

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Umweltpolitische Instrumente	3
1.2	Dynamische Anreizwirkung	8
2	Innovations- und Diffusionsmodelle	12
2.1	Das Modell von MAGAT	19
2.2	Das Modell von DOWNING UND WHITE	20
2.3	Das Modell von MILLIMAN UND PRINCE	24
2.4	Das Modell von MONTERO	28
2.5	Kritische Betrachtung der Literatur	29
3	Das Grundmodell	34
3.1	Die Vermeidungskosten	35
3.2	Das soziale Optimum	35
3.3	Steuern und auktionierte Zertifikate	37
3.4	Kostenlos ausgegebene Zertifikate und Subventionen	42
3.5	Emissionsstandards	44
4	Diffusion neuer Vermeidungstechnologien	46
4.1	Aggregiertes Emissionsziel	48
4.1.1	Aggregiertes Emissionsziel	49
4.1.2	Ursprünglich optimales aggregiertes Emissionsziel	51
4.1.3	Ex-post Effizienz	55
4.2	Anpassung der Politik – Ratcheting	57
4.2.1	Marktinstrumente	57
4.2.2	Standards	58
4.3	Asymmetrische Firmen	61

4.3.1	Steuern und Zertifikate	62
4.3.2	Kostenlos ausgegebene Zertifikate	68
4.3.3	Emissionsstandards	68
4.3.4	Aggregiertes Emissionsziel	71
4.3.5	Das soziale Optimum	72
4.3.6	Ursprünglich optimales aggregiertes Emissionsziel	74
4.3.7	Anpassung der Politik	76
4.4	Zusammenfassung	77
5	Eine Alternative – Emissionsoptionen	79
5.1	Das modifizierte Modell	81
5.2	Das soziale Optimum	83
5.3	Optionen	83
5.4	Ein Beispiel	89
5.5	Zusammenfassung	91
6	Innovation von Vermeidungstechnologien	93
6.1	Das erweiterte Modell	95
6.1.1	Steuern und Subventionen	97
6.1.2	Emissionsstandard	98
6.1.3	Auktionierte und kostenlos ausgegebene Zertifikate	99
6.2	Das soziale Optimum	104
6.3	Umweltpolitische Instrumente	105
6.3.1	Szenario A	106
6.3.1.1	Aggregiertes Emissionsziel	107
6.3.1.2	Ursprünglich optimales Emissionsziel	108
6.3.2	Anpassung der Höhe des Instrumentes	110
6.3.2.1	Szenario B: Anpassung nach erfolgreicher Innovation	111
6.3.2.2	Szenario C: Anpassung nach erfolgter Diffusion	115
6.4	Produktionskosten	121
6.4.1	Das soziale Optimum	123
6.4.2	Szenario A	125
6.4.2.1	Steuern	126
6.4.2.2	Zertifikate	126
6.4.2.3	Standards	128

6.4.3	Szenario B	128
6.4.3.1	Steuern	129
6.4.3.2	Zertifikate	130
6.4.3.3	Standards	132
6.4.4	Szenario C	133
6.4.4.1	Steuern und Zertifikate	133
6.4.4.2	Standards	135
6.5	Zusammenfassung	135
7	Diskussion und Ausblick	138
7.1	Umweltpolitische Diskussion	140
7.1.1	Steuern und Subventionen	143
7.1.2	Zertifikate und Optionen	144
7.1.3	Einheitliche Emissionsobergrenzen	146
7.2	Ausblick	148
	Mathematischer Anhang	151
	Literaturverzeichnis	178

Zur dynamischen Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung der Würde eines
Doktors der Wirtschaftswissenschaften (Dr.rer.pol.)
an der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der
Ruprecht - Karls - Universität Heidelberg

vorgelegt von

Wolfram Unold

aus Nürtingen

im Januar 2000

Danksagung

Mein besonderer Dank für die Unterstützung in den vergangenen Jahren gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Till Requate. Wertvolle Anregungen und hartnäckiges Hinterfragen haben diese Arbeit wesentlich vorangebracht. Darüber hinaus hat er es mir ermöglicht, Teile meiner Arbeit auf internationalen Konferenzen und Workshops vorzutragen.

Ich möchte auch Prof. Dr. K. Conrad für die Mühe danken, diese Arbeit zu begutachten.

Ferner gilt mein Dank der Kollegin und den Kollegen am Interdisziplinären Institut für Umweltökonomie, die meine Arbeit mit Rat und Tat begleitet haben, insbesondere Andreas, der die Arbeit Korrektur gelesen hat.

Kapitel 1

Einleitung

Saubere Luft und klares Wasser galten lange Zeit als selbstverständlich. Folglich wurden Schadstoffe, die bei der Produktion oder auch beim Konsum eines Gutes entstehen, sorglos in die Umwelt abgegeben, ohne die Auswirkungen auf die Biosphäre zu berücksichtigen. Inzwischen weiß man, daß das Ökosystem der Erde nur eine begrenzte Fähigkeit hat, Schadstoffe abzubauen. Solange der durch menschliches Handeln verursachte Schadstoffeintrag verglichen mit der Aufnahmekapazität der Umwelt gering war, konnte auch keine Veränderung der Qualität von Luft und Wasser festgestellt werden. Seit dem Beginn der Industrialisierung ist der Ressourcenumsatz und damit der Schadstoffausstoß jedoch stark angestiegen.

Das vielleicht eindrücklichste Beispiel überregionaler Umweltzerstörung ist der Schaden, den „*saurer Regen*“ in den Wäldern und Seen der industrialisierten Länder anrichtet hat und immer noch anrichtet. Bekannt sind die Bilder von abgestorbenen Wäldern im Erzgebirge oder „umgekippter“, ökologisch toter skandinavischer bzw. kanadischer Seen. Saurer Regen ist eine Folge der Verbrennung schwefelhaltiger fossiler Brennstoffe. Hauptverursacher sind dabei die Energieerzeugung sowie der Verkehr. Bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe mit Luft entsteht zunächst unter anderem auch gasförmiges Schwefeldioxid (SO_2). Dieses kann in der Atmosphäre weite Strecken zurücklegen, bevor es durch Niederschlag aus der Luft ausgewaschen wird. Dabei löst sich das Schwefeldioxid in den Wassertröpfchen der Wolken als schweflige Säure. Der niedergehende Regen säuert Böden und Oberflächengewässer. Dies schädigt unter anderem die Wurzeln der Pflanzen. Mit dem zunehmenden Erkranken von Bäumen, dem Absterben ganzer Wälder und dem ökologischen Tod von Seen waren die Regierungen

der betroffenen Länder zum Handeln gezwungen. Dies galt in besonderem Maße für Länder wie z.B. Kanada oder Schweden, bei denen der Holzeinschlag ein wichtiger Produktions- und Exportfaktor ist. Da das Holz vieler Bäume nicht mehr nutzbar war, verursachten die absterbenden Wälder einen monetär leicht meßbaren, volkswirtschaftlichen Schaden.

In der Praxis haben sich verschiedene umweltpolitische Instrumente zur Regulierung des Naturverbrauchs durchgesetzt. Die am meisten verbreiteten Instrumente sind rechtliche Auflagen, Steuern und Subventionen sowie sogenannte „Zertifikate“. Eine Regierung bzw. ein Gesetzgeber, der vor der Entscheidung für die geeignetste Art und Weise der Regulierung des Schadstoffausstoßes steht, wird die in Frage kommenden Instrumente anhand mehrerer Kriterien gegeneinander abwägen. Einige zu beachtende Aspekte sind dabei: Wie hoch ist der Informationsbedarf des Regulierenden für den Einsatz eines Instrumentes? Mit welcher Genauigkeit kann das gewünschte umweltpolitische Ziel erreicht werden? Welche Vermeidungskosten entstehen durch das Instrument? Man kann diese Kriterien aus zwei Blickwinkeln betrachten: In einer *kurzfristigen* Sichtweise kommt es vor allem darauf an, ein geeignetes Schadstoffniveau zu bestimmen und dieses mit der bestehenden Technologie zu möglichst geringen Kosten umzusetzen. Dieser Aspekt ist von der ökonomischen Theorie bereits ausführlich behandelt worden und kann größtenteils in umweltökonomischen Lehrbüchern¹ nachgelesen werden. Die Theorie räumt marktorientierten Instrumenten in dieser Hinsicht einen Vorrang gegenüber einer Auflagenpolitik ein. In einer *langfristigen* Perspektive steht hingegen vor allem die dynamische Anreizwirkung, umweltfreundlichere Technologien zu entwickeln und diese einzusetzen, im Vordergrund. Mit anderen Worten geht es um den durch die umweltpolitische Regulierung induzierten technologischen Wandel hin zu einer umweltverträglicheren Produktionsweise. Diese langfristigen Auswirkungen umweltpolitischer Instrumente wurden in der umweltökonomischen Literatur bisher unzureichend untersucht. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten, diese dynamische Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente besser zu verstehen.

Die Arbeit ist folgendermaßen gegliedert: Der nächste Abschnitt bildet eine Einführung in umweltpolitische Instrumente. Der darauf folgende Abschnitt konzentriert sich auf das Kriterium der dynamischen Anreizwirkung, das im Mittelpunkt dieser Arbeit steht. In Kapitel 2 wird die Literatur vorgestellt, die sich mit der dynamischen Anreizwirkung

¹Es sei hierzu auf die Lehrbücher z.B. von BAUMOL UND OATES [1998], TURNER ET AL. [1994], WEIMANN [1995] und SIEBERT [1998] verwiesen.

umweltpolitischer Instrumente beschäftigt. In Kapitel 3 wird das Modell eingeführt, das den Ausgangspunkt der darauf folgenden Analysen bildet. In Kapitel 4 werden die Anreize verschiedener umweltökonomischer Instrumente verglichen, eine neue, umweltfreundliche Technologie zu übernehmen. Kapitel 5 bildet einen Einschub. Es wird ein Optionsmodell als Alternative zu den bekannten Instrumenten vorgestellt. In Kapitel 6 werden schließlich die Anreize umweltökonomischer Instrumente analysiert, eine neue Technologie zu entwickeln. Hierzu wird das Modell aus Kapitel 3 um einen Innovator erweitert. Dieser kann die neue Technologie, nachdem er sie entwickelt hat, an verschmutzende Firmen verkaufen. Das letzte Kapitel diskutiert die Ergebnisse und gibt einen Ausblick.

