

ANALYSE DES EINFLUSSES DES EMISSIONSHANDELS AUF PRODUKTION UND EMISSIONEN AUSGEWÄHLTER INDUSTRIESEKTOREN

Lutz HILLEMACHER, Wolf FICHTNER

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Lehrstuhl für Energiewirtschaft; Hertzstraße 16; D-76187 Karlsruhe; Tel.: +49 721 608-44409; Fax: +49 721 608-44682; hillemacher@kit.edu; www.iip.kit.edu

Kurzfassung:

Der Einfluss des EU-Emissionshandels auf das Produktionsverhalten der in den Handel einbezogenen Industriesektoren wurde mit Hilfe des optimierenden Energiesystemmodells „PERSEUS-CERT“ untersucht. Mittels einer Betrachtung verschiedener Szenarien hinsichtlich der Entwicklung der Brennstoffpreise und Emissionsminderungsziele konnte gezeigt werden, dass das Produktionsverhalten der berücksichtigten Industriesektoren durch den Emissionshandel kaum beeinflusst wird. Die vorgegebenen Restriktionen werden vielmehr durch den Energieversorgungssektor abgefangen.

Keywords:

Energiesystemmodell, Emissionshandel

1 Motivation und zentrale Fragestellung

Der im Jahr 2005 eingeführte EU-Emissionshandel versteht sich als marktwirtschaftliches Instrument zur Senkung der Emissionen von Treibhausgasen. In diesen Handel einbezogen sind seit Beginn die Kohlendioxid-Emissionen des Energieversorgungssektors sowie energieintensiver Industriebranchen. Letztere teilen sich auf in die Bereiche Eisen- und Stahlverhüttung, Raffinerien und Chemie, Zement- und Kalkherstellung, Glas-, Keramik- und Ziegelindustrie sowie Papier- und Zellstofferzeugung. Seit dem 1. Januar 2012 ist nun auch der Luftverkehrssektor in den Handel integriert worden.

Mit Hilfe des optimierenden Energiesystemmodells „PERSEUS“ (Programme Package for Emission Reduction Strategies in Energy Use and Supply) wurde untersucht, inwieweit durch den Emissionshandel Veränderungen im Produktions- und Emissionsverhalten der in den Handel einbezogenen Industriesektoren festgestellt werden können.

2 Methodische Vorgehensweise

Die am Lehrstuhl für Energiewirtschaft des Instituts für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelten „PERSEUS“-Modelle stellen eine Familie technologiebasierter optimierender Energie- und Stoffflussmodelle dar [Möst 2006]. Zum Einsatz gelangte bei der dargestellten Untersuchung das Modell „PERSEUS-CERT“, das im Hinblick auf eine detaillierte Abbildung des Handels mit Emissionszertifikaten entwickelt wurde. Der methodische Ansatz gründet auf einer mehrperiodigen, gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung mit einem zeitlichen Optimierungshorizont von bis zu 40 Jahren. Dem Bottom-Up-Modell liegt die Annahme eines vollkommenen Marktes mit vollständigen Informationen zu Grunde.

2.1 Modellstruktur

Lag der Schwerpunkt bisheriger Versionen des „PERSEUS-CERT“-Modells auf einer detaillierten Abbildung des Energieversorgungssektors einschließlich des EU-Emissionshandels, so wurde das Modell beginnend mit dem Jahre 2009 sukzessive um eine detaillierte Abbildung der in den Emissionshandel einbezogenen Industriesektoren, die bis dato nur aggregiert modelliert waren, erweitert. In einer letzten Erweiterung wurde noch der Luftverkehrssektor in die Modellierung mit einbezogen. Allen Varianten der „PERSEUS“-Modellfamilie gemeinsam ist die Abbildung der jeweils betrachteten Sektoren in einer gerichteten Graphenstruktur, wobei die Produzenten der einzelnen Sektoren einschließlich der ihnen zuzuordnenden Produktionsanlagen und -prozesse durch die Knoten und die Energie- und Stoffflüsse durch die Kanten repräsentiert werden [Perlwitz 2007].

Bei den nunmehr detailliert abgebildeten Sektoren handelt es sich im Einzelnen um

- den Energieversorgungssektor,
- die Glasproduktion,
- die Zement- und Klinkerproduktion,

- die Eisen- und Stahlproduktion,
- die Papier- und Zellstoffproduktion,
- die Raffinerieproduktion,
- den Chemie-Sektor mit Fokus auf die Produktion von Adipinsäure, Ammoniak, Cracker und Salpetersäure sowie
- den Luftverkehrssektor.

Die drei Hierarchieebenen des Energiesystems und der modellierten Industriesektoren zeigt Abb. 1. Berücksichtigte Regionen in der aktuellen Modellversion sind die 27 EU-Staaten sowie Norwegen und die Schweiz.

