

Peterson, Sonja

Conference Paper — Accepted Manuscript (Postprint)

Technischer Fortschritt im DART-Modell

Provided in Cooperation with:

Kiel Institute for the World Economy – Leibniz Center for Research on Global Economic Challenges

Suggested Citation: Peterson, Sonja (2005) : Technischer Fortschritt im DART-Modell, In: Ingo Ellersdorfer (Ed.): Ansätze zur Modellierung von Innovation in der Energiewirtschaft: Methodenworkshop des Forum für Energiemodelle und Energiewirtschaftliche Systemanalysen in Deutschland, ISBN 3-89820-912-1, Mensch-und-Buch-Verlag, Berlin, pp. 207-219

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/3806>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Technischer Fortschritt im DART-Modell

Sonja Peterson

Beschreibung der Möglichkeiten zur Implementierung von technischem Fortschritt für das Modellexperiment V: „Innovation und moderne Energietechnik“.

1 Einleitung

Das heutige Energiesystem basiert größtenteils auf fossilen Brennstoffen, die nicht nur in begrenzter Menge vorhanden sind, sondern auch durch die Freisetzung von CO₂ zum globalen Treibhauseffekt und der Erwärmung der Erdatmosphäre beitragen. Beim Übergang zu einem nachhaltigen System der Energiegewinnung und -nutzung spielt technischer Fortschritt eine entscheidende Rolle, denn ohne Weiterentwicklungen im Bereich erneuerbarer Energien und Techniken für eine effizientere Energienutzung, sind klimapolitische Ziele nicht zu realisieren oder mit untragbaren Kosten verbunden.

Um die Rolle von technischem Fortschritt analysieren zu können, muss dieser in Ökonomie-Klima-Modellen und Energiemodellen angemessen abgebildet werden. Traditionell wird technischer Fortschritt häufig exogen in Form von Energieeffizienzsteigerungen vorgegeben. Mittlerweile herrscht Einigkeit darüber, dass technischer Fortschritt nicht autonom stattfindet, sondern beispielsweise von öffentlichen und industriellen Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, Energiepreisen und Skaleneffekten abhängt. Modelltechnisch gesehen sollte technischer Fortschritt daher als eine endogene Variable behandelt werden, die von anderen im Modell enthaltenen Parameter abhängt.

„Innovation und Technischer Fortschritt im Energiebereich“ ist auch das Thema des Modellexperiment V des Forums für Energiemodelle. In diesem Zusammenhang sollen die am Experiment beteiligten Modelle in Bezug auf die Abbildung von technischem Fortschritt verbessert und unterschiedliche Szenarien verglichen werden. Der erste Schritt ist, darzustellen wie technischer Fortschritt bislang in den einzelnen Modellen berücksichtigt wird und mögliche Erweiterungen zu diskutieren. Hier soll deshalb kurz dargestellt werden, wie technischer Fortschritt im DART Modell des Instituts für Weltwirtschaft (IfW) abgebildet ist. Anschließend werden die existierenden Ansätze zur Modellierung von endogenem technischen Fortschritt kategorisiert und vorgestellt, um schließlich mögliche Erweiterungen von DART zu diskutieren.

2. Das DART-Modell im Überblick

2.1 Das statische Grundmodell

DART steht für "Dynamic Applied Regional Trade". Das statische Grundmodell von DART ist ein mehrregionales, mehrsektorales Allgemeines Gleichgewichtsmodell (AGE-Modell) der Welt und basiert auf dem GTAP5-E(nergy) Datensatz des „Global Trade Projects“. Die 57 Sektoren und 66 Regionen von GTAP5 werden in DART je nach Fragestellung aggregiert. Für europäische Fragestellung arbeitet DART mit der folgenden Aggregation die in Tabelle 1 dargestellt ist. Die ökonomische Struktur von DART ist dabei vollständig für jede Region spezifiziert und umfasst Produktion, Investitionen und Endnachfrage. Primärfaktoren sind Arbeit, Kapital und Land.

Tabelle 1: Regionen und Sektoren von DART}

Sektoren	
Energiesektoren	Nicht-Energie Sektoren
COL Kohle	AGR Agrarsektor
CRU Rohöl	IMS Eisen, Emtall, Stahl
GAS Gas	CRP Chemische Industrie
OIL Mineralöl	CEM Zementindustrie
EGW Elektrizität	PPP Papier- und Zellstoffindustrie
	TRN Transportindustrie
	MOB Mobilität
	Y Sonstige Güter & Dienstleistungen
Regionen	
EU	Annex B
BEN Belgien, Niederlande, Luxemburg	USA Vereinigte Staaten
DEU Deutschland	FSU Ehemalige Sowjetunion
FRA Frankreich	OAB Kanada, Australien, Neuseeland, Japan
GBR Großbritannien	Weitere Regionen
ITA Italien	MEA Mittlerer Osten, Nordafrika
SCA Dänemark, Finnland, Schweden	CPA China, Hong-Kong
SEU Griechenland, Portugal, Spanien	IND Indien
REU Österreich, Irland	ROW Rest der Welt
EEU Osteuropa	

Produzenten: In jedem der Sektoren minimieren die Produzenten ihre Kosten für einen gegebenen Output. Dabei wird standard gemäß von konstanten Skalenerträgen ausgegangen. Die Produktionsfunktionen werden durch geschachtelte, separierbare Kostenfunktion mit konstanten Substitutionselastizitäten (Constant Elasticity of Substitution =

CES-Funktion) beschrieben. Für genauere Informationen sei auf Klepper et al. (2003) verwiesen.