1.1 Umweltpolitische Instrumente

Um eine Zerstörung der Biosphäre zu verhindern, fordern Umweltschützer häufig, den Ausstoß von Schadstoffen ganz zu untersagen. Eine Gesellschaft kann aber nicht klare Gewässer, saubere Luft, unberührte Natur und zugleich einen hohen materiellen Lebensstandard verbunden mit einer dafür ausreichenden Rohstoffgewinnung, Energie- und Güterproduktion haben. Daher ist es notwendig, die ökonomischen und ökologischen Bedürfnisse der Gesellschaft optimal abzuwägen. Zur Regulierung des Ausstoßes an Schwefeldioxid wurden in verschiedenen Ländern dabei ganz unterschiedliche Instrumente gewählt. Traditionell spielt im Umweltschutz in den meisten Ländern das *Ordnungsrecht* eine herausragende Rolle. Im Hinblick auf die Gefahrenabwehr wurden schon früh Auflagen erlassen, die ein Unternehmen erfüllen muß, um produzieren zu dürfen. In Deutschland wurde unter anderem der SO₂-Ausstoß bisher ordnungsrechtlich geregelt.² In einigen Ländern wurden in den letzten 20 Jahren solche ordnungsrechtlichen Auflagen durch marktwirtschaftliche Instrumente ergänzt oder sogar ersetzt. So wurde in den USA schon Anfang der 70er Jahre davon abgewichen, eine strenge Einhaltung von Auflagen durch jede einzelne Anlage einzufordern. Zunächst wurde es Firmen erlaubt, den Ausstoß verschiedener Anlagen eines Standortes mitein-

²Die Regulierung von Schadstoffemissionen ist in Deutschland im Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) geregelt. In der Technischen Anlage Luft (TALuft) wird dabei z.B. den Betreibern von Großfeuerungsanlagen (Kraftwerken) vorgeschrieben, welche Prozesse einzusetzen sind, um eine Betriebserlaubnis zu erhalten. Aber auch der Schwefelgehalt in Kraftstoffen wie Heizöl oder Benzin muß einen vorgegebenen Standard einhalten.

ander zu verrechnen. Später konnten Firmen auch regional Emissionen untereinander handeln. Der Title-IV-Zusatz des Clean Air Act von 1990 (CAAA) führte zum ersten Mal ein System national handelbarer SO_2 -Emissionsrechte ein. In den skandinavischen Ländern wurde hingegen zusätzlich zu Umweltauflagen eine SO_2 -Steuer eingeführt (so z.B. in Norwegen 1970 bzw. in Schweden 1991).

Als Alternative zu einer direkten oder Mengenregulierung bietet sich eine Regulierung über den Preis für Schadstoffe an. Die Idee einer „*Ökosteuer*“ geht bereits auf PIGOU [1920] zurück. Ausgangspunkt ist dabei die Feststellung, daß unter Umständen die privaten Kosten der Herstellung eines Gutes nicht mit den gesamten sozialen Kosten seiner Herstellung übereinstimmen. Dies ist auch gemeint, wenn man in der umweltökonomischen Debatte umgangssprachlich davon spricht, daß die Preise bestimmter Güter nicht die „wahren“ Kosten widerspiegeln. Folgende Situation soll dies verdeutlichen: In einem Dorf leben ein Kraftwerkbesitzer und ein Waldbesitzer (Förster). Sowohl der von dem Kraftwerk erzeugte Strom als auch das durch Einschlag gewonnene Holz können in einer großen Stadt verkauft werden. Dabei können weder der Förster noch der Kraftwerksbetreiber die Marktpreise für ihre Güter beeinflussen. Bei der Erzeugung des Stromes entsteht jedoch zusätzlich Schwefeldioxid. Dieses schädigt den Wald des Försters. Mit zunehmendem Waldschaden kann der Förster weniger Holz exportieren. Ohne Eingreifen des dem Gemeinwohl verpflichteten Bürgermeisters³, wird der Kraftwerksbetreiber den Schaden, den er dem Wald des Förster zufügt, nicht in die Berechnung seiner Kosten miteinbeziehen. Die privaten Kosten der Energieerzeugung sind also geringer als die sozialen Kosten. Der Bürgermeister erkennt dies und führt eine Steuer auf den Ausstoß von SO_2 ein. Der Ausstoß einer Einheit SO_2 ist nun nicht mehr umsonst. Damit steigen die Stromerzeugungskosten des Kraftwerkbesitzers. Um weiterhin günstigen Strom verkaufen zu können, wird er versuchen, die Kosten zu senken, indem er die Emissionen an SO_2 reduziert. Er kann dabei z.B. einen schwefelärmeren Brennstoff einsetzen oder auch das SO_2 aus der Abluft herausfiltern. Entscheidend aus der Sicht des Bürgermeisters ist, daß die Höhe der Steuer dabei genau dem Schaden an dem Wald entspricht, den der Ausstoß der letzten Einheit SO_2 verursacht. Denn, wenn der Steuersatz höher ist, sind die Kosten der Vermeidung der letzten Einheit an SO_2 größer als der Nutzen, der dem Förster entsteht. Wenn der Steuersatz

³Streng genommen, kann der Bürgermeister natürlich nicht ohne Ermächtigung des Dorfrates eingreifen. Im folgenden sei der Einfachheit halber jedoch angenommen, daß der Dorfrat immer der Empfehlung des Bürgermeisters folgt.

jedoch niedriger ist, ist der Schaden am Wald größer als die Kosten, den Schaden zu verhindern. BAUMOL UND OATES [1971] argumentieren jedoch, daß im allgemeinen dieser sogenannte *optimale Grenzscha-*den in der Praxis nicht ermittelt werden könne. Intuitiv ist klar, daß es sich schon als schwierig gestaltet, den gesamten Schaden des SO₂-Ausstoßes in obigem Szenario zu ermitteln. Zu dem Schaden an dem Wald kommt genau genommen auch z.B. noch die Gesundheitsbelastung der Bevölkerung und der Tierwelt bzw. der Verlust des Erholungswertes des Waldes hinzu. Diese in Geldeinheiten objektiv zu messen, ist sehr schwierig und aufwendig, wenn nicht sogar unmöglich. Auf ihrer Kritik aufbauend entwickeln BAUMOL UND OATES [1971] einen sogenannten *Standard-Preis-Ansatz*. Demnach wird die Einhaltung eines durch die Politik vorgegebenen aggregierten Emissionszieles mittels einer Steuer sichergestellt. Der Gemeinderat des Dorfes würde also den aggregierten SO₂-Ausstoß so begrenzen, daß der Anteil an kranken Bäumen ein gewisses Niveau nicht überschreitet. Der Bürgermeister müßte dann einen Steuersatz setzen, mit dem dieses Emissionsziel erreicht werden kann.

In der Praxis wurde bzw. wird bisher der SO₂-Ausstoß in keinem Land ausschließlich durch ein Steuerregime geregelt. Einige Staaten haben jedoch zusätzlich zu SO₂-Emissionsauflagen SO₂-Steuern eingeführt. So erheben z.B. Dänemark, Frankreich, Japan, Norwegen und Schweden Abgaben auf den Ausstoß von SO₂.⁴ Sowohl die Höhe der Abgabe als auch ihre Verwendung unterscheiden sich in den einzelnen Ländern jedoch erheblich. In Schweden beträgt der Steuersatz 8.200 DM pro Tonne SO₂, in Frankreich hingegen 45 DM pro Tonne! Während in Frankreich nur der Ausstoß von Großemittenten wie Kraftwerken besteuert wird, sind diese in Dänemark zum großen Teil von der Steuer befreit. In den skandinavischen Ländern wiederum werden Vermeidungsmaßnahmen auf die zu zahlenden Steuern angerechnet. In Frankreich müssen die Steuereinnahmen aus verfassungsrechtlichen Gründen an die Firmen zurückerstattet werden. In Japan schließlich dient das Steueraufkommen zur Kompensation von Gesundheitsschäden, die durch den Ausstoß des Schadstoffes entstehen. Die Höhe der Steuer richtet sich in diesem Fall daher nach der durch den Schadstoff verursachten gesundheitlichen Beeinträchtigung der Bevölkerung.

In einem vielbeachteten Artikel „*The Problem of Social Cost*“ lehnt COASE [1960] ein Eingreifen des Staates, wie es von PIGOU vorgeschlagen wird, ab. COASE kann nämlich zeigen, daß bei *eindeutig definierten Besitzrechten* an der Umwelt unter bestimmten

⁴Man vergleiche hierzu CANSIER UND KRUMM [1997] bzw. OECD [1997].

Bedingungen ein Eingreifen des Staates gar nicht nötig ist. Wichtig ist dabei zunächst die Eindeutigkeit der Besitzrechte und nicht, wer sie inne hat. Man beachte jedoch, daß letzteres die Verteilung des Einkommens mitbestimmt. Hierzu sei noch einmal auf das kleine Dorf hingewiesen. Wie bereits erwähnt, wird bei der Erzeugung des Stromes SO_2 in die Luft emittiert, das den Wald des Försters in Mitleidenschaft zieht. Hat der Kraftwerksbetreiber das Recht dazu, das Schwefeldioxid in die Luft abzugeben, dann kann der Förster die Erkrankung seines Waldes nicht unmittelbar verhindern. Er kann aber dem Kraftwerksbetreiber eine Entschädigung für jede Einheit SO_2 anbieten, um die dieser seinen Schadstoffausstoß reduziert. Offensichtlich wird der Kraftwerksbesitzer dann seinen SO_2 -Ausstoß genau soweit reduzieren, wie die Kosten dafür geringer sind als die Kompensationszahlung des Försters. Der Förster wird die Höhe der Kompensationszahlung so wählen, daß der durch Nichtausstoß der letzten Einheit Emissionen vermiedene Schaden der Kompensationszahlung für eine vermiedene Einheit an SO_2 entspricht. Kann der Förster andererseits ein Anrecht auf saubere Luft geltend machen, dann muß der Kraftwerksbetreiber den Förster für die Belastung der Luft mit SO_2 kompensieren.⁵ Der Förster wird einer solchen Entschädigung zustimmen, falls die Kompensationszahlung mindestens so groß ist wie der Schaden an seinem Wald. Entscheidend für die Gültigkeit des Coase Theorems ist jedoch die Höhe der *Transaktionskosten*. Transaktionskosten werden die Kosten genannt, die bei der Übertragung von Eigentumsrechten anfallen. Dazu gehören der Zeitaufwand, der entsteht, bis eine Einigung erzielt worden ist, ebenso wie die Kosten für das Erstellen eines Vertrages bzw. der Aufwand zur Überwachung der Emissionen. In dem kleinen Dorf könnten sich der Kraftwerksbesitzer und der Förster an einen Tisch setzen und – ohne großen Aufwand – einen Vertrag aushandeln. Sind jedoch mehrere Akteure an den Verhandlungen beteiligt, dann steigen auch rasch die Transaktionskosten. Insbesondere im Fall einer Schadstoffbelastung der Luft ist die Anzahl der Betroffenen in der Regel sehr groß. Außer dem Förster müssen eigentlich auch alle Dorfbewohner an den Verhandlungstisch geholt werden, sofern sie von der Luftbelastung gesundheitlich betroffen sind oder der Erholungscharakter des Waldes eingeschränkt wird. Die Einwohner eines ganzen Dorfes zu Verhandlungen an einen Tisch zu bekommen, ist aber beinahe unmöglich. Noch schwieriger ist es, einen Vertrag aufzusetzen, der von allen akzeptiert wird.

