahmen ein weiteres Ansteigen der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs vorhersehen, was dem Trend der letzten Jahre widerspricht.

Abbildung 4: Entwicklung der vom deutschen Straßenverkehr verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 1995 und 2030



Quelle: EWI und Prognos, 2005.

Aus diesen Gründen wurde in dem hier verwendeten Modell die Erneuerung der Flotte als eine endogene Funktion in Abhängigkeit vom Einkommen, Benzinpreis, dem Alter und Hubraum des bisherigen Fahrzeugs und der Nutzung (Geschäftlich/Privat) implementiert. Bei starken Preissteigerungen des Kraftstoffes werden die Verkehrsteilnehmer ihren Fahrzeugbestand nach und nach durch effizientere Fahrzeuge erneuern.

### Warum eigentlich einen Zertifikatehandel?

Wie bereits dargelegt kann die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Verkehrssektors neben dem Zertifikatehandel auch aufgrund einer Vielzahl von weiteren Politikinstrumenten erfolgen. Wie sehr die Instrumentarien jedoch ökonomisch fundiert werden können ist in Rennings et al. (1997, 20) in Anlehnung an Grosseckler (1991) dargelegt. Diese Evaluation der politischen Instrumente basiert auf vier Kriterien: Ziel- und Systemkonformität, Kosteneffizienz sowie institutionelle Kontrollierbarkeit.

Der Deutsche Verkehrssektor wurde in den letzten Jahren vermehrt auf eine mögliche Einführung eines Zertifikatehandels hin untersucht. Neben großen Studien von IFEU (2001 und 2003) und FIFO (2005) waren es auch kleinere Studien (PWC, 2002 oder Deuber, 2002 oder Wit et al., 2002 und 2005), die jedoch entweder zu widersprüchlichen oder zu mehrdeutigen Ergebnissen kamen. Eine modellgestützte Analyse blieb bisher aus da die in der angewandten Forschung benutzten Simulationsmodelle (ASTRA, TREMOVE oder TRANS-TOOLS) derzeit noch nicht über ein entsprechendes Modul verfügen.

### *Ein kurzer Instrumentenvergleich*

Während bisher politische Eingriffe in Europa im Wesentlichen auf Regulierungen, Gebühren und Steuern (beispielsweise Mineralölsteuer, Ökosteuern, Kfz-Steuer) basierten, stehen heutzutage neben dem Zertifikatehandel informatorische und freiwillige Selbstverpflichtungen im Vordergrund. So beispielsweise der Verband europäischer Automobilhersteller (ACEA), der 1998 mittels einer freiwilligen Selbstverpflichtungserklärung gegenüber der Europäischen Kommission eine Reduktion der durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen seiner verkauften Flotte von 198 g/km auf unter 140 g/km bis 2008 versprach. Ähnliche Erklärungen folgten von Japanischen und Koreanischen Automobilherstellern. Zusätzlich beschloss nun der Europäische Ministerrat die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2012 gesetzlich auf 130 g/km zu reduzieren. Gerade bezogen auf die Zielkonformität und das Reduktionsziel des Kyoto-Protokolls sind alle bisherigen Instrumente jedoch nicht effektiv genug.

Freiwillige Selbstverpflichtungen haben den Nachteil, dass sie keine absoluten Reduktionsziele formulieren können, sondern spezifische bevorzugen, da weder ein Verstoß eines Partners die Verpflichtungen der anderen Beeinträchtigt, noch die Nachfrage der Konsumenten einen Einfluss auf die Zielerreichung nehmen kann. Spezifische Beschränkungen im Umweltbereich beinhalten jedoch das Risiko, dass bei stark ansteigender Nachfrage (nach Fahrzeugen) das unter ökologischen Aspekten wichtige absolute Ziel weit verfehlt wird. Zudem bezieht sich die Richtlinie lediglich auf die aktuell verkaufte Pkw-Flotte und vernachlässigt den Bestand. Da die Fahrzeuge jedoch durchschnittlich sieben Jahre genutzt werden, ist die tatsächliche Penetrationsdauer wesentlich verzögert.

Ordnungsrechtliche Politikinstrumente (Ver- und Gebote) zur Emissionsminderung hindern Akteure deren technische Potentiale über das gesetzte Limit hinaus auszuschöpfen. Dies führt zu Ineffizienzen, da diese möglicher Weise kostengünstigeren Minderungspotentiale nicht ausgenutzt werden. Somit ist das Ordnungsrecht eher für eine akute Gefahrenabwehr geeignet, was im Hinblick auf den langatmigen Klimawandel nicht zutrifft.

Ökonomische Instrumente (Steuern, Abgaben und Zertifikate) beeinflussen hingegen die Reduktionsaktivitäten der einzelnen Akteure nur indirekt. Dabei kann entweder der Preis der Emissionen (Steuern und Abgaben) oder aber die absolute Emissionsmenge (Zertifikate) vorgegeben werden. Die Individuen können jedoch zwischen Steuerzahlungen bzw. Zertifikatekäufen oder Emissionsreduzierungen frei entscheiden. Zudem kann eine zeitliche Flexibilisierung ermöglicht werden, da die Emittenten in der Regel entsprechend ihrer spezifischen Bedingungen einen individuellen Investitionszeitpunkt selbst bestimmen können. Bei einer Steuererhebung ist jedoch eine exakte Zeilerreichung in der Praxis unwahrscheinlich, da die konkreten Vermeidungskosten der Unternehmen oder Haushalte unbekannt sind. Der Zertifikatehandel hingegen kann die Anzahl der Emissionen direkt beschränken, so dass eine exakte Zeilerreichung garantiert werden kann. Bei Bedarf kann eine Obergrenze der Zertifikatepreise (z.B. durch garantierten Zukauf des Staates auf anderen Zertifikatemärkten, oder direkten Subventionen) eingeführt werden.

Ein weiterer entscheidender Vorteil der ökonomischen Instrumente ist der Innovationsanreiz. Jede Emissionsreduktion, die zu geringeren Grenzvermeidungskosten als der Zertifikatepreis bzw. des Steuersatzes erreicht werden kann, erhöht die Gewinne der einsparenden Unternehmen. Aus diesem Grund wird eine beschleunigte Innovationsfreudigkeit der Unternehmen bzw. der Haushalte erwartet.