Konsumenten: Der repräsentative Haushalt jeder Region, der private Haushalte und den Staat umfasst, erhält das Faktoreinkommen aus der Bereitstellung der Primärfaktoren. Nach Abzug von Steuern und Ersparnissen verwendet er das verfügbare Einkommen, um durch den Kauf von Gütern und Dienstleistungen seinen Nutzen zu maximieren bzw. um seinen Konsum mit minimalen Ausgaben zu erreichen. Die Ausgabenfunktion ist eine Cobb-Douglas Funktion der energetischen Inputs und der Materialinputs. In jeder Periode wird ein fester Anteil des Einkommens gespart und in die Produktionssektoren investiert.

Faktormärkte: In DART werden perfekte Faktormärkte und Vollbeschäftigung aller Faktoren angenommen. Arbeit ist ein homogenes Gut, das mobil zwischen den Sektoren innerhalb einer Region ist, aber international immobil. In der Grundversion von DART, gilt das gleiche auch für Kapital.

Außenhandel: Die Regionen von DART sind durch bilaterale Handelsströme verknüpft. Alle Güter außer dem Investitionsgut sind handelbar. Hierbei werden entsprechend der Armington-Annahme heimische und auswärtige Güter nach Herkunftsland differenziert und als unvollständige Substitute modelliert. Die Importnachfrage wird aus einer CES-Kosten- bzw. Ausgabenfunktion abgeleitet. Außerdem fallen bei internationalem Handel güter- und handelsstromabhängige Transportkosten an, die mit den Exporten verknüpft werden.

Auf der Exportseite wird die Armington-Annahme auf die Endproduktion der Sektoren angewendet, die sowohl für den heimischen Gebrauch, als auch für Exporte vorgesehen sind. Beide sind keine vollständigen Substitute. Exporte werden nicht nach Bestimmungsland unterschieden.

Damit DART zur Analyse von Klimapolitiken verwendet werden kann, werden außerdem die in der Produktion und beim Konsum freigesetzten Treibhausgase berechnet. In DART wird lediglich CO₂ erfasst, das den größten Anteil am Treibhauseffekt hat. CO₂ Emissionen entstehen in DART ausschließlich beim Verbrauch fossiler Energieträger. Für die Berechnung der CO₂ Emissionen von Gas und Kohle werden die in GTAP gegebenen physikalischen Mengen mit einem den IPCC Empfehlungen entnommenen Emissionskoeffizienten (0,258 kgC/MJ für Kohle und 0,0153 kgC/MJ für Gas) multipliziert. Die Berechnung der CO₂ Emissionen von Öl ist komplizierter. In DART geht Rohöl nur in die Produktion von Raffinerieölprodukten ein und erst bei deren Verbrennung als Produktionsinputs oder beim Endkonsumenten entstehen Emissionen, die sich nach dem Rohölanteil der Raffinerieprodukte richten. Der Emissionskoeffizient für Rohöl ist entsprechend den IPCC Empfehlungen 0,02 kgC/MJ. Die Emissionen jeder Region werden

berechnet, indem Importe und heimische Raffinerieprodukte mit ihrem spezifischen Rohölanteil und dem Emissionskoeffizienten multipliziert werden.

2.2 Dynamik

DART ist rekursiv-dynamisch, d.h. es löst eine Sequenz statischer Gleichgewichte die durch Kapitalakkumulation und Änderung des effektiven Arbeitsangebotes verknüpft sind. DART ist in dem Sinne rekursiv, dass es schrittweise statische Gleichgewichte löst, ohne dass zukünftige Entwicklungen berücksichtigt werden.