Eine Möglichkeit, die Transaktionskosten zu senken, besteht darin, die Besitzrechte

⁵Man sieht, daß demnach bei Steuern die Besitzrechte bei der Regierung liegen. Diese verkauft dieses Recht dann zum Steuersatz an die Verschmutzer.

so zu definieren, daß ein Markt für handelbare Besitzrechte entsteht oder eingerichtet werden kann. Hierzu kann die Regierung Besitzrechte an Schadstoffen ausgeben, die es erlauben, eine bestimmte Menge dieses Schadstoffes zu emittieren.⁶ Solche Emissionsrechte nennt man auch *Emissionszertifikate*. Nur wer im Besitz eines solchen Zertifikates ist, darf den Schadstoff emittieren. Zertifikate dürfen von anderen gekauft oder an andere verkauft werden.⁷ Man beachte, daß ein Zertifikatemarkt gegenüber einer Steuer den Vorteil hat, daß der Regulator die Vermeidungskosten der Firmen nicht zu kennen braucht, wenn er ein bestimmtes Emissionsziel verfolgt. Hierzu sei daran erinnert, daß im Fall einer Steuer der Regulator nur bei Kenntnis der Vermeidungskosten den Steuersatz ausrechnen kann, der die Einhaltung eines aggregierten Emissionszieles garantiert. Daher wird bereits 1968 von DALES [1968] ein Markt für Abwasserrechte als Alternative zur Einführung einer Emissionssteuer ins Spiel gebracht, um eine Reduzierung der Wasserverschmutzung möglichst kostengünstig zu erreichen. Wie MONTGOMERY [1972] zeigt, können Zertifikatmärkte zumindest theoretisch extern vorgegebene aggregierte Emissionsziele zu geringsten Kosten erreichen. Andererseits zeigen ATKINSON UND LEWIS [1974] am Beispiel der Regulierung des Anteils an Partikeln in der Luft, daß eine herkömmliche Anwendung von Umweltauflagen sehr viel höhere Kosten verursacht als eine Umsetzung desselben Umweltzieles zu geringsten Kosten. Spätere empirische Untersuchungen (ATKINSON UND TIETENBERG [1982,1991], MALONEY UND YANDLE [1984], HEIJNES ET AL. [1998], VAN LEEUWEN ET AL. [1998]) bestätigen diese Einschätzung. Dieser Vorteil eines Zertifikatemarktes gegenüber dem Ordnungsrecht, nämlich ein Emissionsziel zu geringeren Kosten erreichen zu können, sowie die Möglichkeit, die Zertifikate kostenlos an die Unternehmen verteilen zu können,⁸ hat der Idee eines Marktes für handelbare Zertifikate zum Durchbruch verholfen. Nach-

⁶Die Besitzrechte dürfen allerdings nicht jedem einzelnen Dorfbewohner zugebilligt werden. Sonst müßte eine verschmutzende Firma von *allen* Bewohnern ein Zertifikat kaufen, um eine Einheit SO₂ ausstoßen zu können. Dies würde sicherlich keiner Reduktion der Transaktionskosten entsprechen.

⁷In obigem Beispiel müßte der Förster um so mehr Zertifikate kaufen, je mehr er seinen Wald vor dem Schadstoff schützen will. Der Kraftwerkbesitzer müßte dagegen um so mehr Zertifikate kaufen, je mehr SO₂ er emittieren will.

⁸Man erinnere sich, daß eine Steuer zwar - zumindest theoretisch - ebenfalls die Möglichkeit bietet, ein aggregiertes Emissionsziel zu geringsten Kosten zu erreichen. Die Firmen müssen aber für jede ausgestoßene Einheit an Schadstoffen eine Steuer entrichten. Die Steuerlast kann dabei - zur Freude des Finanzministers - beträchtlich sein. In einigen Ländern, z.B. in Schweden im Fall von NO_x, werden die Steuereinnahmen daher an die Firmen auf geeignete Weise rückerstattet.

dem sich der amerikanische Kongress 20 Jahre lang nicht über eine Regulierung der SO₂-Emissionen einigen konnte, versprach die Einführung eines Zertifikateregimes eine Umsetzung des Emissionszieles zu politisch durchsetzbaren Kosten für die davon betroffene energieverzeugende Industrie. Im Rahmen des Acid-Rain-Program (ARP) wurde die Gesamtmenge an SO₂-Emissionsrechten begrenzt und eine Reduktion der Gesamtemissionen um 10 Millionen Tonnen SO₂ bis zum Jahr 2010 gegenüber 1980 durchgesetzt. Die Zertifikate werden dabei nach einem Verteilungsschlüssel an die Firmen, die dem Programm zugeordnet sind, kostenlos verteilt. Jedes Zertifikat gewährt das Recht, in einem bestimmten Jahr eine Tonne SO₂ emittieren zu dürfen. Nicht benötigte Zertifikate dürfen für den Gebrauch in Folgejahren aufgehoben werden.⁹ Firmen, die weniger Schadstoffe emittieren als sie an Zertifikaten besitzen, können diese aber auch an andere Firmen verkaufen. Eine Firma darf jedoch nicht mehr emittieren, als sie an Zertifikaten nachweisen kann. Am Ende jeden Jahres werden die Emissionen mit den Zertifikaten verrechnet. Hat eine Firma mehr Emissionen ausgestoßen als sie Zertifikate einlösen kann, dann muß sie eine Strafe von \$2000 pro Tonne an die amerikanische Umweltbehörde (EPA) entrichten. Um zu verhindern, daß keine neuen Firmen in den Markt eintreten können, nur weil sie keine Zertifikate besitzen, hält die EPA jährlich 2,5% der Zertifikate zurück und versteigert diese auf einer Auktion. Insgesamt hat sich das ARP als so erfolgreich herausgestellt,¹⁰ daß 1999 das „NO_x-Budget“, ein Zertifikatprogramm zur Verringerung der Ozonbelastung, starten soll (FARRELL ET AL. [1999]).

1.2 Dynamische Anreizwirkung

Zweifelsohne konnte die Belastung und Zerstörung der Umwelt durch Schadstoffe durch die Einführung umweltpolitischer Instrumente in den letzten Jahren gebremst, zum Teil sogar zurückgeführt werden. So haben die SO₂-Emissionen zwischen 1970 und 1994 in den alten Ländern der Bundesrepublik um 76%, in den neuen Ländern um 47% abgenommen (UMWELTBUNDESAMT [1999]). Tabelle 1.1 zeigt den Rückgang der SO₂-Emissionen in Deutschland seit Beginn der 90er Jahre. Die Reduzierung des SO₂-

⁹Man spricht dabei von einem „Banking“ von Zertifikaten.

¹⁰Das MIT wurde von der EPA mit der wissenschaftlichen Auswertung des Acid Rain Programmes beauftragt. Einen guten Überblick geben RICO [1995] KLAASSEN [1996], ELLERMANN [1998], JOSKOW UND SCHMALENSEE [1998a,b] und BAILEY [1998].

Emissionen von Schwefeldioxid (SO₂) in Deutschland							
in 1000 t	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
Haushalte	448	305	223	210	170	161	158
Industriefeuerungen	1 252	930	669	592	493	398	319
Kraft- und Fernheizwerke	2 768	2 475	2 190	1 967	1 652	1 334	1 144
gesamt	5 262	4 173	3 429	3 082	2 587	2 130	1 851

Tabelle 1.1: *Quelle:* UMWELTBUNDESAMT [1999]

Ausstoßes hat denn auch in den meisten Regionen Deutschlands zu einer Abnahme des Säuregehaltes von Regenwasser auf sein „natürliches“ Niveau geführt. Man betrachte hierzu auch Abbildung 1.1. Für die Reduzierung des Schadstoffausstoßes waren jedoch erhebliche Investitionen in Vermeidungstechnologien nötig. In Deutschland betragen die jährlichen Ausgaben zur Vermeidung von Schadstoffen zur Zeit etwa 40 Milliarden DM. Dies entspricht etwas mehr als einem Prozent des Bruttosozialproduktes (IFW [1997]). Ein anhaltendes wirtschaftliches Wachstum und der damit verbundene, steigende Ressourcenumsatz lassen weiterhin ansteigende Ausgaben für die Vermeidung von Schadstoffen erwarten. Theoretische Überlegungen (vergleiche BOVENBERG UND SMULDERS [1995] und SMULDERS UND GRADUS [1996]) ergeben, daß die Höhe nachhaltigen Wachstums davon abhängt, ob es gelingt, Technologien zu entwickeln, die weniger Schadstoffe freisetzen. Langfristig wird der Erfolg einer Regulierung des Schadstoffausstoßes daher nicht ausschließlich daran gemessen werden, ob ein festgesetztes Schadstoffniveau eingehalten wird. Vielmehr werden sich die umweltpolitischen Instrumente daran messen lassen müssen, ob sie hinreichende Anreize bieten, umweltschonendere Technologien zu entwickeln und einzusetzen.