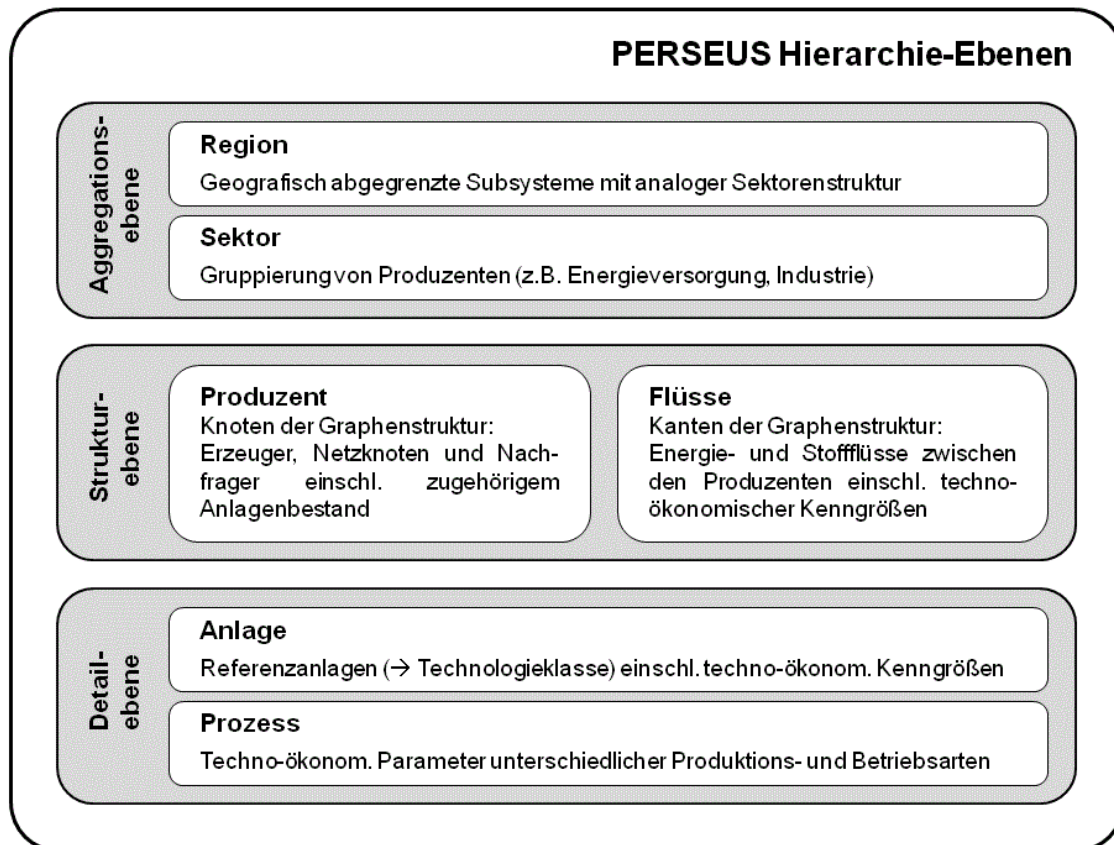


Abb. 1: Hierarchien des „PERSUES-CERT“-Modells

Die treibende Größe des Modells stellt dabei für den Energiesektor die exogen vorgegebene Stromnachfrage dar, die mittels hinterlegten Last- und Produktionskurven für 36 Zeitscheiben (Tytage) je Betrachtungsperiode abgebildet ist. Im Falle der Industriesektoren sind die prognostizierten Produktionsmengen hinterlegt. Das Modell minimiert die auf das Basisjahr diskontierten entscheidungsrelevanten Systemausgaben unter Berücksichtigung der als Nebenbedingungen implementierten techno-ökonomischen und ökologischen Restriktionen des modellierten Energiesystems sowie der berücksichtigten Industriesektoren.

Einen Überblick über die Modellstruktur gibt Abb. 2. Zusätzlich zu den Prognosen der Energienachfrage und der industriellen Produktionsmengen werden auch Prognosen der Brennstoffpreise und der Kursverläufe an der Strombörse sowie die

Emissionsminderungsziele als exogene Vorgaben berücksichtigt. Die Eingabe erlaubt dabei eine szenarioabhängige Variation einzelner oder aller Parameter.