Theoretisch überzeugt damit der CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel in den drei Punkten Ziel- und Systemkonformität sowie Kosteneffizienz. Durch den übergeordneten (beispielsweise sektor- oder handelsmarktbezogen) Zielbezug der Emissionsbegrenzung genießen die einzelnen Akteure ein hohes Maß an Entscheidungsfreiheit (Systemkonformität). Werden die Preissignale richtig und vollständig verstanden, so werden die Unternehmen mit den geringsten Grenzvermeidungskosten ihr Einsparungspotential ausschöpfen und hierfür belohnt werden; dies führt zur kostenminimalen Vermeidung (Kosteneffizienz). Durch eine absolute und überprüfbare Zielformulierung, wird dieses genau erreicht (Zielkonformität). Lediglich bei der institutionellen Kontrollierbarkeit kann aufgrund der in Europa fehlenden empirischen Erfahrung keine eindeutige Aussage getroffen werden.

Besonders im Verkehrssektor sollte ein zusätzlicher Faktor Beachtung finden. Der Verkehrssektor ist durch eine Vielzahl an mobilen Emissionsquellen charakterisiert, deren genaue Überwachung der tatsächlich emittierten Emissionen und gehaltenen Zertifikaten technisch nur mit sehr großem Aufwand möglich ist. Diese hohen (Überwachungs- und Transaktions-) Kosten werden gerne als Gegenargument für eine Einführung eines Zertifikatehandels im Verkehrssektor angebracht (u. a. Brockmann et al., 1999: 100ff. und Raux und Marlot, 2005: 262). Da im Verkehrsbe-



reich jedoch kein marktfähiger CO<sub>2</sub> Filter vorliegt und somit bei der Verbrennung eines Liters Kraftstoffes zwangsmäßig der gleiche CO<sub>2</sub>-Anteil anfällt ist die Überwachung der Kraftstoffnachfrage und eine personengenaue Messung mittels einer Erhebung an der Zapfsäule völlig ausreichend.

#### *Bereits implementierte Politikmaßnahmen zur Reduzierung der CO<sub>2</sub> Emissionen im Verkehr*

Bereits seit 1985 werden in der Kfz-Steuer zwischen verschiedenen Emissionsklassen unterschieden, bei der emissionsärmere Pkw steuerlich bevorzugt werden. Ein weiteres Instrument wurde im April 1999 eingeführt: Die Ökosteuer, welche zunächst Kraftstoffe mit einem Steuerbetrag von 3,07 €Cent pro Liter belegte. Dieser wurde jeweils im Januar der kommenden Jahren bis 2003 dann sukzessive angehoben (6,14, 9,21, 12,28 und 15,35 €Cent pro Liter Kraftstoff).

2005 wurde auf Bundesautobahnen die Lkw-Maut für Lkw über 12 t eingeführt. Der Mautsatz beträgt in Abhängigkeit von der Achsenlast und der Emissionsklasse zwischen 9 und 14 €Cent pro Kilometer. In den nächsten Jahren soll der Durchschnittsmautsatz von derzeit 12,4 €Cent auf 15 €Cent begleitet von einer Steuerentlastung der Frachtführer angehoben werden. Zudem müssen seit 2007 gemäß dem Energiesteuergesetz nicht nur alle verkauften Kraftstoffe wie seit 2003 schwefelfrei sein (Schwefelanteil < der Nachweisgrenze von 10 ppm  $\hat{=}$  0,001 Gewichtsprozent), sondern unterliegen auch einer Beimischungspflicht mit organischen Kraftstoffen. Diese schreibt eine Beimischungsquote von 4,4 % für organischen Diesel und 2 % für organische Kraftstoffe in Ottokraftstoffen vor (wobei die organischen Kraftstoffe nun auch einer Besteuerung unterliegen). Diese Quoten werden in den nächsten Jahren weiter angehoben. Dabei bleiben lediglich die organischen Kraftstoffe der zweiten Generation (u.a. durch das Fischer-Tropsch-Kraftstoff-Verfahren gewonnene Kraftstoffe, die ganze Pflanzen verarbeiten; „Biomass-to-Liquid-Fuels“) unbesteuert. Zudem müssen seit November 2004 alle zum Verkauf stehenden Autos neben dem (genormten) Durchschnittsverbrauch auch mit den damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen gekennzeichnet sein. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bisher hinsichtlich der Kohlendioxydemissionen keine „harte“ Begrenzung im Gegensatz zu vielen anderen (filterbaren) Schadstoffen (NO<sub>x</sub>, Partikel, CO, HC) bestehen.

Neben diesen direkten Eingriffen wurden aber auch vermehrt informatorische Instrumente zur Emissionsminderung (insbesondere zur Änderung des Modalsplits) eingesetzt. So zeigten beispielsweise auch Zinn et al. (2003) und Hunecke et al. (2005), dass mit monetären Anreizen alleine der individuelle Wechsel zu anderen Verkehrsmitteln nicht möglich ist, da Haushalte nicht ausreichend auf die gestiegenen Kraftstoffpreise reagieren (geringe Preiselastizität). Aufgrund

dieser Erkenntnis sollten mehrere politische Instrumente sich gegenseitig unterstützen und die Eigenschaften der einzelnen Nutzergruppen ggf. individuell berücksichtigen (Schubert, 2004).

Zusammenfassend überzeugt der Zertifikate hinsichtlich Ziel- und Systemkonformität sowie Kosteneffizienz. Insbesondere das "faire" Erreichen (Systemkonformität) des absoluten Ziels ist ein entscheidender Vorteil. Da aber unerwartete Reaktionen (beispielsweise exorbitante Kraftstoffpreise oder Ausweichverhalten seitens der Individuen wie Kauf der Salatöle) den Erfolg einer Einführung unmittelbar und entscheidend beeinflussen würden, erscheint eine individuenbezogene Simulation des Verkehrssektors vorteilhaft. Für diese Art der Simulation eignen sich Multiagentenmodelle besonders, da sie sehr differenziert kalibriert werden können. Mit einem solchen Modell können auch Quersubventionen vom Verkehrssektor (der eine hohe Zahlungsbereitschaft für CO<sub>2</sub>-Emissionen hat) zu anderen am Zertifikatehandel teilnehmenden Sektoren (u. a. Industrie) untersucht werden. Zunächst sollen hier jedoch die unterschiedlichen Ausgestaltungsmöglichkeiten des Handelssystems aufgezeigt werden.

## **CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel und dessen Ausgestaltungsmöglichkeiten im Verkehrssektor**

Im Kyoto-Protokoll versprachen weit über 150 Regierungschefs eine CO<sub>2</sub>-Emissionsbeschränkung bis 2012 ohne gleichzeitig ein Instrument zur Erreichung dieser Ziele festzulegen. Die Europäische Union entschied sich (u. a.) in einigen Sektoren einen Zertifikatehandel (ETS) einzuführen, der gegenwärtig jedoch den Verkehrssektor (noch) ausspart. Allerdings gerät eine Aufnahme immer stärker in die derzeitige Diskussion. Mögliche Ausgestaltungsoptionen sollen im Folgenden kurz aufgezeigt werden.