Die Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente, umweltfreundlichere Technologien zu entwickeln, steht im Mittelpunkt der hier vorgestellten Arbeit. Die traditionelle umweltökonomische Literatur kommt – wie im nächsten Kapitel gezeigt werden wird – zu dem Ergebnis, daß die Anreizwirkung in die Entwicklung umweltfreundlicher Technologien bei auktionierten Zertifikaten größer ist als bei Steuern, und diese wiederum größer ist als bei kostenlos ausgeteilten Zertifikaten. Umweltauflagen schneiden am schlechtesten ab. Die vorliegende Arbeit erstellt einen differenzierten Vergleich umweltpolitischer Instrumente. Hierzu wird die Anreizwirkung von Steuern, Subventionen, Zertifikaten und einheitlichen Emissionsobergrenzen in die Entwicklung und Diffusion umweltfreundlicher Technologien mit Hilfe eines spieltheoretischen Modells

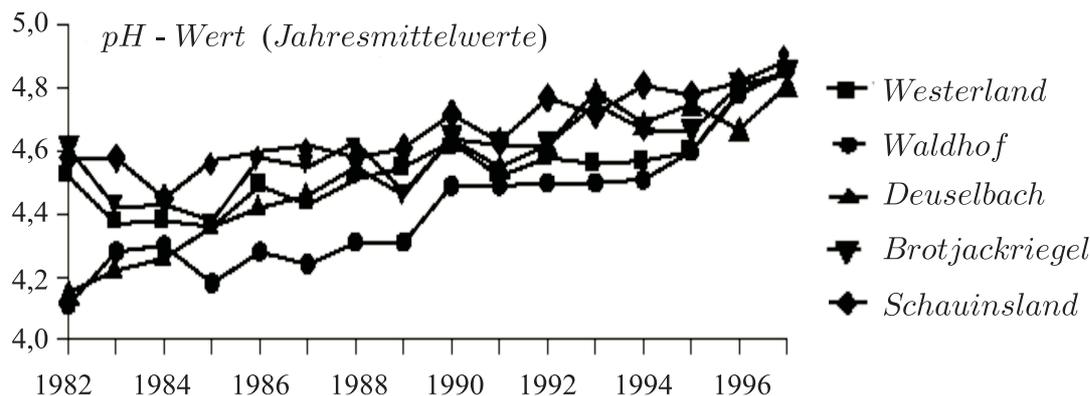


Abbildung 1.1: Der Trend abnehmender SO_2 -Emissionen spiegelt sich in der Entwicklung des pH-Wertes im Niederschlag wider. Der natürliche Säuregehalt (pH-Wert) von Regenwasser liegt in Mitteleuropa bei etwa 4,6 bis 5,6. Quelle: UMWELTBUNDESAMT [1999]

miteinander verglichen. Den Ausgangspunkt bildet dabei eine kompetitive Industrie, die einen Schadstoff emittiert. Dieser Schadstoff läßt sich durch eine konventionelle Technologie vermeiden.

Zunächst wird die *Diffusion* einer neuen Vermeidungstechnologie untersucht. Die neue Technologie ist dadurch charakterisiert, daß die Firmen mittels ihrer Schadstoffe zu geringeren variablen Kosten vermeiden können. Die in dieser Arbeit abgeleiteten Resultate widerlegen obige Einschätzung der traditionellen umweltökonomischen Literatur in mehreren Punkten: i) Steuern und Subventionen einerseits und auktionierte und kostenlos ausgeteilte Zertifikate andererseits bieten dieselben Anreize, eine neue Technologie zu übernehmen; ii.) Bei Steuern übernehmen in der Regel mehr Firmen die neue Technologie als bei Zertifikaten, wenn sich der Regulator a priori auf die Höhe seiner umweltpolitischen Instrumente verpflichtet hat, um ein bestimmtes aggregiertes Emissionsziel zu erreichen. Aber auch einheitliche Emissionsobergrenzen können höhere Anreize als Zertifikate bieten, die neue Technologie zu übernehmen; iii.) Bei Zertifikaten ist im allgemeinen eine partielle Diffusion der neuen Technologie zu erwarten.

Als Einschub wird eine interessante Variation eines Zertifikatemarktes vorgestellt, nämlich *Optionen*¹¹ auf Zertifikate. Dabei zeigt sich, daß es für den Regulator von Vorteil

¹¹Optionen sind eigentlich ein Finanzmarktinstrument und bezeichnen das Recht, zu einem be-

sein kann, nicht Zertifikate, sondern Optionen auf Zertifikate zu versteigern. Oft möchte sich der Regulator für längere Zeit auf die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes verpflichten, um den Firmen Planungs- und Investitionssicherheit zu geben. Bei den herkömmlichen umweltpolitischen Instrumenten führt eine solche Selbstverpflichtung jedoch dazu, daß die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes nach der Diffusion einer neuen Technologie nicht optimal¹² ist. Der in dieser Arbeit entwickelte Optionsmechanismus erlaubt es dem Regulator, auch bei einer ex-ante Selbstverpflichtung eine ex-post optimale Höhe der Emissionen sicherzustellen. Dabei braucht er die neue Technologie nicht einmal kennen. Vielmehr muß er nur über den Schaden informiert sein, der durch die Emissionen entsteht.

Anschließend werden – aufbauend auf die Resultate des zuvor vorgestellten Diffusionsmodelles – die Anreize in die *Entwicklung* einer neuen Technologie analysiert. Hierzu wird das Modell um eine innovierende Firma erweitert. Der Innovator ist nicht Teil der „verschmutzenden“ Industrie, sondern entwickelt eine neue Technologie, um diese anschließend an die Firmen einer verschmutzenden Industrie verkaufen zu können. Der Forschungserfolg des Innovators ist nicht-deterministisch. Je höher sein Entwicklungsaufwand ist, desto wahrscheinlicher ist ein erfolgreiches Forschungsergebnis. Nach erfolgreicher Entwicklung kann die neue Technologie zu konstanten Stückkosten produziert werden. Im Rahmen des Modelles werden verschiedene zeitliche Strukturen der Regulierung betrachtet.

Eine Analyse des Modelles ergibt, daß die Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente zum einen von der zeitlichen Struktur des Regulierungsmechanismus, zum anderen von der Höhe der Produktionskosten abhängt. Die Resultate dieses erweiterten Modells widersprechen dabei wiederum größtenteils der traditionellen Literatur. Es wird gezeigt, daß – entgegen der landläufigen Meinung – die Anreizwirkung von Emissionsobergrenzen im Vergleich mit marktorientierten Instrumenten wie Steuern bzw. Zertifikaten in der Regel keineswegs am geringsten ist. Vielmehr bieten sowohl Steuern als auch Zertifikate unter Umständen einen geringeren Anreiz zur Entwicklung neuer Technologien als Emissionsobergrenzen. Darüber hinaus legen die Resultate dieser Arbeit den Schluß nahe, daß die Höhe der Produktionskosten bei der Beurteilung der Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente berücksichtigt werden muß.

stimmten Zeitpunkt eine Aktie oder ein Wertpapier zu einem festen Preis kaufen oder verkaufen zu können.

¹²Zum Begriff der Optimalität siehe Seite 5.

Kapitel 2

Innovation und Diffusion umweltfreundlicher Technologien

Over the long haul, perhaps the most important single criterion on which to judge environmental policies is the extent to which they spur new technology toward the efficient conservation of the environment.

KNEESE UND SCHULZE [1975:38]

Die Entwicklung und Vermarktung von umweltfreundlichen Technologien und Umweltschutztechnologien spielen weltweit eine immer größere Rolle. Wachsende Ausgaben der Unternehmen sowie der Staaten in die Vermeidung von Schadstoffen steigern die Nachfrage nach besseren Vermeidungstechnologien und umweltfreundlicheren Produkten. Der Weltmarkt für Vermeidungstechnologien wird von der OECD [1997] zur Zeit auf etwa 300 Milliarden Dollar pro Jahr geschätzt. Die Wachstumsrate beträgt zwischen 5% und 6% pro Jahr. Daher verwundert es nicht, daß in den letzten 30 Jahren eine beträchtliche Anzahl an Erfindungen im Bereich der Umwelttechnologien zu registrieren war. Eine Auswertung des Anteils der Patente für Umweltschutztechnologien an der Gesamtzahl erteilter Patente in Deutschland, Japan und den USA ergab Werte zwischen 0,6% und 3% (LANJOUW UND MODY [1995]). Ähnlich hohe Werte wurden aber auch für Schwellenländer wie Indien, Brasilien oder Süd-Korea gefun-