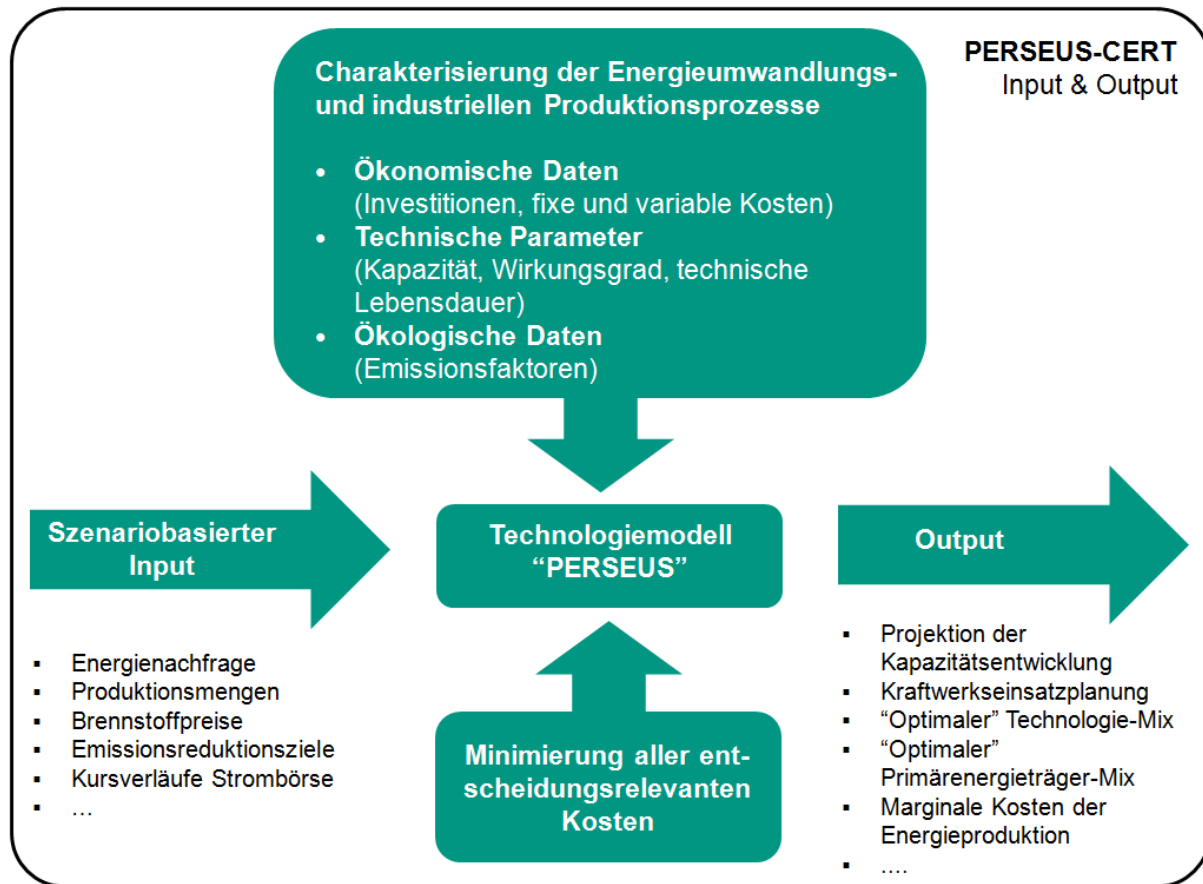


Abb. 2: Strukturschema des „PERSEUS-CERT“-Modells

Zur Befriedigung sowohl der Energie- als auch der industriellen Nachfrage trifft das Modell eine Auswahl aus hinterlegten Energieumwandlungs- und industriellen Produktionsprozessen. Die Modellierung dieser Prozesse geschah unter Berücksichtigung ökonomischer, technologischer und ökonomischer Parameter. Eine detaillierte Aufstellung dieser Parameter findet sich ebenfalls in Abb. 2.

Bezogen auf den Energieversorgungssektor liefert das Modell eine Projektion der Kapazitätsentwicklung und eine Kraftwerkseinsatzplanung. Veränderungen im Kraftwerkspark des Energieversorgungssektors, einerseits durch den technologischen Fortschritt, andererseits durch Hinwendung zu erneuerbaren Energieträgern, wird durch die Modellierung von Zu- und Ausbauoptionen neuer bzw. bestehender Kraftwerke Rechnung getragen. Damit einhergehend sind Rückbauoptionen bereits bestender Anlagen implementiert. Davon abweichend erfolgte die Abbildung der Industriesektoren. Hier sind die industriellen Produktionsanlagen auf einem höheren Niveau aggregiert, so dass hier Zu-, Rück- und Ausbauoptionen nicht sinnvoll dargestellt werden können, vielmehr bestehen an dieser Stelle modellseitig Wahlmöglichkeiten zwischen verschiedenen Produktionsprozessen mit unterschiedlichen Parametern hinsichtlich der Investitionen, der Kostenstruktur, des Rohstoffbedarfs sowie der Emissionen. Für diese Sektoren bedeutet dies, dass anstelle der Einsatzplanung der Anlagen die anteilmäßige Nutzung verschiedener Produktionsverfahren

ausgegeben wird. Zusätzlich ermittelt das Modell den unter Berücksichtigung oben erwähnter exogener Vorgaben optimalen Technologie- und Primärenergieträger-Mix sowie die marginalen Kosten der Energieumwandlung.

Wie bereits zuvor angedeutet, stehen auf der Detailebene in den Industriesektoren neben Standardprozessen, die den derzeitigen Stand der Technik in der Produktion repräsentieren, alternativ auch neuartige Produktionsprozesse, die dem technologischen Fortschritt Rechnung tragen, zur Verfügung. Diese ermöglichen unter Inkaufnahme entsprechender Investitionen eine Produktion mit veränderten Rohstoff-, Energiebedarfs-, Kosten- und Emissionsparametern, so dass durch das Modell eine Entscheidung zwischen unterschiedlichen Produktionsverfahren und damit einhergehend auch der durch entsprechende Zertifikate abzudeckenden Emissionsmengen getroffen werden kann. Zur Verhinderung einer unrealistischen, sofortigen Umstellung der gesamten Produktion durch das Modell sind die Alternativprozesse mit zeitlich progressiven Durchdringungsraten hinterlegt. Exemplarisch für die Glasproduktion gibt nachfolgende Tabelle Auskunft über die zur Verfügung stehenden Alternativen:

Tab. 1: Im Modell „PERSEUS-CERT“ implementierte Produktionsprozess-Alternativen am Beispiel des Glassektors