### **Up- vs. downstream**

Obwohl ein Zertifikatehandel immer direkt bei der zuzertifizierenden Emission ansetzen sollte, kann im Verkehr den Zertifikatehandel (im Prinzip) an jeder beliebigen Stelle der Energieflusskette ansetzen, da Kohlendioxidemissionen bei der Verbrennung des Kraftstoffes mit einem konstanten Faktor einhergehen. Sowohl bei der Kraftstoffproduktion (upstream) beim Handel (midstream) oder beim Konsumenten (downstream) ist eine Implementierung denkbar, ohne dass

hierdurch Nachteile in der Zielkonformität hingenommen werden müssten. So dass bei einem Upstream-Modell nicht direkt die Emittenten betroffen sind, sondern nur indirekt, da die Mineralölkonzerne die Preise der Zertifikate auf die Kunden abwälzen werden (wie im deutschen Elektrizitätssektor geschehen). Der entscheidende Nachteil an einem Downstream-Ansatz sind die hohen Transaktionskosten; der Vorteil zeigt sich in der direkten und offensichtlichen Beeinträchtigung der Emittenten.

### **Offen vs. Geschlossen**

In einem Offenen-(Geschlossenen-)System können die Zertifikate (weder) mit anderen Sektoren (noch)/sowie mit dem Ausland gehandelt werden. Da die Zahlungsbereitschaft im Verkehrssektor für Zertifikate sehr hoch sind, wird durch ein geschlossenes System der Preis entsprechend steigen, wohingegen bei einem offenen System eine Quersubventionierung zu den anderen Sektoren erwartet wird, da diese bereit sind kostengünstiger zu reduzieren. Die Belastung wäre also niedriger (insbesondere bei Berücksichtigung von flexiblen Mechanismen wie CDI und JI).

### **Absolute vs. spezifischer Budgets**

Wenn spezifische Ziele die Einführung des Zertifikatehandels auf Grund von Marktgegebenheiten oder starker individueller (einseitiger) Einschränkungen erleichtert, so kann dies sinnvoll sein. Jedoch gefährdet dies gleichzeitig die Einhaltung des absoluten Ziels, da Nachfrageschwankungen nicht reglementiert werden. Hierfür können auch so genannte „Gateway“-Konstruktionen zum Ausgleich der Nachfrageschwankungen eingeführt werden, welche jedoch den Staatshaushalt erheblich belasten können, da sie bei stark gestiegener Nachfrage eben entsprechend viele Zertifikate aus Zertifikatmärkten mit absoluten Budgets nachkaufen müssen.

### **Ansatzpunkte des Zertifikatehandels im Verkehrssektor**

Wie bereits angedeutet gibt es für einen Zertifikatemarkt im Verkehrssektor eine Vielzahl an Anknüpfungspunkten. Neben den möglichen Marktteilnehmern der Energiehandelskette (Produzenten, Händler und Konsumenten) kann auch zwischen den Produkten (Kraftstoff, Verkehrsmittel und Verkehrsdienstleistung) und dem Zweck (Personen- vs. Güterverkehr) unterschieden werden.

Somit kann man für den Personen- und Güterverkehr jeweils neun Anknüpfungspunkte identifizieren (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Mögliche Anknüpfungspunkte des Zertifikatehandels im Verkehr.

Handelsebene	Hersteller	Händler	Konsument
<b>Produktebene</b>			
<b>Kraftstoff</b>	Raffineriebetreiber	Tankstellenbetreiber	Kfz-Fahrer
<b>Verkehrsmittel</b>	Kfz-Hersteller	Kfz-Händler	Kfz-Käufer
<b>Verkehrsdienstleistung</b>	Bus-, Bahn u. Tram- betreiber, Fracht- führer, Car Sharing	Reisebüro, Spedition	Verkehrsteilnehmer

Die Ausgestaltungsmöglichkeiten sind demnach vielfältig. Sowohl im Personen-, als auch im Güterverkehr können nun neun verschiedene Anknüpfungspunkte in einem offenen oder geschlossenen System mit spezifischem oder absolutem Zielwert unterschieden werden. Daraus ergeben sich zunächst jeweils 36 Möglichkeiten, worunter jedoch viele bereits in den Vorbetrachtungen unzweckmäßig erscheinen.

Dem Up-Stream-Ansatz können demnach lediglich die Raffinerien (+ Import) zugeordnet werden. Pkw-Fahrer, Frachtführer, Autokäufer sowie die Kunden von ÖPNV und Car-Sharing sind im Down-Stream-Ansatz direkt betroffen und Autohersteller, Mineralölkonzerne, Autohändler, Frachtführer sowie ÖPNV-Betreiber im Mid-Stream-Ansatz.

Neben dem Ansatzpunkt des Zertifikatehandels ist noch die Anfangsverteilungsfrage zu klären. In der Literatur werden im Wesentlichen drei Möglichkeiten aufgeführt. Der Festpreisverkauf, die Auktion oder die kostenlose Zuteilung („Gandfathering“). Im ETS sollte der nationale Anteil an versteigerten Zertifikaten mindestens 5 % betragen. In Deutschland wurden (praktisch) alle Zertifikate zunächst kostenlos nach einem Emissionsplan (NAP) vergeben, der insbesondere an historischen Emissionen und Emissionsreduktionen (unter Berücksichtigung sog. „Early Actions“) ausgerichtet war.

Während die Auktion im Hinblick auf die politische Akzeptanz und Durchführbarkeit Schwierigkeiten bereitet, beinhaltet die kostenlose Zuteilung das Risiko der falschen Zuteilung sowie in der umständlichen Einordnung neuer Markteinstiger, die von Emissionsplänen „eher benachteiligt werden“ (Koschel et al., 1998: 58ff.).

Interessanter Weise muss der Verkehrssektor nicht a priori zum Nettozahler eines offenen Zertifikatehandels werden, da zwar dessen Zahlungsbereitschaft seitens der Nutzer sehr hoch ist, die tatsächlichen Einsparungspotentiale (abgesehen von Komfort-, Sicherheits-, Emotional- und Statusmotiven) jedoch direkte finanzielle Vorteile des Verkehrsteilnehmers darstellen. So amortisiert sich beispielsweise der neue POLO BlueMotion von Volkswagen (gleiche Ausstattung wie der POLO, jedoch im Verbrauch um 0,7 Liter sparsamer auf 100 Kilometer) bereits nach 65 000 km. Goodwin et al. (2004) begründete die geringe Preiselastizität beim Autokauf mit dem kurzen Zeithorizont der Entscheider, welche maximal die ersten drei Jahre (und nicht über die erwartete Lebensdauer des Autos) an Kraftstoffeinsparungen mit in die Kaufentscheidung einfließen lassen (NRC, 2002 und Annema et al., 2001), so dass eine CO<sub>2</sub>-Steuer alleine wohl keinen gewünschten Effekt erbringen wird.