Die Haupteinflussfaktoren der Entwicklung des **Faktors Arbeit** sind Bevölkerungs-, Produktivitäts- und Humankapitalwachstum. Arbeit wird in Effizienzeinheiten $L(r,t)$ gemessen und entwickelt sich exogen im Zeitablauf. Für jede Region r ist das Arbeitsangebot zum Beginn der Periode $t+1$ gegeben durch:

$$L(r,t+1) = L(r,t) * (1 + gp(r,t) + ga(r) + gh(r))$$

Dabei ist $gh(r)$ die Wachstumsrate des akkumulierten Humankapitals je physikalischer Arbeitseinheit, $gp(r,t)$ die Bevölkerungs- und $ga(r)$ die Produktivitätswachstumsrate. Die Produktivitätsfortschritte und die Wachstumsraten des Humankapitals sind im Zeitablauf konstant aber unterscheiden sich je nach Region. Das Niveau der Humankapitalausstattung im Jahr 1990 ist Hall und Jones (1999) entnommen. Es steigt dann linear an, so dass die maximale Ausstattung von 12 Schuljahren in 2050 erreicht ist. Für einzelne Regionen werden Anpassungen vorgenommen. Das Bevölkerungswachstum entspricht aktuellen Schätzungen. Aufgrund mangelnder Daten über Veränderungen der Erwerbsrate wird es mit dem Wachstum der Erwerbsbevölkerung gleichgesetzt.

Der aggregierte **Kapitalstock** Kst der Periode $t+1$ ergibt sich aus dem Kapitalstock der Vorperiode abzüglich der Abschreibungen und zuzüglich der (physikalischen) Investitionen Iq :

$$Kst(r,t+1) = (1-d)*Kst(r,t) + Iq(r,t)$$

Die Abschreibungsrate d ist entsprechend der GTAP5 Daten 0,04. Die Kapitalallokation zwischen den Sektoren folgt aus der Optimierung der Firmen. Die Investitionen ergeben sich aus den zeitlich konstanten Sparquoten der regionalen Haushalte. Diese ad-hoc Annahme ist konsistent mit empirischen Beobachtungen von regional unterschiedlichen, aber kurzfristig nahezu konstanten Sparquoten.

3 Technischer Fortschritt in DART

Technischer Fortschritt (TF), allgemein und speziell im Energiebereich, wird in DART bislang auf drei Arten erfasst, die hier kurz geschildert werden.

3.1 Allgemeiner Produktivitätsfortschritt

Generell ist bei linear homogenen Produktionsfunktionen, wie sie auch in DART implementiert sind, die Produktivitätssteigerung eines Faktors äquivalent zu der Veränderung der totalen Faktorproduktivität oder der Produktivität eines beliebigen anderen Faktors. Um allgemeine, also nicht sektorspezifische, exogen vorgegebene Produktivitätssteigerungen abzubilden, genügt es damit, Produktivitätssteigerungen eines Faktors zu modellieren. In DART wird allgemeiner, exogener technischer Fortschritt wie im letzten Abschnitt beschreiben durch ein exogen vorgegebenes Produktivitätswachstum des Faktors Arbeit modelliert. Die Produktivitätswachstumsraten sind dabei im Zeitablauf konstant, unterscheiden sich aber je nach Modellregion. Auch die Produktion von Energie profitiert von diesem Produktivitätswachstum.

3.2 Preisinduzierte Input-Substitution

Ein wichtiger Aspekt von technischem Fortschritt wird in AGE Modellen wie DART dadurch wiedergespiegelt, dass sich im Zuge relativer Preisänderungen die Input-Koeffizienten bei der Produktion ändern. Höhere Energiepreisen führen beispielsweise zu einer Substitution von Energie durch Arbeit und Kapital. Da sich die relativen Preise im Zeitablauf aufgrund der veränderten Faktorausstattung auch in einem "business as usual" (BAU) Szenario ohne zusätzliche Politikmaßnahmen ändern, findet stets eine solche Substitution statt. Dies hat zur Folge, dass beispielsweise die Energieintensität des BIP in Deutschland im BAU Szenario jährlich um durchschnittlich etwas mehr als ein Prozent fällt und in 2030 nur noch 70 Prozent des Wertes von 2000 beträgt. Wird zusätzlich der Preis für Energie erhöht, sei es indirekt durch CO₂ Restriktionen oder direkt durch Energiesteuern, verstärkt sich die preisinduzierte Substitution. Hinter der Substitution stehen technische Prozesse, die in den Produktionsfunktionen abgebildet sind.

3.3 Autonome Energieeffizienzsteigerung

Technischer Fortschritt speziell im Energiebereich wird in vielen Ökonomie-Klima-Modellen durch im Zeitablauf exogen wachsende Energieeffizienz erfasst. Die gleiche Menge an Energie ist damit in der Lage mehr Output zu produzieren. Man spricht in diesem Zusammenhang von „'autonomous energy efficiency improvement“ (AEEI). Der AEEI Index

ist im Prinzip ein heuristisches Maß für alle nicht-preis getriebenen technologischen Verbesserungen. Die Wachstumsraten für die Energieeffizienz betragen in der Regel 0,5 bis 2,5 Prozent pro Jahr (Grubb et al. 2002, Löschel 2002).