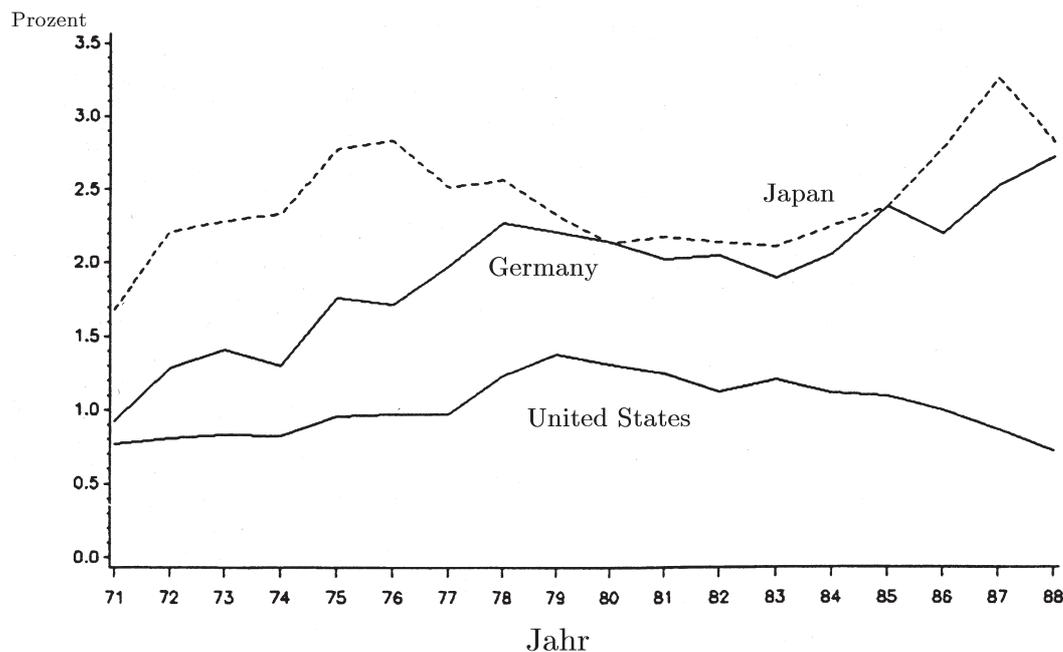


Abbildung 2.1: *Patente für Umwelttechnologien in Prozent der Gesamtzahl an Patenten.* Quelle: LANJOUW UND MODY [1995]

den. Damit ist der Anteil der umweltbezogenen Patente an den insgesamt erteilten Patenten sogar höher als der Anteil der Vermeidungskosten am Bruttosozialprodukt. Abbildung 2.1 illustriert die zeitliche Entwicklung der relativen Patentanmeldungen für die drei größten Industrieländer USA, Japan und Deutschland in den 70er und 80er Jahren. Die höchsten Werte ergeben sich für Japan und die niedrigsten für die USA. Während die Werte für diese beiden Länder sich im Betrachtungszeitraum im Mittel kaum verändern, steigt der Anteil der Umweltpatente in Deutschland kontinuierlich von weniger als einem Prozent Anfang der 70er Jahre auf fast 3% Ende der 80er Jahre. Sicherlich gibt es eine ganze Reihe von Gründen, warum die Werte der Länder im einzelnen stark differieren. Eine nahe liegende Ursache könnte dabei sein, daß sich auch die Art und Weise der umweltpolitischen Regulierung in den verschiedenen Staaten unterscheidet.

Innerhalb der ökonomischen Theorie gibt es eine Vielzahl von Aufsätzen, die die Entwicklung und Diffusion von Technologien beschreiben.¹³ *Forschung und Entwicklung*

¹³Einen Überblick findet man in KAMIEN UND SCHWARTZ [1982], REINGARNUM [1989] oder TIROLE [1994].

(F&E) wird dabei in der Regel in drei Kategorien unterteilt. Die Grundlagenforschung wird – meist vom Staat gefördert – an Universitäten und Großforschungseinrichtungen betrieben. Die Ergebnisse werden im allgemeinen veröffentlicht und sind für jeden Interessenten frei verwertbar. Die angewandte Forschung und die Entwicklung neuer Produktionsprozesse und Produkte finden dagegen in der Regel entweder in Kooperation von Unternehmen und Universitäten oder sogar ausschließlich in den F&E-Abteilungen von Unternehmen statt. Ein Patentschutz ermöglicht es den forschenden Unternehmen, die neue Entwicklung ökonomisch auszubeuten, indem sie die Innovation an andere Firmen oder auch an Konsumenten verkaufen oder ihren eigenen Produktionsprozeß verbessern. Die theoretische Literatur betrachtet die grundlegenden Zusammenhänge, die die Höhe und den zeitlichen Verlauf von Innovationen sowie der Diffusion dieser Innovationen bestimmen. ARROW [1962] stellt hierzu in einem vielbeachteten Artikel die Frage, wie hoch der Gewinn einer Firma aus einer Innovation ist, falls nur sie F&E unternimmt und die Innovation durch ein zeitlich unbefristetes Patent geschützt ist. Handelt es sich bei der Innovation um ein neues Produkt, dann verschafft der Patentschutz dem Unternehmen einen monopolistischen Markt für das Produkt und damit, bei positiver Nachfrage nach der Innovation, einen Monopolgewinn. Handelt es sich andererseits bei der Innovation um einen neuen, besseren Produktionsprozeß, dann hat das Unternehmen in der Regel einen technologischen Vorteil. Das Produkt kann zu geringeren Kosten produziert werden. Dadurch kann das Unternehmen unter Umständen seinen Marktanteil erhöhen oder sogar die Konkurrenz aus dem Markt drängen. Die Anreize, eine neue Technologie oder ein neues Produkt zu entwickeln, ergeben sich also aus strategischen Überlegungen. Die Literatur, die sich mit Fragen der Industrieorganisation befaßt, konzentriert sich daher hauptsächlich auf strategische Modelle mit einer kleinen Anzahl von Firmen. Von Interesse sind dabei unter anderem die erwarteten Monopolrenten, der Zeitpunkt der Innovation sowie sogenannte F&E-Rennen¹⁴, ein Patent zu erhalten.

Nicht jedes erfolgreich entwickelte neue Produkt oder jeder erfolgreich entwickelte neue Produktionsprozeß finden jedoch sofort Abnehmer. Vielmehr entsteht in der Regel erst im Laufe der Zeit ein wachsender Markt für das neue Produkt. Dafür kann es mehrere Gründe geben. Zunächst einmal müssen das neue Produkt und seine Eigenschaften bekannt werden. Es besteht also ein Informationsproblem. Desweiteren sind die Inter-

¹⁴Als ein F&E-Rennen bezeichnet man den Wettbewerb zweier oder mehrerer Firmen, eine neue Technologie oder ein neues Produkt zu entwickeln und als erster patentieren zu lassen.

essenten zunächst oft unsicher in Bezug auf die Eigenschaften und Qualität der neuen Technologie. Es besteht ein Glaubwürdigkeitsproblem. Oft wird auch ein Absinken sowohl des Preises für die neue Technologie als auch der Anpassungskosten an die neue Technologie erwartet. Schließlich kann man von den Erfahrungen anderer profitieren, wenn man das Produkt später übernimmt. Es besteht also eine Externalität zwischen den Käufern. In der Literatur gibt es mehrere alternative Ansätze zur Beschreibung des *Diffusionsprozesses* einer neuen Technologie, die verschiedene Schwerpunkte auf die Ursachen des Diffusionsprozesses legen. Die epidemischen Modelle, die aus der theoretischen Biologie übernommen wurden, beschreiben die Diffusion eines neuen Produktes in Analogie zur Ausbreitung einer ansteckenden Krankheit (siehe GRILICHES [1957], MANSFIELD [1961]). So, wie sich ein Virus in einer Population durch Kontakt der Individuen ausbreitet, wird in diesen Modellen Lernen als Verbreitung von Information durch persönlichen Kontakt oder Beobachten der anderen abgebildet. Die Modelle der „rational choice“ bilden dagegen explizit das Entscheidungskalkül potentieller Käufer ab. Diese Diffusionsmodelle nehmen als Grundlage, daß das Wirtschaftssubjekt eine rationale Kaufentscheidung trifft. Sobald der private Wert der Innovation zum Zeitpunkt des Kaufes die Kosten übersteigt, wird ein potentieller Käufer die neue Technologie oder das neue Produkt übernehmen.

Obwohl schon früh betont wurde, daß die langfristige Anreizwirkung in F&E und die Diffusion neuer Vermeidungstechnologien die wahrscheinlich wichtigsten Faktoren sind, an denen langfristig der Erfolg umweltpolitischer Instrumente gemessen werden wird (siehe z.B. KNEESE UND SCHULZE [1975]), wurde der Zusammenhang zwischen umweltökonomischen Instrumenten und der Entwicklung und Verbreitung neuer Technologien sowohl empirisch als auch theoretisch bisher nur von vergleichsweise wenigen Arbeiten behandelt.¹⁵ Einige Aufsätze (REQUATE [1995], LAFFONT UND TIROLE [1996a], KENNEDY UND LAPLANTE [1998]) vergleichen die Anreize umweltpolitischer Instrumente, *eine neue Technologie zu übernehmen*. Diese Modelle untersuchen, wieviele Firmen eine neue Technologie übernehmen werden und inwieweit sich dadurch die sozialen Kosten der Produktion ändern. REQUATE [1995] zeigt, daß unter Umständen eine teilweise Übernahme einer neuen Technologie sozial optimal sein kann. Bei Steuern ist eine solche teilweise Übernahme jedoch nicht zu realisieren, falls sich der Regulator auf die Höhe des Steuersatzes verpflichtet hat. KENNEDY UND LAPLANTE [1998] zeigen, daß eine Selbstverpflichtung des Regulators auf die Höhe des Steuersatzes aus

¹⁵Ein Überblick über die Literatur findet sich z.B. in KEMP [1996] oder auch in ULPH [1998].

diesem Grund in der Regel auch nicht zeitkonsistent ist. LAFFONT UND TIROLE [1996a] machen schließlich darauf aufmerksam, daß es bei einer Versteigerung von Zertifikaten ebenfalls zu einer Überinvestition in eine neue Technologie kommen kann, falls der Regulator Finanzierungskosten¹⁶ des öffentlichen Haushaltes hat und daher an den Einnahmen aus dem Verkauf der Zertifikate interessiert ist. Anhand einer empirischen Studie zeigen JAFFE UND STAVINS [1995], daß Steuern und Subventionen höhere Anreize zur Isolierung von Häusern bieten als Wärmeschutzauflagen.