## Multiagentensimulation des deutschen Verkehrssektors

Das Konzept der Multiagentensimulation versucht einige Schwächen der konventionellen (upstream) Modellansätze durch eine objektorientierte downstream Perspektive zu ergänzen. Dies erleichtert individuelles Verhalten sowie verzerrte Wahrnehmungen darzustellen. Die Multiagentensimulation basiert auf vielen Disziplinen wie Ökonomie und Spieltheorie, Programmierung sowie weiteren von der Thematik abhängenden Sozial- und Naturwissenschaften (Wooldridge, 2002). Neben der Anwendung in verschiedenen Disziplinen wurde auch der Begriff des Agenten auf sehr unterschiedliche Art und Weise eingesetzt. Eine oft zitierte Definition von Wooldridge und Jennings (1995) besagt, dass Agenten einer Multiagentensimulation charakterisiert sind durch seine Autonomie (Fähigkeit *selbstständig* Entscheidungen zu treffen), seine sozialen Fähigkeiten (Fähigkeit mit anderen Agenten in *Kontakt zu treten*), seine Reaktivität (Fähigkeit auf die wahrgenommene Umwelt zu *reagieren*) und seine Proaktivität (Fähigkeit aus *eigener* Initiative eine (zielführende) Aktion zu starten). Jedoch erfüllen in der Praxis viele Agenten in umgesetzten Multiagentenmodellen diese Eigenschaften nicht und begnügen sich mit weicheren Definitionen (Drogoul et al., 2002).

Ein weiterer kritischer Faktor ist die Unterscheidung in netzbasierte- und verhaltensorientierte Modelle. Im Verkehr wurden bisher insbesondere die netzbasierten Modelle in der Multiagentensimulation umgesetzt. Im deutschsprachigen Raum sind hier insbesondere Kay Axhausen (ETH, Zürich) und Kai Nagel (TU Berlin) zu nennen, die erfolgreich Routenwahl, Staus und Bottlenecks in lokalen Netzen simulierten. Auch viele weitere Multiagentenmodelle in Europa sind netzbasier-

te Modelle wie beispielsweise MOBITOPP, ILUMAS, MATSIM, VISEM, DynaMIT, DynaSMART, LEGO, FAMOS, MITSIM und TRANSIMS.

### *Modellversion 0.3*

In der entwickelten vorläufigen Modellversion 0.3 gehen als Input Haushalte mit gewissen Eigenschaften (aus dem deutschen Mobilitätspanel) sowie (stark vereinfacht) drei Mineralölkonzerne ( $m=1,2,3$ ) mit gleichen Marktanteilen ein. Zunächst werden 5 000 Haushalte ( $i=1,2,\dots,5\ 000$ ) aus 170 empirischen Haushalten der Mobilitätspannelerhebung 2004 gewonnen („aufgebläht“), welche im Basisjahr eine gewisse Fahrleistung gemäß der empirischen Daten aufweisen. Aus dieser (kombiniert mit dem haushaltsspezifischen Durchschnittsverbrauch pro 100 Km) resultiert direkt die nachgefragte Menge an Kraftstoff und damit auch die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Haushalte. Diese Emissionen müssen am Ende einer Handelsperiode (ein Jahr) mit den ausgegebenen Zertifikaten an die Mineralölkonzerne übereinstimmen. Diese Zertifikateerstattung ist im ersten Simulationsjahr zunächst vereinfacht um 2 % höher als die Nachfrage, geht dann in den folgenden Jahren aber jeweils um ein Prozent zurück.

Die Betroffenen des Zertifikatehandels sind die Mineralölkonzerne; um keine Strafzahlungen zahlen zu müssen, dürfen sie das jährlich zugeteilte Budget an CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht überschreiten. Verkaufen die Händler dennoch mehr Kraftstoffe, als sie Berechtigungen vorweisen können, so müssen sie vor Jahresende weitere Berechtigungen an der CO<sub>2</sub>-Zertifikate-Börse besorgen. Hierfür wurde den Mineralölkonzernen eine Kaufreaktionsfunktion unterstellt, welche sich im Wesentlichen an einem täglichen Ausgleich orientiert. Dabei geht einer der Mineralölkonzerne von einem steigenden, ein weiterer von einem fallenden und ein dritter von einem konstanten Absatz des Kraftstoffs aus. Die Preise für die Zertifikate sind im Wesentlichen durch den Handel der anderen Sektoren vorgegeben. Diese kommen aus dem Modell PowerAce ([www.iw.uni-karlsruhe.de/powerace](http://www.iw.uni-karlsruhe.de/powerace)).

Der Kern des Modells besteht nun aus einer Schleife, die 264 ( $t=1,2,\dots,264$ ) mal pro Jahr ( $n=1,2,\dots,10$ ) wiederholt wird und somit jeden Börsentag eines Jahres repräsentiert. Die Fahrleistung aus dem Deutschen Mobilitätspanel wird auf einen individuellen Durchschnittstag übertragen, der sich dann ohne Feiertag und Wochenende 264-mal wiederholt.