Prozessart	Bezeichnung	Erläuterung
Standardprozess	Standardprozess	repräsentiert den derzeitigen Stand der Technik
Alternativprozess	Abwärmenutzung	Energieeinsparung durch regenerative Abwärmenutzung in großen Schmelzwannen (> 250 t/Tag) bzw. Nutzung in Kondensationsturbinen
Alternativprozess	Gemengevorwärmung	Energieeinsparung durch rekuperative Abwärmenutzung zur Vorwärmung des Gemenges (nicht für die Produktion von Flachglas geeignet)
Alternativprozess	Erhöhung des Scherbenanteils	Energieeinsparung durch Erhöhung des Altglasanteils (hauptsächlich bei der Herstellung von Behälterglas)
Alternativprozess	Lonox-Brennersystem	Emissionsminderung sowie Energieeinsparung durch optimierte Verbrennungsregelung, niedrigere Verbrennungstemperaturen sowie Kombination mit Sauerstoffbrennstoffeuerung
Alternativprozess	Brennstoffwechsel	Wechsel von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen hin zu Erdgas

Die Berücksichtigung des EU-Emissionshandels geschieht durch Hinterlegung der jedem Sektor in jeder Region zugeteilten Emissionsobergrenzen, die sich an den nationalen Allokationsplänen orientieren. Gleichzeitig sind für die jeweiligen Energieumwandlungs- und Produktionsprozesse prozessspezifische Emissionsfaktoren je Leistungseinheit hinterlegt, so dass sich die einem Prozess zurechenbare Emissionsmenge in jedem Zeitintervall bestimmen lässt.

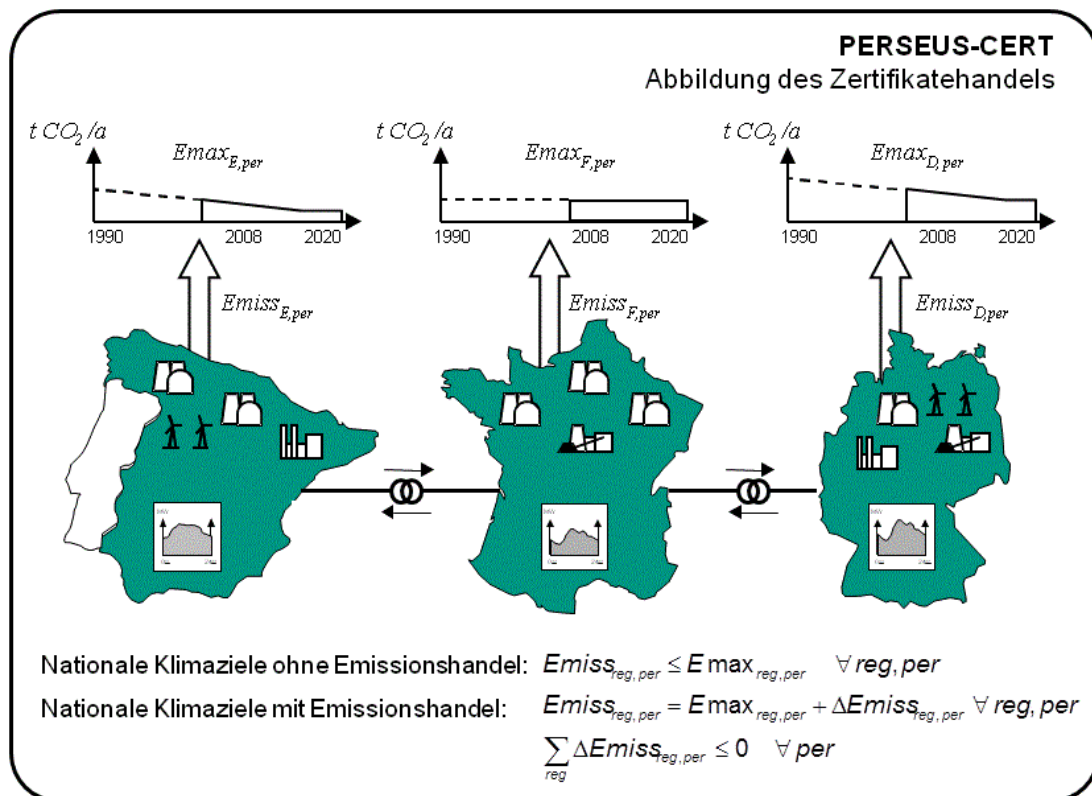


Abb. 3: Schematische und mathematische Darstellung des Zertifikatehandels
([Enzensberger 2003], Abb. modifiziert)

Überschreiten die Emissionen eines Sektors nun die implementierte Obergrenze, so muss ein Zukauf entsprechender Zertifikate aus anderen Sektoren bzw. Regionen erfolgen. Einen schematischen Überblick gibt Abb. 3. Zur vergleichenden Betrachtung lässt sich der Handel mit Emissionszertifikaten deaktivieren, wie auch die Emissionsobergrenzen eines jeden Sektors frei angepasst werden können.

2.2 Mathematisches Modell

Dieser Abschnitt soll einen kurzen Überblick über den mathematischen Aufbau des „PERSEUS-CERT“-Modells geben. Dazu werden die Zielfunktion sowie ausgewählte Nebenbedingungen erläutert.