In DART gibt es in der Grundversion keine automatische Energieeffizienzsteigerungen. Da es keine empirische Evidenz dafür gibt, dass der AEEI größer ist als die Wachstumsraten im Rest der Wirtschaft, wird argumentiert, dass die wesentlichen Prozesse bereits durch die preisinduzierte Substitution sowie den allgemeinen technischen Fortschritt abgebildet werden. Aus Vergleichszwecken und um die Auswirkungen von zusätzlichen Energieeffizienzsteigerungen aufzeigen zu können, kann auch in DART separat für jede Region und für jeden Sektor inklusive des Konsums eine Entwicklung der Energieeffizienz vorgegeben werden.

4 Endogener Technischer Fortschritt

Da die herkömmlichen Ansätze zur Modellierung von technischem Fortschritt nicht erklären können, wie technischer Fortschritt entsteht wird zunehmend der Versuch unternommen, technischen Fortschritt zu endogenisieren. Einen Überblick über verschiedenen Modellierungsansätze und erste Ergebnisse geben z.B. Grubb et al. (2002), Löschel (2002) und Weyant und Olavson (1999).. In diesem Abschnitt sollen die unterschiedlichen Ansätze kategorisiert werden, um anschließend mögliche Erweiterungen von DART zu diskutieren.

4.1 Modellierung von endogenem technischen Fortschritt

Allgemein kann man alle Ansätze zur Modellierung von endogenem technischen Fortschritt so kategorisieren, dass es im Modell eine *Wissensgröße* W gibt, die auf der einen Seite von einer *Quelle* Q des technischen Fortschritts beeinflusst wird und sich auf der anderen Seite auf verschiedene *Dimensionen* von Modellgrößen auswirkt.¹

Die Wissensgröße lässt sich als Bestand an technischem Know-How, Wissen oder Humankapital interpretieren. Die Frage nach der Quelle des technischen Fortschritts ist modelltechnisch gleichbedeutend mit der Frage nach den Modellgrößen, die den Bestand an W beeinflussen. Es geht also darum wie technischer Fortschritt induziert wird. Drei wesentliche Quellen des TF lassen sich unterscheiden.

- Erfahrung (Learning-by-doing)
- Investitionen in Forschung und Entwicklung (F&E)
- Steigende (Energie)Preise, die technische Verbesserungen forcieren.

Ein weiter wichtiger Aspekt von technischem Fortschritt steht ebenfalls im Zusammenhang mit den Quellen des TF: Spillovereffekte. Da es schwierig ist, neu erlangtes Wissen exklusiv zu nutzen werden technische Neuerungen in einem Land oder Sektor schnell von anderen Sektoren und in anderen Ländern übernommen. Dies lässt sich modelltechnisch erfassen, in dem die Wissensgröße eines Landes oder eines Sektors nicht nur von den induzierenden Quellen des TF im eigenen Land/Sektor abhängt, sondern auch von den Wissensgrößen anderer Länder/Sektoren und damit den dortigen Quellen des technischen Fortschritts.

Je nach Ansatz variieren die Modellgrößen die Learning-by-doing als Quelle des technischen Fortschritts erfassen sollen. Verwendet werden

- installierte Kapazität einer Technik (Gerlagh und van der Zwaan 2003)
- sektoraler Output Cararro und Galeotti 1997)
- sektoraler Kapitalstock (van Bergeijk et al. 1997)
- sektoraler Arbeitseinsatz (Kverndokk et al. 2004)
- Höhe der Emissionsvermeidung z.B. relativ zum Business-as-usual (BAU) Szenario (Goulder und Schneider 1999)

Um F&E als Quelle des technischen Fortschritts zu modellieren werden neben klassischen Investitionen in den Kapitalstock zusätzlich Investitionen in F&E modelliert. Bei preisinduziertem technischen Fortschritt sind veränderte Energiepreise direkt oder indirekt die Quelle für technischen Fortschritt. Spillovereffekte schließlich werden wie auch learning-by-doing von verschiedenen Größen abhängig gemacht, wie folgende Beispiele zeigen.

- Bei Kemfert (2002) hängen der technologische Spillover von kooperierenden Regionen von dortigen Produktionsänderungen ab, während Spillovers von nicht-kooperierenden Regionen zusätzlich vom Kapitalfluss abhängen.
- Bei Buonanno et al. (2003) und Goulder und Schneider (1999) gibt es einen Weltstock an Humankapital.
- Kverndokk et al. (2004) modellieren Spillovereffekte vom Backstop Sektor zu alternativen Energien die vom Arbeitseinsatz in den jeweiligen Sektoren abhängen.

Die Frage nach der Dimension des technischen Fortschritts ist gleichbedeutend mit der Frage welche Modellgrößen wie vom Bestand an W (oder direkt der Quelle des TF) beeinflusst werden. Auch hier gibt es verschiedene Möglichkeiten, die häufig gepaart mit bestimmten Quellen gewählt werden.