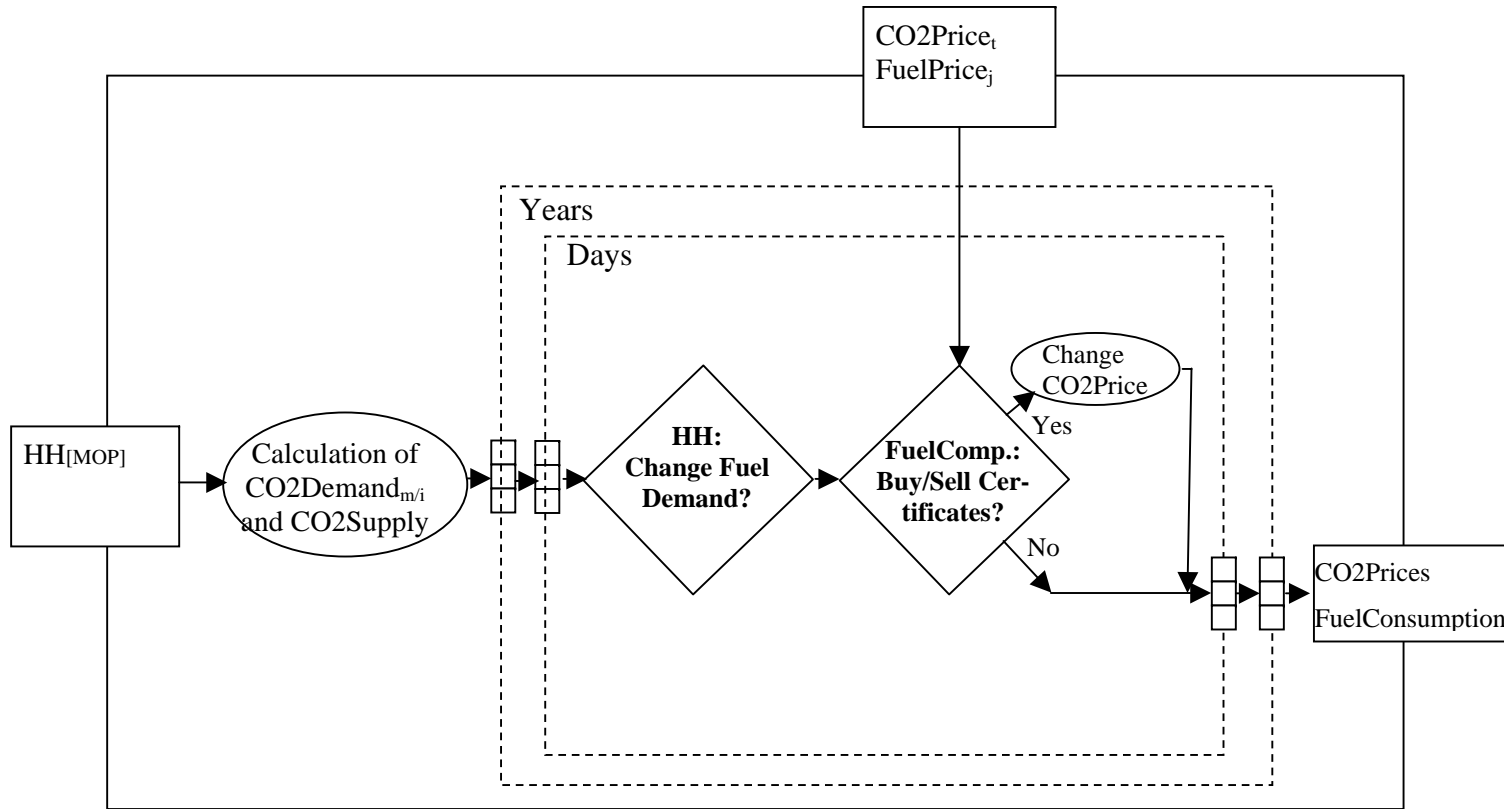
Bildlich gesprochen kommen nun alle Haushalte an die Zapfsäule und können nach sichten der Tagespreise ihre Fahrleistung entsprechend anpassen (dabei werden die Haushalte zunächst aufgrund ihrer Zusammensetzung (Familie, Single etc.) und auch hinsichtlich der Wohnlage (Stadtkern bis Land) unterschieden und zudem mit einem gleichverteilten Störterm „verrauscht“). Ab

und an werden sich die Haushalte auch ein neues Auto (Neu- oder Gebrauchtwagen) kaufen. Dies wird mittels einer (auf einer Regression basierenden) Änderung des Verbrauchs (Liter Kraftstoff pro 100 km) modelliert.

Am Abend resümieren die Mineralölkonzerne den Tag und vergleichen die für die verkaufte Kraftstoffmenge notwendigen Zertifikate mit den tatsächlich verfügbaren. Diese Differenz muss am Ende des Jahres null sein; wie dies erreicht wird, ist jedoch den Mineralölkonzernen überlassen. Werden weder Zertifikate ver- noch gekauft, so bleibt der Zertifikatspreis des übrigen Zertifikatemarktes (der andern Sektoren) unverändert. Wird jedoch eine Transaktion durchgeführt, so hat dies eine (geringe) Auswirkung auf den Zertifikatspreis der Börse, welcher am Folgetag berücksichtigt wird.

Am Ende eines Jahres ( $t=264$ ), werden die Zertifikatmengen der einzelnen Mineralölkonzerne überprüft, welche in der Summe ausgeglichen sein müssen. Am Ende der Simulation (beispielsweise 10 Jahre) werden die ermittelten Mengen an gehandelten Zertifikaten, die zusätzlichen Gewinne der Mineralölkonzerne, die erzielten CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreise, sowie die seitens der Haushalte nachgefragte Menge an Treibstoffen (d.h. Änderung der Flotte sowie Änderung der Fahrleistung) ausgegeben (vgl. Abbildung 5).

Abbildung 5: Ablaufdiagramm der Modellversion 0.3



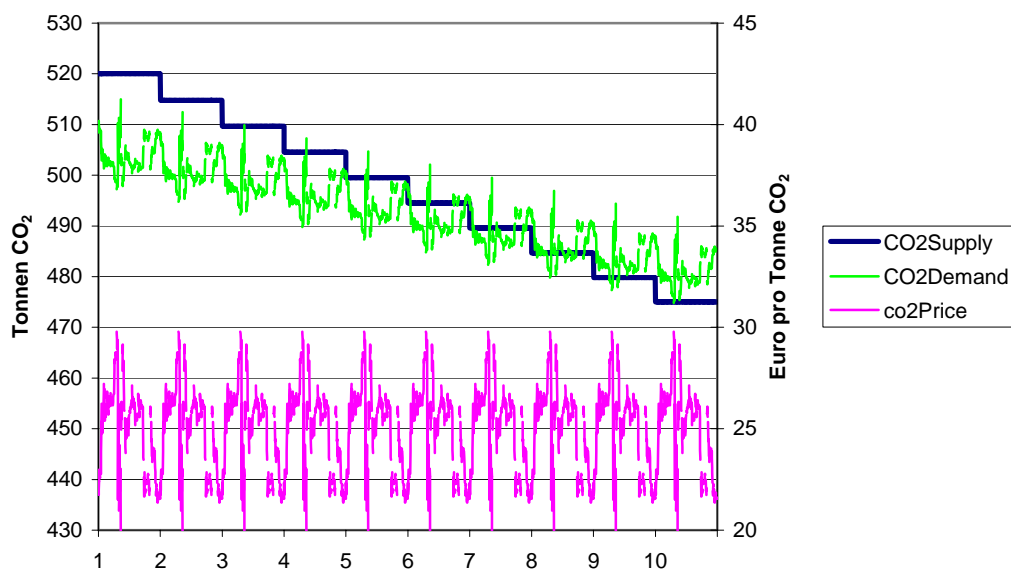


## Simulationsergebnisse

Zurzeit liegen nur vorläufige Ergebnisse vor, da die Modellversion 0.3 noch nicht vollständig in den Programmcode implementiert wurde. Teilergebnisse und deren Interpretation lassen folgende Schlüsse zu.