2.2.1 Zielfunktion

Die Zielfunktion bewirkt die Minimierung aller entscheidungsrelevanten Systemausgaben, die in der folgenden Darstellung zur Veranschaulichung den einzelnen Termen zugeordnet wurden.

$$\min \sum_{t \in T} \alpha_t \cdot \left[\begin{array}{l} \sum_{imp \in IMP} \sum_{ec \in EC} \sum_{prod \in PROD} FL_{imp,prod,t,seas} \cdot C_{fuel,prod,ec,t} \\ + \sum_{seas \in S} \sum_{proc \in PROC} \left(PL_{proc,t,seas} \cdot C_{var,proc,t} + \right. \\ \left. (LVup_{proc,seas-1,seas,t} + LVdown_{unit,seas-1,seas,t}) \cdot Cload_{proc,t} \right. \\ \left. + PL_{proc,t,seas} \cdot ProcEmiss_{CO_2,proc,t} \cdot C_{CO_2,t} \right) \\ + \sum_{u \in U} \left[Cap_{unit,t} \cdot (C_{fix,unit,t} + C_{wat,unit,t}) + \right. \\ \left. NewCap_{unit,t} \cdot C_{inv,unit,t} \right] \end{array} \right]$$

Brennstoffkosten
 Variable Kosten
 Laständerungskosten
 Emissionssteuern/-kosten
 Kapazitätskosten
 Investitionen

2.2.2 Ausgewählte Nebenbedingungen

- Energie- und Stoffflussbilanzgleichungen

Nachfolgend aufgeführte Bilanzgleichungen stellen sicher, dass die Energie- bzw. Stoffbilanz an jedem Knoten in der Graphenstruktur ausgeglichen ist. Das bedeutet, dass die Summe einem Produzenten zufließenden Energie- und Stoffflüsse mit den jeweiligen Abflüssen – multipliziert mit dem jeweiligen Wirkungsgrad – übereinstimmen muss.

$$\sum_{imp \in IMP} FL_{imp,prod,ec,t} + \sum_{prod' \in PROD_{prod,ec}} FL_{prod',prod,ec,t} + \sum_{proc \in GENPROC_{prod,ec}} PL_{proc,t} \cdot \lambda_{proc,ec}$$

$$= \sum_{exp \in EXP} FL_{prod,exp,ec,t} + \sum_{prod' \in PROD'_{prod,ec}} FL_{prod,prod',ec,t} + \sum_{proc \in DEMPROC_{prod,ec}} PL_{proc,t} \cdot \frac{\lambda_{proc,ec}}{\eta_{proc,ec}}$$

$$\forall t \in T; \quad \forall prod \in PROD; \quad \forall ec \in EC_{non-seas}$$

- Prozessnutzung

Diese Nebenbedingung gewährleistet, dass sämtliche einer Anlage zugerechneten Prozesse jene Anlage in jedem Zeitintervall höchstens bis zu ihrer Kapazitätsgrenze, multipliziert mit der Verfügbarkeit der Anlage, einlasten.

$$Cap_{unit,t} \cdot Avai_{unit,t} \cdot h_{seas} \geq \sum_{proc \in PROC_{unit}} PL_{proc,seas,t}$$

$$\forall t \in T; \quad \forall unit \in UNIT; \quad \forall seas \in SEAS$$

- Bedarfsdeckung

Diese Nebenbedingung stellt die Deckung der entsprechenden Nachfrage für jedes Produkt (Energie, industrielle Produktionsgüter) in jedem Zeitintervall sicher.

$$\sum_{prod \in Prod} \sum_{exp \in Exp} FL_{prod,exp,t,seas} \geq D_{t,seas}$$

$$\forall prod \in Prod; \forall seas \in S; \forall t \in T$$

- Zertifikatehandel

Die folgenden Nebenbedingungen stellen sicher, dass im Rahmen des Zertifikatehandels die Höchstzahl der pro Periode verfügbaren Zertifikate nicht überschritten wird.

$$Emiss_{reg, per} = Emax_{reg, per} + \Delta Emiss_{reg, per}$$

$$\forall reg, per$$

$$\sum_{reg} \Delta Emiss_{reg, per} \leq 0$$

$$\forall per$$

Bedeutung der Formelzeichen:

α_t	Diskontierungsfaktor in der Periode t
$\lambda_{proc, ec}$	Anteil des Energieträgers bzw. Stoffes am Gesamtinput bzw. Gesamtoutput des Prozesses proc (Konvention: negativ für Input, positiv für Output)
$\eta_{proc, ec}$	Wirkungsgrad des Prozesses proc
$Avai_{unit, t}$	mittlere Verfügbarkeit der Anlage unit in der Periode t
$Cap_{unit, t}$	Installierte Kapazität der Anlage unit in der Periode t
$C_{CO_2, t}$	CO ₂ -Zertifikatspreis in der Periode t
$Cfix_{unit, t}$	fixe Betriebsausgaben für die Anlage unit in der Periode t
$Cfuel_{prod, ec, t}$	Brennstoffkosten für die Belieferung von prod mit ec in der Periode t
$Cinv_{unit, t}$	spezifische Investitionen für einen Zubau der bzw. an der Anlage unit in der Periode t (Annuitätswert)
$Cload_{proc, t}$	Laständerungskosten des Prozesses prod in der Periode t
$Cvar_{proc, t}$	variable Kosten des Prozesses proc in der Periode t
$Cwat_{unit, t}$	Wasserzins für die Anlage unit in der Periode t
$D_{t, seas}$	Nachfrage nach Nutzenergie bzw. industrieller Produktion in der Zeitscheibe seas in der Periode t
ec	Index der Energieträger und Stoffe
$Emax_{reg, per}$	Emissionsobergrenze der Region reg in der Periode per
$Emiss_{reg, per}$	Emissionen der Region reg in der Periode per
exp	Index der Senken der Graphenstruktur (Export)
$FL_{imp, prod', t, seas}$	Niveau des ec-Flusses von der Quelle der Graphenstruktur zum Produzenten prod' in der Periode t
$FL_{prod, exp, t, seas}$	Niveau des ec-Flusses von Produzent prod zur Senke der Graphenstruktur in der Periode t
$FL_{prod, prod', ec, t, seas}$	Niveau des ec-Flusses von prod (imp) zu den Produzenten prod' (exp) in der Zeitscheibe seas der Periode t
h_{seas}	Zahl der Stunden, die auf die Zeitscheibe seas entfallen
imp	Index der Quellen der Graphenstruktur (Import)
$LVdown_{unit, seas-1, seas, t}$	Laständerung (Hilfsvariable)

LV _{unit,seas-1,seas,t}	Laständerung (Hilfsvariable)
NewCap _{unit,t}	In der Periode t neu installierte Kapazität der Anlage unit (Zubau)
PL _{proc,t,seas}	Aktivitätsniveau des Prozesses proc in der Zeitscheibe seas der Periode t
ProcEmiss _{CO2,proc,t}	Emissionsfaktor der Prozessemissionen des Prozesses proc in der Periode t
prod, prod'	Indizes der Produzenten
PROD, PROD'	Indexmengen der Produzenten
reg	Regionenindex
REG	Indexmenge der Regionen
seas	Zeitscheibenindex
SEAS	Indexmenge der Zeitscheiben
t, per	Periodenindex
T, PER	Indexmenge der Perioden
unit	Anlagenindex
UNIT	Indexmenge der Anlagen

2.3 Szenarienbetrachtung

Die Analyse der Auswirkungen des Zertifikatehandels auf die teilnehmenden Industriesektoren erfolgte mittels einer Szenarienbetrachtung.

Als Referenzszenario diente ein Szenario mit prognostizierten Brennstoffpreisen auf mittlerem Niveau gemäß aktuellem World Energy Outlook [IEA 2010]. Die ebenfalls exogen vorgegebene industrielle Produktion stützte sich auf Prognosen der jeweiligen nationalen Branchenverbände.

Zusätzlich wurde eine pauschal hochpreisige Entwicklung der Brennstoffe, die sich wiederum auf Prognosen des World Energy Outlooks stützt, eine Reduzierung der Emissionszertifikate um 20% gegenüber der ursprünglichen Zuteilung in jeder Betrachtungsperiode sowie eine Verringerung der Produktionsmengen gegenüber den Prognosen betrachtet. Zur Veranschaulichung wird im Folgenden auf eine Reduzierung der Glasnachfrage um 10% gegenüber den Prognosen der nationalen Branchenverbände in jeder Zeitperiode eingegangen.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der modelltechnischen Betrachtung obiger Szenarien kurz dargestellt. Die Diskussion der Ergebnisse muss an dieser Stelle auf die EU-15-Staaten zuzüglich Polen, Norwegen und die Schweiz beschränkt bleiben. Letztere Staaten wurden nicht zuletzt wegen der engen wirtschaftlichen Verflechtungen mit dem Betrachtungsgebiet ergänzend aufgenommen. Wesentlicher Hintergrund der Beschränkung der folgenden Darstellung auf die EU-15-Staaten war die historisch bedingt vergleichbare und vergleichsweise beständige Struktur des Anlagenparks dieser Staaten, wohingegen in

den ab 2004 hinzugekommenen Staaten der Anlagenpark in der jüngeren Vergangenheit zumeist größeren Veränderungen unterworfen war. Die Ergebnisse dieser Staaten müssen vor diesem Hintergrund eingehender betrachtet werden, was den Darstellungsrahmen dieser Arbeit jedoch sprengen würde.