Andere Autoren (unter anderen DOWNING UND WHITE [1986], MILLIMAN UND PRINCE [1989], MALUEG [1989], MAGAT [1978], BIGLAISER UND HOROWITZ [1995], LAFFONT UND TIROLE¹⁷ [1996b], MENDELSON [1984], FISCHER ET AL. [1998]) vergleichen die Anreize verschiedener umweltpolitischer Instrumente, *eine neue Vermeidungstechnologie zu entwickeln*. In diesen Modellen wird jedoch der Diffusionsprozess nicht abgebildet. Vielmehr wird eine unmittelbare, vollständige Diffusion der neuen Technologie vorausgesetzt. Die Literatur kann dabei in zwei Arten von Modellen unterteilt werden. Ein Teil der Aufsätze (u.a. MAGAT [1978], DOWNING UND WHITE [1986]) vergleicht umweltpolitische Instrumente auf *Firmenebene*. Ein anderer Teil (u.a. JUNG ET AL. [1996], MONTERO [1998]) untersucht hingegen die Anreize auf *Industrieebene*. MAGAT [1978] und DOWNING UND WHITE [1986] betrachten die Technologie als privates Gut. MAGAT [1978] analysiert die Innovationsanreize einer repräsentativen, kompetitiven Firma. Diese produziert mit Hilfe eines Inputfaktors. Bei der Produktion des Outputs entsteht ein unerwünschtes Beiprodukt. Den Input kann die Firma zwischen der Produktion, der Vermeidung und der Verbesserung ihrer Vermeidungs- oder Produktionstechnologie aufteilen. DOWNING UND WHITE [1986] betrachten nicht die Entwicklungsentscheidung einer Firma, sondern vergleichen die Ersparnis variabler Kosten bei Übernahme einer neuen Technologie unter verschiedenen umweltpolitischen Instrumenten. Dieses Modell bildet den Ausgangspunkt einer Reihe weiterer Untersuchungen. So greifen MILLIMAN UND PRINCE [1989] auf dieses Modell zurück, neh-

¹⁶Finanzierungskosten oder auch „Schattenkosten“ des öffentlichen Haushaltes nennt man Kosten, die allein dadurch anfallen, daß die Regierung einen öffentlichen Haushalt durch Steuern finanziert.

¹⁷Dieser Aufsatz fällt etwas aus der Reihe. LAFFONT UND TIROLE betrachten eine Versteigerung von Zertifikaten und nehmen an, daß der Regulator Schattenkosten des öffentlichen Haushaltes hat. Dadurch kommt es zwischen dem Innovator und dem Regulator zu einer Art Wettbewerb, da Zertifikate und die neue Technologie als Substitute betrachtet werden können. Während der Innovator seine neue Technologie verkaufen möchte, ist der Regulator an den Einnahmen aus der Versteigerung der Zertifikate interessiert.

men jedoch an, daß die neue Technologie nicht ein privates, sondern ein öffentliches Gut ist. Die neue Technologie kann daher von anderen Firmen der Industrie übernommen werden. Zusätzlich betrachten MILLIMAN UND PRINCE den Fall, daß der Innovator selbst nicht Teil der verschmutzenden Industrie ist. JUNG ET AL. [1996] verallgemeinern im wesentlichen das Modell von MILLIMAN UND PRINCE auf eine heterogene Industrie. Hierzu untersuchen sie die industrieweite Kostenersparnis, falls eine neue Vermeidungstechnologie auf den Markt kommt. BIGLAISER UND HOROWITZ [1995], MONTERO [1998] und FISCHER ET AL. [1998] zeigen, daß der Innovator sich unter Umständen jedoch nicht die gesamte industrieweite Kostenersparnis einer neuen Technologie als Rente aneignen kann. BIGLAISER UND HOROWITZ [1995] führen dies darauf zurück, daß die Zahlungsbereitschaft der Firmen sich im allgemeinen unterscheidet, der Innovator jedoch nicht preisdiskriminieren darf. FISCHER ET AL. [1998] lassen hingegen die Möglichkeit zu, daß die nicht-innovierenden Firmen die neue Technologie imitieren können, d.h. es kommt zu technologischen Spillovers. MONTERO [1998] schließlich zeigt, daß es bei Marktinstrumenten zu einem Trittbrettfahrer-Effekt kommen kann. Dabei verringert sich die Zahlungsbereitschaft nicht-innovierender bzw. investierender Firmen durch die Innovation oder Investition anderer Firmen.

Eine Reihe von Aufsätzen berücksichtigt den Einfluß des Outputmarktes auf die dynamische Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente. Ein Teil der Literatur (unter anderen MALUEG [1990], REQUATE [1993, 1998a]) betrachtet dabei die Anreize, eine neue Technologie zu übernehmen. Ein anderer Teil der Literatur (unter anderen CARRARO UND SINISCALCO [1994], CARRARO UND SOUBEYRAN [1996], KATSOU-LACOS UND XEPAPADEAS [1996], ULPH [1997]) untersucht dagegen die Anreize, eine neue Technologie zu entwickeln. MALUEG [1990] betrachtet Firmen, die auf dem Outputmarkt ein Cournot-Oligopol bilden. Dabei vergleicht er die *Diffusion* einer neuen Technologie einerseits bei einer Regulierung mittels eines Standards, andererseits bei einem Zertifikateregime. Im letzteren Fall nimmt er an, daß sich die Firmen als Preisnehmer auf dem Zertifikatemarkt verhalten. MALUEG kann zeigen, daß in diesem Fall die Wohlfahrt bei einem Zertifikateregime geringer sein kann als bei einer Regulierung mittels eines Standards. Dies liegt daran, daß unter einem Cournot-Oligopol im allgemeinen die Grenzkosten der Firmen bezüglich des Outputgutes untereinander nicht identisch sind und nicht dem Preis für das Outputgut entsprechen. Daher kann ein Zertifikateregime zu einer ineffizienten Umverteilung der Produktion zwischen den einzelnen Firmen führen. REQUATE [1993] untersucht hingegen den Fall eines Betrand-

Duopols. Er zeigt, daß in diesem Fall weder Steuern noch Zertifikate das soziale Optimum implementieren können. Obwohl ein Vergleich der beiden Instrumente nicht eindeutig ausfällt, sondern von der Steigung der Grenzschadenkurve abhängt, führen Steuern für einen großen Bereich von Parameterwerten zu höherer Wohlfahrt als Zertifikate. REQUATE [1998a] schließlich zeigt, daß sich die Ergebnisse von DOWNING UND WHITE [1986] nicht einmal verallgemeinern lassen, falls man auf dem Outputmarkt kompetitive Firmen zugrunde legt. Ob Zertifikate oder Steuern höhere Anreize bieten, eine neue Technologie zu übernehmen, hängt dabei wiederum von der Steigung der Grenzschadenkurve ab. Es läßt sich jedoch zeigen, daß bei Zertifikaten die Wohlfahrt niemals sinkt, während dies bei Steuern durchaus der Fall sein kann.

In einem Literaturüberblick betont ULPH [1997], daß Firmen neue, umweltfreundlichere Technologien meist aus strategischen Gründen *entwickeln*, nämlich um durch eine Senkung der Produktions- bzw. Vermeidungskosten Wettbewerbsvorteile auf dem Outputmarkt zu erhalten. In den Arbeiten von CARRARO UND SINISCALCO [1994], CARRARO UND SOUBEYRAN [1996], KATSOULACOS UND XEPAPADEAS [1996] und ULPH [1997] wird gezeigt, daß umweltpolitische Instrumente zwei entgegengesetzt wirkende Effekte auf die Entwicklung neuer Technologien haben. Zum einen wird durch sie die Effektivität einer Innovation auf die Reduktion der Kosten, zum anderen der Wert eine Kostenreduktion für die Firma bestimmt. Welcher der beiden Effekte dabei dominiert, wird von der Art des F&E-Wettbewerbs bzw. der Marktform des Outputmarktes bestimmt.

In der hier vorgestellten Arbeit wird – im Gegensatz zu den Arbeiten von CARRARO UND SINISCALCO [1994], CARRARO UND SOUBEYRAN [1996], KATSOULACOS UND XEPAPADEAS [1996] – unterstellt, daß nicht die verschmutzenden Firmen selbst eine neue Technologie erfinden, sondern diese von einem Innovator kaufen können. Insbesondere wird eine kompetitive, verschmutzende Industrie angenommen. Der Einfluß des Outputmarktes für das verschmutzende Gut auf die Innovationsanreize wird nicht berücksichtigt. Das in Kapitel 3 vorgestellte Modell baut auf den Ansätzen in der Tradition von DOWNING UND WHITE [1986] und MILLIMAN UND PRINCE [1989] auf. In den folgenden Abschnitten wird daher zunächst auf einige dieser Modelle näher eingegangen. Eine kritische Betrachtung der Ergebnisse dieser Arbeiten in Abschnitt 2.5 bildet die Grundlage für das in den nächsten Kapiteln vorgestellte Modell.

2.1 Das Modell von Magat

Im folgenden soll zunächst das Modell von MAGAT [1978] vorgestellt werden. In diesem dynamischen Modell produziert eine Firma, die Preisnehmer auf dem Outputmarkt ist, mittels eines einzigen Inputfaktors ein Outputgut. Der Inputfaktor wird dabei als Arbeitskraft interpretiert. Als Nebenprodukt entsteht bei der Produktion zusätzlich zu dem Outputgut ein Schadstoff. Der Schadstoff läßt sich teilweise vermeiden. Dies erfordert jedoch einen Mehreinsatz an Arbeit. Zusätzlich zur Produktion und Vermeidung investiert die Firma einen Teil ihres Arbeitseinsatzes in die Verbesserung ihres Produktions- als auch ihres Vermeidungsprozesses. MAGAT betrachtet die zeitlichen Trajektorien der Produktion, der Emissionen und der Höhe und Richtung von F&E bei einer konstanten Steuer und – alternativ – einer konstanten Emissionsobergrenze. Formal übernimmt MAGAT dabei das Modell von KAMIEN UND SCHWARTZ [1969] über faktorvergrößernden technologischen Fortschritt, wobei er Input- und Outputgrößen vertauscht. Dadurch erhält er einen Inputfaktor und zwei Kuppelprodukte. Technologischer Fortschritt läßt sich somit im Rahmen des Modells als eine Veränderung eines produktionsvermehrenden Parameters A sowie eines schadstoffreduzierenden Parameters B entlang einer Innovationsmöglichkeitsgrenze beschreiben. Die Innovationsmöglichkeitsgrenze bildet dabei zu jedem F&E-Niveau die Wahlmöglichkeit zwischen Produktionsvergrößerung und Schadstoffreduktion ab (siehe auch Abb. 2.2).