Die schwankenden CO<sub>2</sub>-Zertifikatepreise (zunächst historische Preise der EEX Leipzig) sind derzeit das einzige dynamische Preissignal an die Verkehrsteilnehmer, der sonstige Kraftstoffpreis bleibt in dieser Modellversion zunächst unverändert. Da die Zertifikatepreise auf die Treibstoffpreise aufaddiert werden reagieren die Haushalte bei sich ändernden Zertifikatepreisen auch entsprechend mit deren Kraftstoffnachfrage. D.h. die CO<sub>2</sub>-Nachfrage ist dynamisch wohingegen das CO<sub>2</sub>-Angebot sich lediglich jährlich exogen ändert (minus 1 % p.a.) (vgl. Abbildung 6).

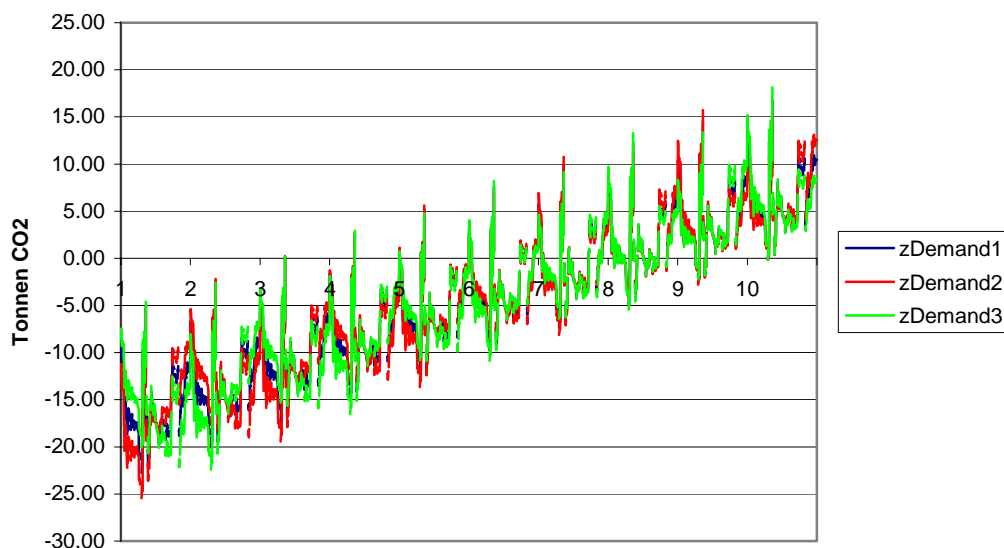
Abbildung 6: CO<sub>2</sub>-Zertifikatepreis, CO<sub>2</sub>-Nachfrage und durchschnittliches CO<sub>2</sub>-Angebot



Neben den täglichen CO<sub>2</sub>-Preisen und der Kraftstoffnachfrage wird in der Modellversion 0.3 auch täglich die CO<sub>2</sub>-Zertifikatenachfrage der Mineralölkonzerne bestimmt. Dabei werden vereinfacht zunächst folgende Strategien verfolgt. Ein Mineralölkonzern gleicht sein Konto täglich aus obwohl dies keineswegs erforderlich ist (jedoch garantiert dieses Vorgehen ein ausgeglichenes Konto am Ende des Jahres). Der Mineralölkonzern 1 kauft (verkauft) der Tagesnachfrage entsprechend Zertifikate an der Börse, wenn die an diesem Tag die durch die Kraftstoffnachfrage resultierende CO<sub>2</sub>-Nachfrage das durchschnittliche Angebot übersteigt

(unterschreitet). Die beiden anderen Strategien der Mineralölkonzerne sind an diese angelehnt. Nur gehen sie von einer optimistischen bzw. einer pessimistischen Einschätzung der Nachfrageentwicklung aus: Der Mineralölkonzern 2 verkauft in der ersten Jahreshälfte eher zu viele Zertifikate, der Mineralölkonzern 3 eher etwas zu wenige. Um das Konto am Ende des Jahres wieder auszugleichen wird der Mineralölkonzern 2 in der zweiten Jahreshälfte verstärkt kaufen (bzw. weniger verkaufen) und der Mineralölkonzern 3 wird verstärkt Zertifikate verkaufen müssen. Diese Bewegung ist zunächst mit zwei gegenläufigen Cosinus-Bewegungen dargestellt (damit ist auch a priori ein sektorspezifisches Zielerreichen gewährleistet), so dass die Agenten aus den Erfahrungen im letzten Jahr „übertrieben“ lernen, da sie die Kauf- bzw. Verkaufstrategie der zweiten Jahreshälfte zunächst noch im neuen Jahr antizipieren (ganz nach dem Motto „*Das passiert mir nicht mehr!*“) (vgl. Abbildung 7).

Abbildung 7: CO<sub>2</sub>-Zertifikatenachfrage der Mineralölkonzerne an der Börse



Für die an der Zertifikatebörse handelnden Unternehmen ist zudem von Interesse, welche Handelstrategie zu den höchsten Gewinnen führt. Dieser ist davon abhängig, in welchem Umfang sich die Kosten des Zertifikatehandels (zunächst nur der Zertifikatepreis) auf dem Kraftstoffpreis überwälzen lässt. Lässt sich der Zertifikatepreis an der Börse direkt auf den Kraftstoffpreis aufschlagen („Opportunitätskostenkalkül“), so ist dies aufgrund der kostenlosen Zuteilung der Zertifikate ein äußerst lukrative Situation für die Mineralölkonzerne, da sie im Falle von Zertifikateverkäufen an der Börse direkte Gewinne einstreichen und für die verbrauchten Zertifikate von den Verkehrsteilnehmern ebenfalls direkte Einnahmen verzeichnen. Diese Situation ist im Folgenden mit der Gewinnobergrenze (GewinnO) gekennzeichnet.