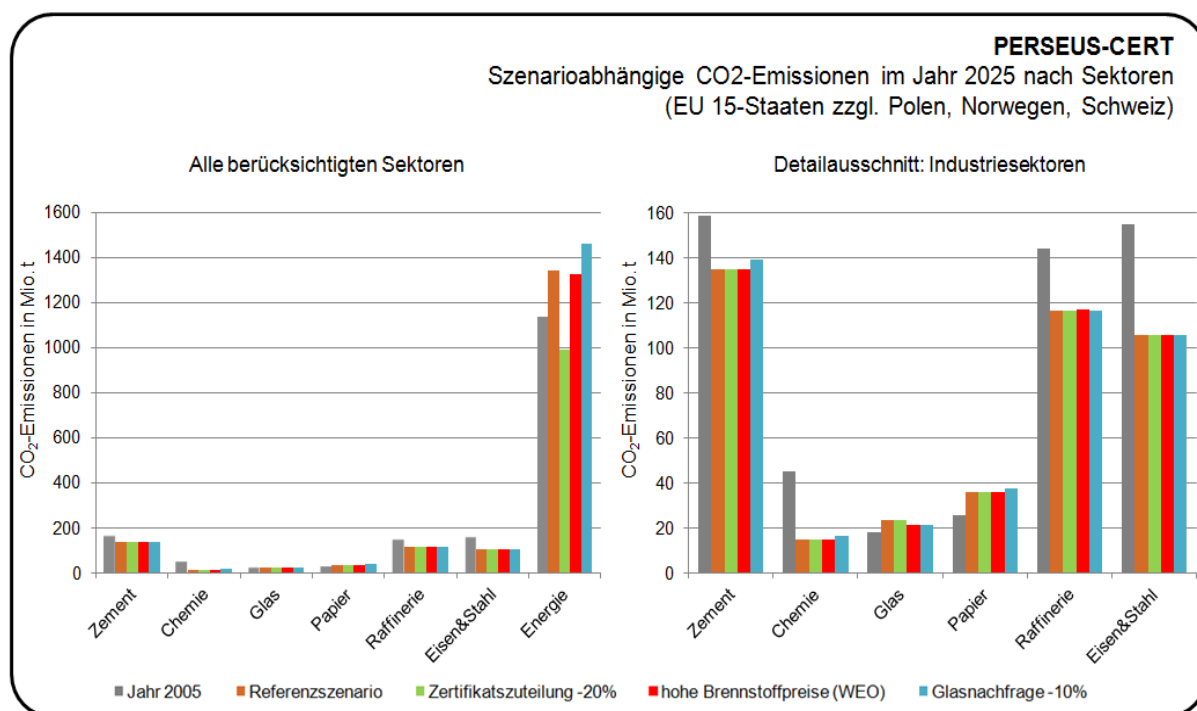


Abb. 4: Szenarioabhängige CO₂-Emissionen im Jahr 2025 nach Sektoren (EU15-Staaten zzgl. Polen, Norwegen, Schweiz)

Wie in Abb. 4 erkennbar, beeinflussen Veränderungen der Brennstoffpreise sowie eine Verknappung der zugewiesenen Emissionszertifikate den CO₂-Ausstoß der Industriesektoren – im Gegensatz zum Energiesektor – nur minimal. Eine genaue Betrachtung der einzelnen Sektoren zeigt, dass einzig eine nennenswerte Veränderung der prognostizierten Produktionsmenge erwartungsgemäß zu stärkeren Veränderungen im Emissionsverhalten führt. Im Falle der gleichbleibenden industriellen Nachfrage dagegen wird die Verknappung der Emissionsrechte fast ausschließlich durch den Energieversorgungssektor abgefangen, da dort geringere marginale Kosten infolge der Reaktion auf die veränderten Rahmenbedingungen anfallen als im Bereich der Industriesektoren [IEA 2008; UBA 2008].

Den Grund für die schwache Reaktion der Industriesektoren offenbart eine Betrachtung der modellseitig gewählten Produktionsprozesse, wie sie beispielhaft für den Glassektor in Deutschland geschieht (Abb. 5). Mit zunehmender Verfügbarkeit der Alternativprozesse erfolgt eine – wenn auch zögerliche – Verlagerung zu Prozessen mit geringeren variablen Kosten und Emissionen. Die maximal möglichen Durchdringungsraten werden dabei in keinem Szenario auch nur annähernd erreicht. So kann modellseitig bis zum Jahr 2025 in Deutschland maximal die Hälfte der prognostizierten Glasproduktion auf Lonox-Brennersysteme verlagert werden. Abb. 5 zeigt jedoch, dass die vom Modell gewählte Durchdringung in allen Fällen wesentlich niedriger ausfällt. Auch eine noch wesentlich stärkere Kürzung der Zuteilung von Verschmutzungsrechten, als sie mit einer 20-prozentigen

Verringerung im hier dargestellten Szenario betrachtet wird, führt keinesfalls zur maximalen Inanspruchnahme des Alternativprozesses. Eine maximale Durchdringung dieses Prozesses würde sich erst bei sehr extremen und – aus heutiger Sicht – unrealistischen Brennstoffpreisen einstellen. Die an dieser Stelle anhand eines Prozesses exemplarisch dargestellten Ergebnisse lassen sich im Übrigen auch bei den anderen Prozessen und auch in den anderen Industriesektoren beobachten, wenngleich naturgemäß mit unterschiedlich ausgeprägten Sensitivitäten.