¹ In einigen Fällen wird W nicht explizit modelliert, sondern die Quelle des technischen Fortschritts wirkt sich direkt auf andere Modellgrößen aus. In diesem Fall würde gelten $W=Q$.

Eine Möglichkeit ist Wissen direkt als Input in die Produktion zu modellieren. Dies wird in Zusammenhang mit F&E induziertem technischen Fortschritt z.B. im neoklassischen Wachstumsmodell ETC-RICE (Buonanno et al. 2003) oder in einem AGE-Modell für die USA (Goulder und Schneider 1999) gemacht. F&E vergrößert den Stock an technischem Wissen und dies ist ein notwendiges Input für die Produktion. Am verbreitetsten ist ein Faktor oder Input vermehrender TF. Verbessert sich durch höheres Wissen die Produktivität der Primärfaktoren Arbeit oder Kapital, so kann die gleiche Menge an Output bei niedrigerem Faktor- oder Zwischenprodukteinsatz produziert werden. In Kverndokk et al. (2004) wird beispielsweise arbeitsvermehrender TF modelliert. Im Zusammenhang mit technischem Fortschritt im Energiebereich wird meist angenommen, dass die Energieeffizienz durch technischen Fortschritt steigt. Der oben erwähnte AEEI wird also endogenisiert. Dies geschieht beispielsweise bei der Modellierung von preisinduziertem technischen Fortschritt (Alcamo et al. 1998; Dowlatabadi 1998) oder gepaart mit F&E (Carrao und Galeotti 1997, Kemfert 2002, Popp 2004) oder mit learning by doing repräsentiert durch kumulative installierte Kapazität einer Technik als Quelle (Gerlagh und Zwaan 2003, van der Zwaan et al. 2002). In technisch orientierten Energiesystemmodellen wird technischer Fortschritt häufig durch Lernkurven abgebildet.

Eine weitere Möglichkeit ist, Substitutionselastizitäten im Zuge von TF zu verändern, so dass beispielsweise Energie leichter durch Kapital substituiert werden kann. Dies wird z.B. in dem Vintage Modell des GREEN Modells getan (Burniaux 1992).

Je nach im Modell exogen vorgegeben Parametern können auch weitere Modellgrößen durch TF verändert werden. Dies sind beispielsweise Vermeidungskosten (Goulder und Schneider 1999), Energie- oder CO₂-Intensität (Buonanno et al. 2003, Nordhaus 2002) oder sektorale Kapitalkosten (Dowlatabadi 1998). Diese Größen sind allerdings in DART, wie auch anderen AGE Modellen, endogen und können daher nicht als Dimension des TF dienen.

Abbildung 1 fasst noch einmal die wesentlichen Modellierungsmöglichkeiten zusammen.