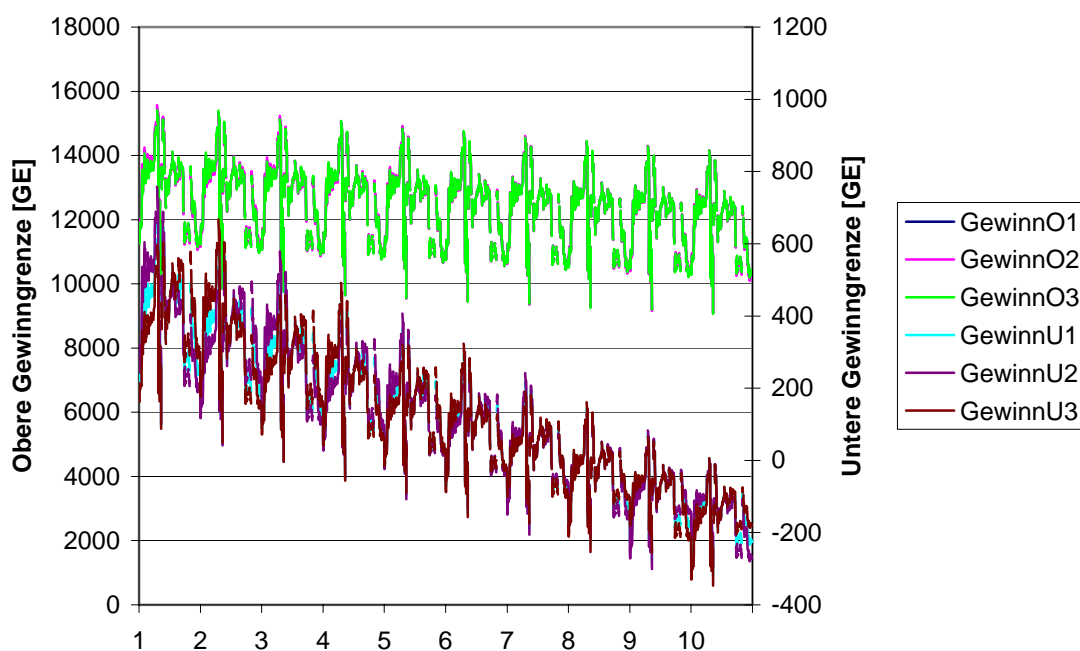
Lässt man (zunächst) die Preiselastizitäten der Verkehrsteilnehmer unberücksichtigt ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\text{GewinnO}_m = \sum_{n=1}^{10} \sum_{t=1}^{264} [\text{co2Price}_t * \text{co2Demand}_{t,m} - (z\text{Demand}_{t,m} * \text{co2Price}_t)] \quad (1)$$

Lässt sich auf Grund einer starken Wettbewerbssituation jedoch der Zertifikatepreis nicht auf den Treibstoffpreis hinzuaddieren, so bleiben den Unternehmen als zusätzliche Geldquelle durch den Zertifikatehandel lediglich die möglichen Zertifikateverkäufe an der Börse. D.h. in dieser Situation sind die Gewinn der Mineralölkonzerne stark von Absatzschwankungen bzw. der zulässigen CO<sub>2</sub>-Zertifikatemenge abhängig und können schnell in Verluste umschlagen. Diese Situation wird im Folgenden mit der Gewinnuntergrenze (GewinnU) gekennzeichnet.

$$\text{GewinnU}_m = \sum_{n=1}^{10} \sum_{t=1}^{264} [-(z\text{Demand}_{t,m} * \text{co2Price}_t)] \quad (2)$$

Abbildung 8: Zusätzlich realisierte Gewinne [GE] der Mineralölkonzerne durch den CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel



Mit GewinnO = Gewinnobergrenze (linke Skala) und GewinnU = Gewinnuntergrenze (rechte Skala)

In dem vorliegenden Beispiel mit den vorläufigen Ergebnissen liegt der Mineralölkonzern 2 (gefolgt von Mineralölkonzern 1) aufgrund seiner zunächst optimistischen Einschätzung der CO<sub>2</sub>-Nachfrage an erster Stelle. Die Unterschiede lagen jedoch (aufgrund der sehr ähnlichen Nachfragefunktionen) sehr nahe beieinander (<1 % Unterschied) (vgl. Abbildung 8). Deutlich

wird auch, dass die Gewinnuntergrenze bei knappem Zertifikatebestand auch deutlich negativ werden kann (im vorliegenden Beispiel bis zu -300 Geldeinheiten).

Die derzeitige Modellversion 0.3 zeigt bisher, dass Individuen eine geringe Preiselastizität hinsichtlich der Kraftstoffnachfrage aufweisen und somit (wie erwartet) der motorisierte Individualverkehr zunächst die Einsparungen in anderen Sektoren finanziert. Falls bei freier Zertifikatezuteilung (Grandfathering) die Überwälzung der Zertifikatepreise (wie im Energiemarkt) auf die Endkunden möglich ist, profitieren die Mineralölkonzerne im hohen Maße an einem implementierten Zertifikatehandel. Bei stärkerer Konkurrenz ist dies ungewiss. Um makroökonomische und umweltökonomische Auswirkungen einer CO<sub>2</sub>-Zertifikatemarktimplementierung abschätzen zu können ist eine Schnittstelle mit dem Systemdynamischen Modell ASTRA (Schade, 2005) angedacht.

## Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde nach einer Einleitung in den Deutschen Verkehrssektor, den Zertifikatehandel und eine kurze Evaluation bereits implementierter und potentieller politischer Maßnahmen zur CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Verkehr, insbesondere ein offener upstream CO<sub>2</sub>-Zertifikatehandel im Verkehr vorgestellt, der bei den Mineralölkonzernen ansetzt. Dies wurde insbesondere durch die geringe Preiselastizität der Kraftstoffnachfrage seitens Haushalte begründet, da hierdurch reine preispolitischen Instrumente zu kurz greifen – ordnungspolitische Maßnahmen jedoch die Haushalte stark in ihrer Wahlfreiheit einschränken. Der vorgeschlagene Zertifikatehandel würde den Verkehr nicht unnötig belasten, die sektorspezifischen Reduktionsziele jedoch gleichzeitig durch Emissionsreduktion in anderen Sektoren erreichen. Dabei kann dem Verkehrssektor wohl eine Nettozahlerposition unterstellt werden. Dieser Zertifikatehandel wurde im Folgenden in ein verhaltensorientiertes multiagentenbasiertes Simulationsmodell integriert. Derzeit besteht nur eine vorläufige Modellversion 0.3. Dieses konnte jedoch die Hypothesen hinsichtlich des Zertifikatehandels bestätigen. Ziel weiterer Arbeiten wird es sein, das Modell genauer (empirischer) zu kalibrieren und sukzessive zu erweitern. Geplant sind ggf. den Güterverkehr mit zu integrieren und eine Schnittstelle zum Systemdynamischen Modell ASTRA zur makroökonomischen Analyse zu ermöglichen. Mit dem vollständigen Modell soll es dann möglich sein verschiedene Zertifikatesysteme miteinander hinsichtlich der Auswirkungen auf die Verkehrsteilnehmer, Mineralölkonzerne, Automobilhersteller, (Speditionen und Fuhrunternehmer) sowie makro- und umweltökonomische Faktoren zu vergleichen.