Anhand dieses Modellrahmens kann MAGAT die Innovationsentscheidung einer repräsentativen Firma gut abbilden. Er zeigt, daß die F&E-Ausgaben sowohl bei Steuern als auch bei einer Emissionsobergrenze mit der Zeit ansteigen. Die Aufteilung der F&E-Ausgaben auf produktionsvergrößernden und schadstoffreduzierenden technologischen Fortschritt hängt jedoch von der Transformationselastizität des Produktionsfaktors bezüglich Produktion und Vermeidung ab. Ist eine Substitution der Arbeitskraft zwischen Produktion und Vermeidung schwierig, dann führt eine Emissionsobergrenze zu einer Zunahme beider F&E-Prozesse. Bei Steuern verbessert die Firma hingegen ihren Produktionsprozeß in höherem Maße als den Vermeidungsprozeß. Ist eine Substitution der Arbeitskraft dagegen einfach, dann führt eine Steuer zu einer zunehmenden Verbesserung der Vermeidungstechnologie relativ zur Produktionstechnologie. Bei einer Emissionsobergrenze sind die Ergebnisse in diesem Fall nicht eindeutig, sondern hängen von den gewählten Ausgangsparametern ab. Weiterhin zeigt MAGAT, daß Emissions-

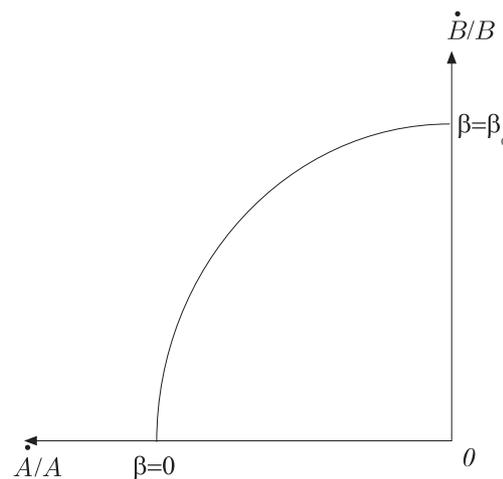


Abbildung 2.2: Die Innovationsmöglichkeitsgrenze nach MAGAT [1976]. Verbesserungen der Produktionstechnologie werden durch eine negative Rate \dot{A}/A , Verbesserungen der Vermeidungstechnologie durch eine positive Rate \dot{B}/B ausgedrückt. Der Parameter β gibt die Richtung des technischen Fortschritts an.

obergrenzen und Steuern dieselben Anreize in F&E bieten, falls sie zum jeweils gleichen Schadstoffausstoß über die Zeit führen. Um Steuern und Emissionsobergrenzen in dieser Art und Weise direkt vergleichen zu können, muß der Steuersatz im Verlauf der Zeit jedoch ständig an den technologischen Fortschritt angepaßt werden. DOWNING UND WHITE [1986] kritisieren diese Annahme. Sie argumentieren, daß ein ständiges Anpassen des Steuersatzes an das Innovationsverhalten einer Firma schwer zu rechtfertigen sei, nur um die Instrumente vergleichen zu können.

2.2 Das Modell von Downing und White

In einer Reihe von Modellen, die teilweise aufeinander aufbauen, wird ein anderer Ansatz gewählt, um umweltpolitische Instrumente bezüglich ihrer Anreizwirkung in Diffusion und Innovation neuer Technologien zu vergleichen. In den in diesem und den darauf folgenden Abschnitten vorgestellten Modellen werden weder der Produktionsprozeß selbst noch der Outputmarkt berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, daß die Firmen der betrachteten Industrie zunächst eine konventionelle Vermeidungstechnologie einsetzen, um den bei der Produktion des Outputgutes entstehenden Schadstoff teilweise zu vermeiden. Die Vermeidungstechnologie wird dabei durch ihre Kosten-

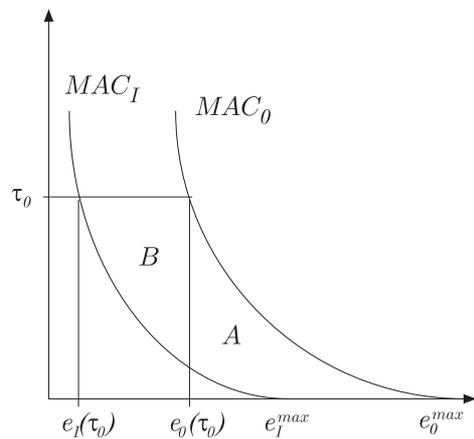


Abbildung 2.3: Steuern

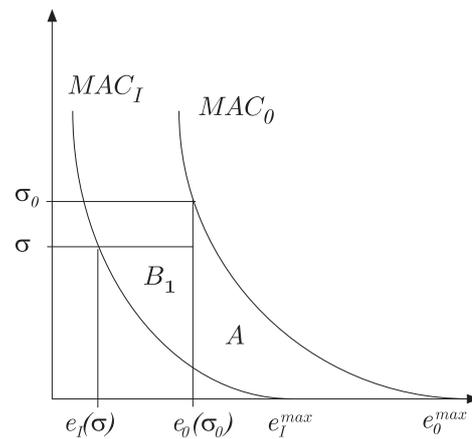


Abbildung 2.4: Zertifikate

funktion vollständig beschrieben. Weiterhin nimmt dieser Teil der Literatur an, daß die Anreize einer Firma, eine neue Technologie zu entwickeln oder zu übernehmen, proportional zu den Einsparungen an variablen Kosten bei Übernahme einer neuen Technologie sind. Im Gegensatz zu dem Modell von MAGAT [1978] wird die Entwicklung der neuen Technologie also nicht explizit abgebildet.

Die Arbeit von DOWNING UND WHITE [1986] betrachtet die Anreize einer einzelnen Firma, eine neue Technologie zu entwickeln. Insofern handelt es sich um eine Betrachtung auf *Firmenebene*. Dabei werden die umweltpolitischen Instrumente Steuern, Subventionen, kostenlos ausgegebene Zertifikate sowie Emissionsobergrenzen untersucht. Zum einen betrachten DOWNING UND WHITE den Fall, daß sich der Regulator auf die ursprüngliche, d.h. vor der Innovation sozial optimale Höhe des umweltpolitischen Instrumentes verpflichtet. Zum anderen interessieren sie sich für den Fall, daß sich der Regulator verpflichtet, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes optimal an die neue Technologie anzupassen.

Das Modell von DOWNING UND WHITE ist in Abbildung 2.3 und 2.4 dargestellt. MAC_0 bezeichnet die Grenzvermeidungskostenkurve einer repräsentativen Firma, die eine konventionelle Technologie 0 einsetzt. MAC_I stellt andererseits die Grenzvermeidungskostenkurve nach Übernahme der neuen Technologie I dar. Man beachte, daß die Grenzvermeidungsfunktionen fallend in den Emissionen sind. Der Ausstoß an Emissionen im unregulierten Fall ist mit e_i^{max} ($i = 0, I$) bezeichnet. Insbesondere gilt $e_I^{max} < e_0^{max}$. Wie aus der Literatur bekannt ist, erfordert eine optimale Allokation, daß die *Grenzvermeidungskosten gleich dem aggregierten Grenzscha-*den sind. Der bezüglich der herkömmlichen Technologie optimale Steuersatz ist mit τ_0 und der korrespondie-

rende optimale Zertifikatepreis mit σ_0 bezeichnet. Es gilt $\tau_0 = \sigma_0$. Der Zertifikatepreis wird jedoch durch das Gleichgewicht auf dem Zertifikatemarkt bestimmt. Als Folge einer Innovation fällt die Nachfrage nach Zertifikaten und daher auch der Marktpreis für Zertifikate. Der „neue“ Marktpreis ist mit σ bezeichnet. Es gilt also $\sigma < \sigma_0$. Im folgenden soll das Setzen eines Steuersatzes mit dem kostenlosen Austeilen von Zertifikaten verglichen werden.

Hierzu sei eine Situation betrachtet, in der der Regulator keine neue Technologie erwartet und die Industrie daher bezüglich der herkömmlichen Technologie optimal reguliert hat. Zu diesem Zweck soll vorübergehend angenommen werden, daß die Einsparung an Emissionen durch die Innovation im Verhältnis zu den gesamten Emissionen der Industrie so klein ist, daß die Änderung des sozial optimalen Preises für die Emissionen vernachlässigt werden kann. Als erstes betrachte man den Fall, daß der Regulator einen Steuersatz τ_0 festgelegt hat. Nach einer Innovation wird die innovierende Firma ihre Emissionen von $e_0(\tau_0)$ auf $e_I(\tau_0)$ vermindern (vergleiche Abbildung 2.3). Man beachte, daß der Steuersatz τ_0 in diesem Fall gerade dem sozial optimalen Preis der Emissionsreduktion entspricht. Der Anreiz, Emissionen einzusparen, ist daher sozial optimal. Ein analoges Resultat erhält man für Zertifikate. Hierzu beachte man, daß die durch die Innovation erreichte Verminderung der Emissionen laut Annahme so gering ist, daß dies keinen Einfluß auf den Marktpreis für Zertifikate hat. Es gilt also $\sigma \approx \sigma_0$. Daher entspricht in diesem Fall auch bei Zertifikaten der Marktpreis σ dem optimalen Preis der Emissionsreduktion. Genau genommen verringert die Innovation jedoch die Grenzvermeidungskosten der innovierenden Firma. Damit verringern sich aber auch die aggregierten Grenzvermeidungskosten der gesamten, verschmutzenden Industrie. Nach Übernahme der neuen Technologie ist der ursprüngliche Steuersatz daher in der Regel höher als der sozial optimale Preis der Emissionsreduktion. Daraus folgt unmittelbar, daß Steuern zu hohe Innovationsanreize bieten, falls man obige Annahme der „kleinen Firma“ nicht treffen kann. Schließlich betrachte man nochmals den Fall kostenlos ausgeteilter Zertifikate. Die Argumentation ist in Abbildung 2.4 dargestellt. In der Regel gilt also $\sigma < \sigma_0$. Ein erfolgreicher Innovator kann seine Emissionen von $e_0(\sigma_0)$ auf $e_I(\sigma)$ verringern und $e_I(\sigma) - e_0(\sigma_0)$ viele Zertifikate zum Preis σ verkaufen. Seine Kostenersparnis entspricht daher der Fläche $A + B_1$. Ob der Marktpreis für Zertifikate größer oder kleiner ist als der sozial optimale Preis der Emissionsreduktion, können DOWNING UND WHITE jedoch nicht beantworten, da sie den Zertifikatemarkt in ihrem Modell nicht endogenisiert haben.