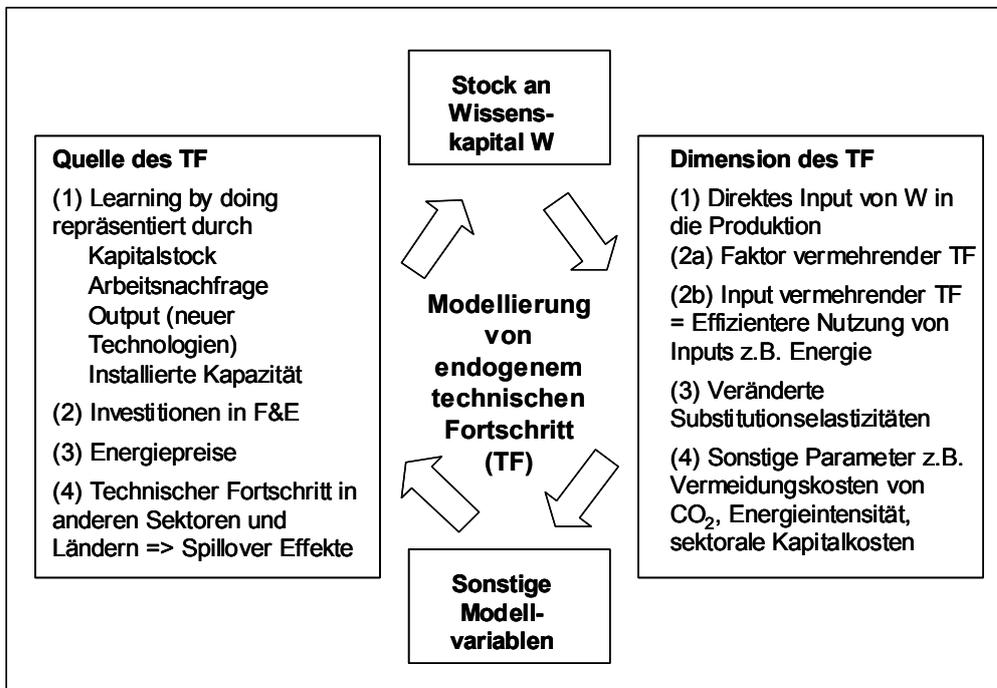


Abb 1 Modellierung von endogenem technischen Fortschritt

4.2 Kalibrierung von endogenem Technischen Fortschritt

Das eigentliche Problem bei der Modellierung von endogenem technischen Fortschritt ist weniger die technische Implementierung verschiedener Varianten - obwohl auch dies z.T. anspruchsvoll ist, oder Modelle schwerer lösbar macht - sondern im Fall von angewandten, numerischen Modellen, die empirische Fundierung. Auch wenn die wesentlichen Mechanismen empirisch nachgewiesen wurden, so fehlen doch verlässliche Informationen über die meisten der modellierungsrelevanten Parameter. Weder existieren Schätzungen über die Höhe der Spillovereffekte von F&E, noch darüber, wie Wissen zusammen mit anderen Inputs in die Produktionsfunktionen eingeht. Buonanno et al. (2003) zitieren Weyant mit dem Satz, dass die größte Herausforderung bei der Modellierung von endogenem technischen Fortschritt darin besteht, belastbare empirische Schätzungen wichtiger Parameter zu erhalten.² Entsprechend arbeiten viele der erwähnten Modelle mit mehr oder weniger heroischen ad-hoc Annahmen.

Am geringsten ist das Problem in technischen Energiemodellen, die Lernkurven verwenden. Hier existieren tatsächlich Schätzungen über Lernraten, d.h. Kostenregression bei verdoppelnder installierter Kapazität, für einzelne Technologien. Eine Ausnahme unter den Modellen ist auch das ENTICE Modell von Popp (2004), das explizit auf empirische Schätzungen z.B. von F&E Preiselastizitäten für die USA basiert. Auch dem Modell von preisinduzierter TF, das Dowlatabadi (1998) verwendet liegt eine empirische Schätzung für die USA zugrunde. Allerdings wird nicht erläutert, wie die Parameter für andere Modellregionen gewählt werden.

Andere Modelle wählen weniger aufwändige, pragmatische Vorgehensweisen. Nordhaus (2002) kalibriert seine TF Parameter so, dass die CO₂ Intensität vergleichbar zu einem Modell ohne endogenen TF ist und der F&E Output Quotient zwei Prozent beträgt. Goulder und Mathai (2000) nehmen an, dass die Inputkoeffizienten für F&E Investitionen denen in ausgewählten wissensintensiven Sektoren entsprechen und dass das Verhältnis von physikalischem Kapital und Wissenskapital ursprünglich 5:1 beträgt. Sue Wing (2003) geht ähnlich vor, nimmt aber - grob gesagt - das Input von wissenintensiven Sektoren direkt als Wissenskapital und deren Output als F&E Output. Kempfert (2002) teilt die herkömmlichen Investitionen mit Hilfe von aus der Literatur abgeleiteten Share Parametern in physikalische und Wissensinvestitionen auf. Sie nimmt also an, dass Wissensinvestitionen die selben Input Koeffizienten wie physikalische Investitionen haben. Kverndokk et al. (2004) verzichten ganz auf empirische Werte und verwenden nur illustrative, „guestimated“ Parameter. Spillover-Effekte werden ebenfalls meist ad-hoc modelliert, indem z.B. wie in Buonanno et al. (2003) die Outputelastizität von Welthumankapital so kalibriert wird, dass die F&E Outputverhältnisse im Basisjahr den historischen Werten entsprechen. Zum Teil werden keine Annahmen über Werte von Parametern gemacht.

Anzumerken ist schließlich, dass sich für mehr-regionale Modelle wie DART, die empirische Fundierung von Parametern noch ungleich schwerer ist, da Schätzungen wenn überhaupt nur für die USA oder zumindest große Industrieländer vorliegen.

4.3 Mögliche Erweiterungen des DART Modells

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie sich endogener technischer Fortschritt in DART implementieren lässt. Das ist zum einen eine Frage der technischen Machbarkeit, zum anderen der benötigten Parameter.

Hierzu ist es sinnvoll zu Abbildung 1 zurückzugehen und sich die verschiedenen Quellen und Dimensionen von TF anzusehen. Die erste Quelle von TF ist learning-by-doing. Dies in Modelle zu implementieren macht nur Sinn, wenn neue Energietechnologien, z.B. erneuerbare Energien explizit modelliert werden. In DART, wie auch den meisten Modellen, die primär auf dem GTAP Datensatz basieren, sind erneuerbare Energien im allgemeinen Elektrizitätssektor enthalten, und nicht separate erfasst. Primär auf solche neuen, „sauberern“ Techniken beziehen sich aber die Lernraten und Effizienzsteigerungen die z.B. von kummulierter installierter Kapazität, Faktoreinsatz oder sektoralem Output abhängig modelliert werden. Ein weitere Quelle von TF im Zusammenhang mit Learning-by-doing ist in einigen Modellen die Höhe der Emissionsvermeidung relativ zum BAU Szenario. Dies ließe sich auch in DART modellieren, wäre aber recht ähnlich zum Vorgehen bei

² „I think the most difficult challenge in dealing with induced technological change is obtaining good empirical

preisinduziertem TF, da Emissionsrestriktionen in DART durch direkte oder indirekte Erhöhung der Energiepreise erreicht werden.