## Literatur

- Annema, J.A., E. Bakker, R. Haaijer, J. Perdok und J. Rouwendal (2001), Stimulieren van verkoop van zuinige auto's: de effecten van drie prijsmaatregelen op de CO<sub>2</sub>-uitstoot van personenauto's, Endbericht, Bilthoven.
- Brockmann, K.L., M. Stronzik und H. Bergmann (1999), *Emissionsrechtshandel – eine neue Perspektive für die deutsche Klimapolitik nach Kioto*, Heidelberg.
- Deutsches Verkehrsforum (2006), *Die Energie- und Emissionsbilanz des Verkehrs*, Schlussbericht, Berlin.
- Diaz-Bone, H., U. Hartmann, U. Höpfner, M. Stronzik und S. Weinreich (2001), *Flexible Instrumente der Klimapolitik im Verkehrsbereich*, Schlussbericht, Heidelberg.
- Drogoul, A., D. Vanbergue und T. Meurisse (2002), Multi-Agent Based Simulation: Where are the Agents?, in: Sichman, J.S., F. Bousquet und P. Davidsson (Hrsg.), *Multi-Agent-Based Simulation II: Third International Workshop, MABS 2002*, Bologne, Italien, 15.-16. Juli, 2002, LNCS Serie, Heidelberg.
- Duber, O. (2002), *Einbeziehung des motorisierten Individualverkehrs in ein deutsches CO<sub>2</sub>-Emissionshandelssystem*, Schlussbericht, Öko-Institut, Freiburg.
- EEA (European Environment Agency) (2005), *Climate change and a European low-carbon energy system*, EEA Report 1/2005, Copenhagen.
- EWI (Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln) und Prognos (2005), *Die Entwicklung der Energiemärkte bis zum Jahr 2030*, Schlussbericht, Köln/Basel.
- Eyers C.J., D. Addleton, K. Atkinson, M.J. Broomhead, R. Christou, T. Elliff, R. Falk, I. Gee, D.S. Lee, C. Marizy, S. Michot, J. Middel, P. Newton, P. Norman, M. Plohr, D. Raper und N. Stanciou (2004), *AERO2K global aviation emissions inventories for 2002 and 2025*, Schlussbericht, Farnborough. [http://www.cate.mmu.ac.uk/reports\\_aero2k.asp](http://www.cate.mmu.ac.uk/reports_aero2k.asp).
- FIFO (Finanzwirtschaftliches Institut an der Universität Köln), Ifeu (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg), H. Bergmann und ISI (Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung) (2005), *Emissionshandel im Verkehr – Ansätze für einen möglichen Up-Stream-Handel im Verkehr*, Schlussbericht, Köln/Karlsruhe.
- Goodwin, P., J. Dargay und M. Hanly (2004), Elasticities of road traffic and fuel consumption with respect to price and income: a review, *Transport Reviews* 24 (3), 275-292.
- Grosseckler, H. (1991), Zur theoretischen Integration der Finanz- und Wettbewerbspolitik in die Konzeption des ökonomischen Liberalismus, in Boetcher, E., P. Herder-Dorneich, K.-E. Schenk und D. Schmidtchen (Hrsg.), *Jahrbuch für Neue Politische Ökonomie* 10, Mohr Siebeck, Tübingen.
- Hunecke, M., S. Schubert und F. Zinn (2005), Mobilitätsbedürfnisse und Verkehrsmittelwahl im Nahverkehr, *Internationales Verkehrswesen* 57 (1+2), 26-33.
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) (2001), *Flexible Instrumente der Klimapolitik im Verkehrsbereich – Ergebnisbericht der Vorstudie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg*, Schlussbericht, Heidelberg.
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg) (1999), *Immissionsbezogener Wirkungsvergleich für Kraftfahrzeuge mit Otto- und Diesel-Antrieb*, final report, Heidelberg.
- IFEU (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg), ZEW (Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung), H. Bergmann, Lufthansa und Die Bahn (2003), *Flexible Instrumente der Klimapolitik im Verkehrsbereich – Weiterentwicklung und Bewertung von konkreten Ansätzen zur Integration des Verkehrssektors in ein CO<sub>2</sub>-Emissionshandelssystem*, Schlussbericht, Heidelberg.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (Hrsg.) (1999), *Aviation and the Global Atmosphere*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Koschel, H., K.L. Brockmann, T.F.N. Schmidt, M. Stronzik und H. Bergmann (1998), *Handelbare SO<sub>2</sub>-Zertifikate für Europa*, Heidelberg.
- NRC (National Resource Council) (2002), *Committee on the Effectiveness and Impact of Corporate Average Fuel Economy (CAFE) Standards*, Washington DC.
- PWC (PricewaterhouseCoopers) (2002), *Zertifikathandel im Verkehrsbereich als Instrument zur CO<sub>2</sub>-Reduzierung unter Berücksichtigung von Interdependenzen mit anderen Lenkungsinstrumenten*

- und unter Gewährleistung der Kompatibilität zur EU-Gesetzgebung*, Schlussbericht, Frankfurt am Main.
- Raux, C und G. Marlot (2005), A system of tradable CO<sub>2</sub> permits applied to fuel consumption by motorists, *Transport Policy* 12, 255-265.
- Rennings, K., K.L. Brockmann, H. Koschel, H. Bergamnn und I. Kühn (1997), *Nachhaltigkeit, Ordnungspolitik und freiwillige Selbstverpflichtungen*, Heidelberg.
- Schade, W. (2005), *Strategic Sustainability Analysis: Concept and application for the assessment of European Transport Policy*, Baden-Baden.
- Schubert, S. (2004), Freizeit-Mobilitätsstile in Deutschland, *Forum Raumentwicklung* 1, 15-17.
- Wit, R.C.N., B.H. Boon, A. van Velzen, M. Cames, O. Deuber und D.S. Lee (2005), *Giving wings to emission trading Inclusion of aviation under the European Emission Trading System: Design and impacts*, Schlussbericht, Delft. [http://europa.eu.int/comm/environment/climat/pdf/aviation\\_et\\_study.pdf](http://europa.eu.int/comm/environment/climat/pdf/aviation_et_study.pdf)
- Wit, R.C.N. und J.M.W. Dings (2002), *Economic incentives to mitigate greenhouse gas emissions from air transport in Europe*, Schlussbericht, Delft. [http://www.ce.nl/pdf/02\\_4733\\_10\\_rep.pdf](http://www.ce.nl/pdf/02_4733_10_rep.pdf)
- Wooldridge, M. (2002), *An Introduction to MultiAgent Systems*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Wooldridge, M. und N.R. Jennings (1995), Intelligent Agents: Theory and Practice', *Knowledge Engineering Review* 10(2), 115-152.
- Zinn, F., M. Hunecke und S. Schubert (2003), *Zielgruppen und deren Mobilitätsbedürfnisse im Nahverkehr der Ballungsräume sowie im ländlichen Raum*, Schlussbericht, Dortmund.
- Zumkeller, D., B. Chlond und P. Ottmann (2005), *Car Dependency and Motorization Development in Germany*, Schlussbericht, Karlsruhe.

---

## Anhang

*Der JAVA-Quellcode kann beim Autor angefragt werden.*