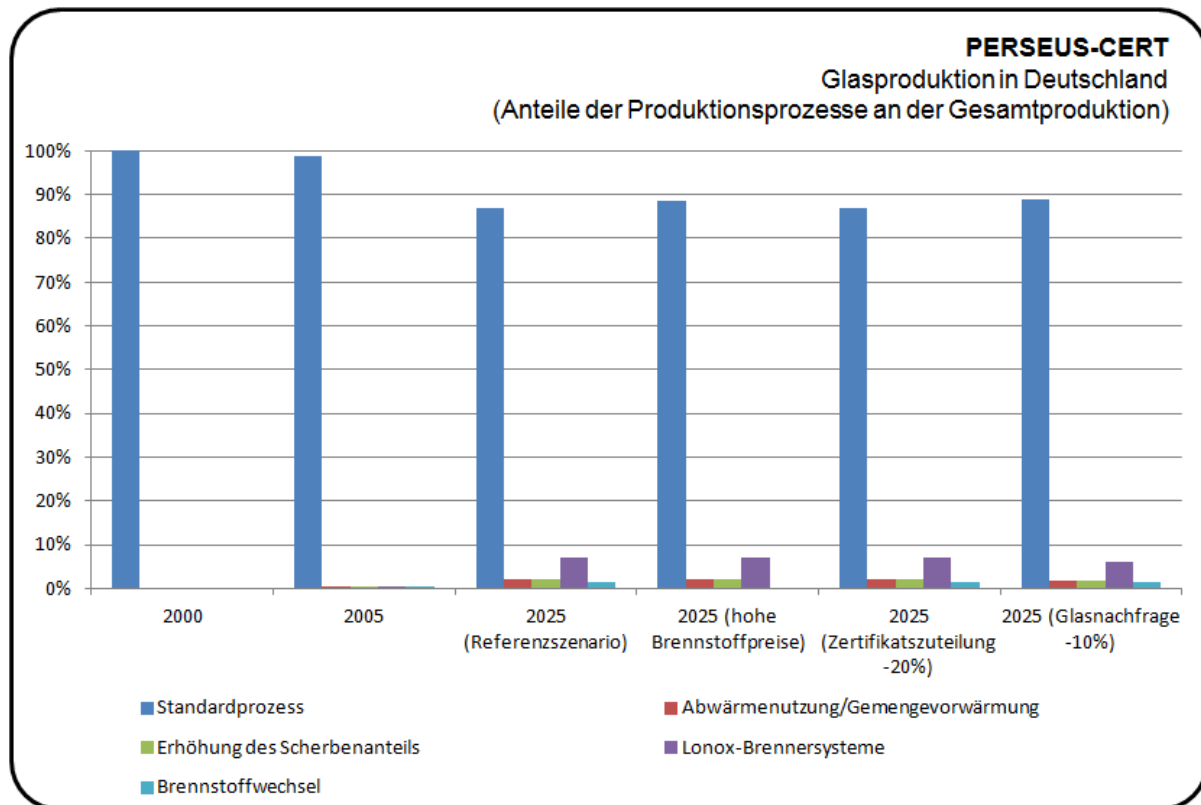


Abb. 5: Szenarioabhängige Aufteilung der Glasproduktion in Deutschland auf einzelne Produktionsverfahren

Bei einer Reduzierung der Produktnachfrage ist dann auch zu beobachten, dass auf Grund der geringeren Produktionsmenge zum einen die im Vergleich zum Standardprozess geringeren variablen Kosten der Alternativprozesse die Investitionen nicht mehr kompensieren können und andererseits auch die Emissionsobergrenzen und damit der Zwang, bei Überschreitung Zertifikate zukaufen zu müssen, nicht mehr ins Gewicht fallen. Folglich erhöht sich unter diesen Umständen wieder der Anteil der Standard-Produktionsprozesse an der Gesamtproduktion auf Kosten der Alternativprozesse. Zu beachten ist dabei jedoch, dass dies unter der Voraussetzung der uneingeschränkten Verfügbarkeit des heutigen Standardprozesses über alle Berechnungsperioden steht und somit eine mögliche Minderung infolge ausschließlich technisch bedingter Ersatzinvestitionen in neuere Produktionsverfahren unberücksichtigt bleibt, gleichwohl eine solche ökonomisch autonome, minimale Durchdringungsrate bei entsprechender Datenverfügbarkeit modelltechnisch umzusetzen wäre.

Sowohl Aspekte des Emissionshandels als auch üblicherweise anzunehmende Veränderungen bei den Brennstoffpreisen auf Seiten der Industriesektoren führen somit zu keinen nennenswerten Veränderungen bei den Produktionsverfahren. Es zeigte sich, dass die emissionsmindernden Umstellungen der Produktionsverfahren vielmehr durch die geringeren variablen Kosten der unmittelbaren Produktion getrieben werden, wenngleich auch in einem deutlich geringeren Ausmaß als es die hinterlegte Durchdringungsrate erlauben würde.

4 Literatur

- [Enzensberger 2003] Enzensberger, N.: Entwicklung und Anwendung eines Strom- und Zertifikatmarktmodells für den europäischen Energiesektor; Düsseldorf, 2003
- [IEA 2008] International Energy Agency: Energy Technology Perspectives; Paris, 2008
- [IEA 2010] International Energy Agency: World Energy Outlook 2010; Paris, 2010
- [Möst 2006] Möst, D.: Zur Wettbewerbsfähigkeit der Wasserkraft in liberalisierten Elektrizitätsmärkten; Frankfurt am Main, 2006
- [Perlwitz 2007] Perlwitz, H.: Der Erdgasmarkt für den Kraftwerkssektor unter CO₂-Minderungsverpflichtungen – Eine modellgestützte Analyse des europäischen Energiemarktes; Karlsruhe 2007
- [UBA 2008] Umweltbundesamt (Hrsg.): Wirtschaftlicher Nutzen des Klimaschutzes – Kostenbetrachtung ausgewählter Einzelmaßnahmen der Meseberger Beschlüsse zum Klimaschutz; Dessau-Roßlau 2008