Die zweite Quelle in Abbildung 1 sind Investitionen in F&E. Der meist (z.T. auch schon in AGE Modellen verwendete Ansatz) ist, einen Wissensstock einzuführen, der durch F&E Investitionen wächst und diesen analog zum physikalischen Kapitalstock und Investitionen in physikalisches Kapital zu behandeln. Da aber F&E Investitionen weder im GTAP Datensatz, noch in anderen Input-Output Tabellen die für AGE Modelle verwendet werden, explizit enthalten sind, sind für eine solche Modellierung zusätzliche Annahmen und Daten nötig. Hierfür gibt es bereits Beispiele (Goulder und Schneider 1999, Sue Wing 2003), die sich allerdings nicht immer auf den mehr-regionalen GTAP Datensatz anwenden lassen. Die einfachste Möglichkeit ist, die Investitionen des Datensatzes basierend auf empirischen Schätzungen in physikalische und F&E Investitionen aufzuteilen. Letztere wirken sich dann z.B. auch auf den AEEI aus. Diese Vorgehensweise wählt Kemfert (2002) in dem in vielerlei Hinsicht mit DART vergleichbaren mehr-sektoralen, mehr-regionalen AGE Modell WIAGEM. Anspruchsvollere Ansätze erfordern eine grundlegende Überarbeitung des Datensatzes und sind auch aufgrund mangelnder Daten zumindest nur sehr schwierig für alle Modellregionen durchzuführen.

Technisch einfach ist die Implementierung von preisinduziertem technischen Fortschritt. Preise für fossile Energieträger und Strom sowie ein aggregierter Energiepreis sind in DART enthalten und können als Quelle des TF dienen. Wie in anderen Modellen auch, können die Preise den AEEI Koeffizienten beeinflussen, der damit zu einem „price induced efficiency improvement Index“ (PIEEI) wird. Annahmen müssen in diesem Fall lediglich über die Reaktion der Energieeffizienz auf ändernde Energiepreisen getroffen werden. Hierbei kann z.B. Paper von Dowlatabadi und Oravetz (1997) und Popp (2002) zurückgegriffen werden, die solche Schätzungen für die USA durchführen. Auch wenn es schwierig ist, Schätzungen für jede Modellregion zu erhalten, können zumindest für erste illustrative Analysen ähnliche Annahmen für alle Modellregionen getroffen werden.

Wissensspillover schließlich lassen sich bei allen Erweiterungen implementieren, indem die Wissensquelle in einem Land auch den technischen Fortschritt in anderen Ländern beeinflusst. Auch hier sind Annahmen über die entsprechenden Reaktionen nötig.

Denkbar ist schließlich sowohl bei F&E Ansätzen als auch preisinduziertem technischen Fortschritt, die Anpassung von Elastizitäten statt des AEEI. Hierzu fehlen allerdings in noch größerem Maße empirische Grundlagen.

Insgesamt liegt das eigentliche Problem bei der Modellierung von endogenem technischen Fortschritt in DART, wie schon erwähnt, weniger in der technischen Implementierung verschiedener Varianten, als in der empirische Fundierung. Viele der existierenden Modelle arbeiten aus diesem Grund mit ad-hoc Annahmen. Für erste illustrative Simulationen ist eine solche Vorgehensweise auch in DART geplant.

5 Schlussbetrachtungen

In diesem Paper wurde kurz dargestellt, wie technischer Fortschritt bislang in dem mehr-regionalen, mehr-sektoralen, berechenbaren allgemeinen Gleichgewichtsmodell DART implementiert ist. Da gerade was den Energiebereich betrifft, wesentliche Prozesse und Rückkoppelungen von technischem Fortschritt nicht erfasst werden, soll DART in Zukunft erweitert werden, um technischer Fortschritt im Energiebereich zu endogenisieren. Hierfür existieren verschiedene Ansätze, die unterschiedlich komplex sind. Im ersten Schritt sollen in DART energiepreisabhängige Energieeffizienzsteigerungen mit Hilfe eines preisabhängigen AEEI eingeführt werden. Dies ist technisch relativ einfach machbar und es kann auf empirische Schätzungen für die Reaktion von Energieintensitäten auf Energiepreise zurückgeriffen werden. Ein zweiter Ansatz ist Investitionen in F&E zu modellieren, die zu einer erhöhten Energieeffizienz führen. Dies ist anspruchsvoller, da sowohl Anpassungen in dem ursprünglichen Datensatz, als auch mangels empirischer Daten im größeren Maße ad-hoc Annahmen nötig sind. Aus diesem Grund werden sich erste Simulationen auf illustrative Analysen beschränken müssen, die nur bedingt empirisch begründet sind. Zum Beispiel kann der Ansatz von Kemfert (2002) gewählt werden, auch um die Ergebnisse der Modelle DART und WIAGEM zu vergleichen, die, wenn auch in vielerlei Hinsicht vergleichbar, doch auch gravierende Unterschiede aufweisen.

Langfristig besteht die große Herausforderung darin, die notwendigen Annahmen empirisch zu fundieren und wo möglich zu regionalisieren. Nur wenn dies gelingt, bietet ein regional und sektoral disaggregiertes, angewandtes Modell wie DART echte Vorteile gegenüber stilisierteren, kompakteren Modellen, mit deren Hilfe endogener technischer Fortschritt auf eher theoretische Weise untersucht wird.

Literatur

Alcamo, J., R. Leemans, und E. Kreileman (Hrg.) (1998). *Global Change Scenarios of the 21st Century. Results from the IMAGE 2.1 Model*. Oxford: Pergamon.

Buonanno, P., C. Carraro, und M. Galeotti (2003). Endogenous induced technical change and the costs of Kyoto. *Resource and Energy Economics* 25, 11–34.

Burniaux, J.-M. (1992). GREEN - a multi-sector, multi-region dynamic general equilibrium model for quantifying the costs of curbing CO₂ emissions: a technical manual. OECD working paper, Economics Directorate, OECD, Paris.

Carraro, C. und M. Galeotti (1997). Economic growth, international competitiveness and environmental protection: R & D and innovation strategies with the warm model. *Energy Economics* 19, 2–28.

Dowlatabadi, H. (1998). Sensitivity of climate change mitigation estimates to assumptions about technical change. *Energy Economics* 20, 473–493.

Dowlatabadi, H. und M. A. Oravetz (1997). US long-term energy intensity: backcast and projection. Unpublished draft, Carnegie Mellon University.

Gerlagh, R. und B. van der Zwaan (2003). Gross world product and consumption in a global warming model with endogenous technological change. *Resource and Energy Economics* 25, 35–57.

Goulder, L. H. und K. Mathai (2000). Optimal CO₂ abatement in the presence of induced technological change. *Journal of Environmental Economics and Management* 39, 1–38.

Goulder, L. H. und S. H. Schneider (1999). Induced technological change and the attractiveness of CO₂ abatement policies. *Resource and Energy Economics* 21, 211–253.

Grubb, M., J. Koehler, und D. Anderson (2002). Induced technical change in energy and environmental modeling. *Annual Review of Energy and the Environment* 27, 271–308.

Hall, R. E. und C. I. Jones (1999). Why do some countries produce so much more output than others? *Quarterly Journal of Economics* 114 (1), 83–116.

Kemfert, C. (2002). Induced technological change in a multi-regional, multi-sectoral integrated assessment model (WIAGEM). Working paper, University of Oldenburg.

Klepper, G., S. Peterson, und K. Springer (2003). DART97: A description of the multi-regional, multi-sectoral trade model for the analysis of climate policies. Kiel Working Papers, 1149, Kiel Institute for World Economics.

Kverndokk, S., K. E. Rosendahl, und T. F. Rutherford (2004). Climate policies in and induced technological change: Which to choose, the carrot or the stick? *Environmental and Resource Economics* 27, 21–41.

Löschel, A. (2002). Technological change in economic models of environmental policy: A survey. *Ecological Economics* 43, 105–126.

Nordhaus, W. D. (2002). *Modeling Induced innovation in Climate Change Policy*, Chapter 9, pp. 259–290. Resources for the Future Press.

Popp, D. (2002). Induced innovation and energy prices. *American Economic Review* 92 (1), 160–180.

Popp, D. (2004). Entice: Endogenous technological change in the dice model of global warming. *Journal of Environmental Economics and Management* 28, 742–768.

Sue Wing, I. (2003). Induced technical change and the cost of climate policy. Report 102, MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.

van Bergeijk, P. A., G. A. van Hagen, R. A. de Mooij, und J. van Sinderen (1997). Endogenizing technological progress: The MESEMET model. *Energy Modelling* 14, 341– 67.

van der Zwaan, B, R. Gerlagh, G. Klaassen, und L. Schrattenholzer (2002). Endogenous technological change in climate change modelling. *Energy Economics* 24, 1–19.

Weyant, J. P. (1997). Technological change and climate policy modelling. In *Proceedings of the Paper Presented at the IIASA Workshop on Induced Technological Change and the Environment*, Laxenburg 26-27 Juni.

Weyant, J. P. und T. Olavson (1999). Issues in modeling induced technological change in energy, environment, and climate policy. Working Paper 14.5, Energy Modeling Forum.