	Steuern	Subventionen	kostenlose Zertifikate	Emissions- obergrenzen
Firmen klein	optimal	optimal	optimal	zu niedrig
Firmen groß,				
– keine Anpassung	zu hoch	zu hoch	zu hoch oder zu niedrig	zu niedrig
– optimale Anpassung	zu hoch	zu niedrig	zu niedrig	zu niedrig

Tabelle 2.1: *Verglichen wird die Höhe der Kostenersparnis für eine Firma durch eine Innovation bei verschiedenen umweltpolitischen Instrumenten.*

(Quelle: DOWNING UND WHITE [1986])

DOWNING UND WHITE betrachten darüber hinaus noch ein alternatives Szenario. Hier verpflichtet sich der Regulator, die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes optimal an die Innovation anzupassen. Der Regulator hat offensichtlich nur dann einen Anlaß, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes anzupassen, wenn sich die aggregierten Grenzvermeidungskosten der Industrie durch eine Innovation meßbar verändern. Es sei daran erinnert, daß nach einer Innovation der optimale Preis für Emissionen niedriger ist als das auf die herkömmliche Technologie bezogene Niveau. Zunächst soll wieder der Fall einer Steuer betrachtet werden. Als Folge der Innovation wird der Regulator den Steuersatz senken. Dies verringert sowohl die variablen Vermeidungskosten der Firma als auch ihre Steuerbelastung gegenüber dem Fall, daß der Regulator den Steuersatz nicht anpaßt. Gerade umgekehrt verhält es sich bei Subventionen auf vermiedene Emissionen und kostenlos ausgegebenen Zertifikaten. In diesem Fall wird der Regulator den Subventionssatz zwar ebenfalls verringern (bei Zertifikaten wird entsprechend der Preis für Zertifikate sinken), dadurch vermindern sich aber die Einnahmen der innovierenden Firma, die sie aus den Subventionszahlungen oder dem Verkauf an Zertifikaten erhält. Abschließend betrachte man – im Rahmen des zuletzt beschriebenen Szenarios – noch den Fall, daß der Regulator eine Emissionsobergrenze setzt. Man beachte, daß der Regulator die Emissionsobergrenze als Folge einer Innovation verschärfen wird. Daher „bestraft“ sich eine innovierende Firma gleichsam selbst mit einer strengeren Emissionsobergrenze. Folglich ist der Anreiz zur Innovation bei Emissionsobergrenzen suboptimal.

Die Ergebnisse von DOWNING UND WHITE sind in Tabelle 2.1 zusammengestellt. MAILUEG [1989] zeigt jedoch, daß der Vergleich von Zertifikaten und Emissionsobergrenzen, den DOWNING UND WHITE vornehmen, nur dann gilt, wenn der Innovator ein

Verkäufer von Zertifikaten ist. MALUEG betrachtet hierzu den Fall, daß die Firma entweder eine Emissionsobergrenze s einhalten muß oder $s = \hat{e} < e_I(\sigma)$ viele handelbare Zertifikate kostenlos zugeteilt bekommt. Man beachte, daß die innovierende Firma also sowohl unter der herkömmlichen als auch unter der neuen Technologie Zertifikate *hinzukaufen* muß. MALUEG zeigt, daß in diesem Fall die Anreize, eine neue Technologie zu entwickeln, bei einer Emissionsobergrenze größer als bei kostenlos ausgeteilten Zertifikaten sind. Dies steht im Widerspruch zu DOWNING UND WHITE.

2.3 Das Modell von Milliman und Prince

Das Modell von MILLIMAN UND PRINCE [1989] erweitert die Analyse von DOWNING UND WHITE [1986] um mehrere Punkte. Die Innovation ist in ihrem Modell nun nicht länger ein privates, sondern ein öffentliches Gut. Im Gegensatz zu DOWNING UND WHITE können daher nicht-innovierende Firmen die neue Technologie übernehmen. Die Innovation kann aber durch ein Patent geschützt werden. Weiterhin betrachten MILLIMAN UND PRINCE die Möglichkeit, daß die innovierende Firma selbst nicht der verschmutzenden Industrie angehört, sondern ausschließlich Zulieferer der neuen Technologie ist. Schließlich werden Steuern, Subventionen, Emissionsobergrenzen und kostenlos ausgeteilte Zertifikate um Zertifikate ergänzt, die vom Regulator nicht kostenlos ausgegeben, sondern an die Firmen versteigert werden. Wie bei DOWNING UND WHITE werden zwei zueinander alternative Regulierungsmechanismen untersucht. In einem ersten Szenario verpflichtet sich der Regulator auf die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes, die *vor* der Innovation der neuen Technologie optimal war. In einem zweiten Szenario kündigt er an, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes optimal anzupassen, *nachdem* die Diffusion der neuen Technologie abgeschlossen ist.

Das Modell von MILLIMAN UND PRINCE wird in den Abbildungen 2.5 und 2.6 dargestellt. Wiederum beschreibt MAC_0 die Grenzvermeidungskostenkurve bezüglich der herkömmlichen Technologie und MAC_I die Grenzvermeidungskostenkurve bezüglich der neuen Technologie. Wie schon bei DOWNING UND WHITE wird der ursprünglich optimale Steuersatz mit τ_0 bezeichnet. Man beachte, daß die korrespondierende Emissionsobergrenze s_0 den Emissionen $e_0(\tau_0)$ entspricht. Im Fall von Zertifikaten gilt schließlich $\sigma_0 = \tau_0$. Im Gegensatz zu DOWNING UND WHITE nehmen MILLIMAN UND PRINCE jedoch an, daß die neue Technologie von allen n (identischen) Firmen der regulierten Industrie gleichzeitig übernommen wird. Sie betrachten also eine exo-

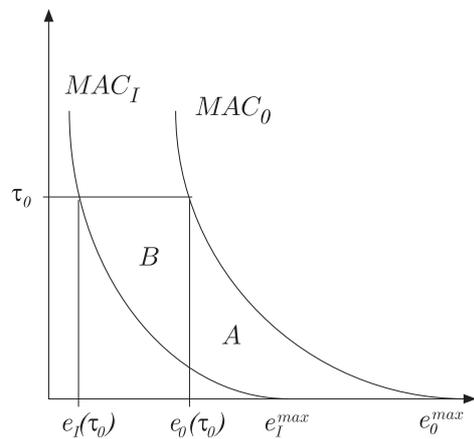


Abbildung 2.5: Steuern

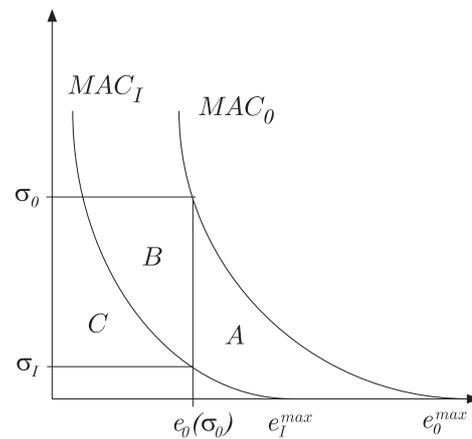


Abbildung 2.6: Zertifikate

gen gegebene *vollständige Diffusion* der neuen Technologie. Da die Faktornachfrage nach Emissionen mit Übernahme der neuen Technologie fällt, muß auch der Marktpreis für Zertifikate fallen. Der Marktpreis für Zertifikate nach erfolgreicher Innovation und vollständiger Diffusion wird mit σ_I bezeichnet (siehe auch Abbildung 2.6). Insbesondere gilt $\sigma_I < \sigma_0$. Nebenbei beachte man, daß kein Handel von Zertifikaten stattfindet, da $e_0(\sigma_0) = e_I(\sigma_I)$ gilt.

Zunächst soll wiederum eine Situation betrachtet werden, in der sich der Regulator vor einer Innovation auf die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes verpflichtet hat. Die Kostenreduktion für den Innovator ist dabei bei auktionierten Zertifikaten¹⁸ (vgl. die Fläche $A+B+C$ in Abbildung 2.6) größer als bei Steuern (vgl. die Fläche $A+B$ in Abbildung 2.5). Die Kostenersparnis bei Emissionsobergrenzen und bei handelbaren Zertifikaten ist am geringsten (vgl. jeweils die Fläche A in Abbildung 2.5 bzw. 2.6). Es sei zunächst unterstellt, daß der Innovator keine Patentrechte besitzt. In diesem Fall können die nicht-innovierenden Firmen die neue Technologie kostenlos übernehmen. Erhält der Innovator andererseits ein Patent auf seine neue Technologie, dann spart er nicht nur (eigene) Vermeidungskosten ein, sondern er kann die neue Technologie zusätzlich an die nicht-innovierenden Firmen verkaufen. MILLIMAN UND PRINCE nehmen dabei an, daß der Innovator einen festen Anteil der Kostenersparnis der anderen Firmen erhält. Dieser Anteil sei mit z bezeichnet. Offensichtlich ändert sich qualitativ nichts an den relativen Anreizen der umweltpolitischen Instrumente im Vergleich zu obigem Fall, bei dem der Innovator keinen Patentschutz erhält. Zusätzlich zu seiner

¹⁸Die Zertifikate, die in einer Periode eingelöst werden können, werden zu Beginn derselben Periode versteigert.

eigenen Kostenersparnis erhält der Innovator noch einen Erlös von $(n - 1) \cdot z$ -mal der Kostenersparnis der Firmen, die die neue Technologie übernehmen. Ähnlich verhält es sich für den Fall, daß der Innovator selbst nicht der verschmutzenden Industrie angehört. Ein solcher „Zulieferer“ einer neuen Technologie erhält laut MILLIMAN UND PRINCE einen Anteil $n \cdot z$ der Kostenersparnis jeder Firma. Der Erlös ist damit proportional zu dem Erlös eines Innovators, der selbst Teil der verschmutzenden Industrie ist.

Eine andere Einschätzung der Innovationsanreize erhalten MILLIMAN UND PRINCE für den Fall, daß sich der Regulator verpflichtet, die Höhe des Instrumentes nach erfolgter Diffusion anzupassen. Nun führen nicht versteigerte Zertifikate, sondern Emissionsobergrenzen zu dem größten Erlös für den Innovator. Man betrachte hierzu zunächst den Fall einer Emissionsobergrenze. Bei einer monoton steigenden Schadenfunktion ist die bezüglich der neuen Technologie optimale Emissionsobergrenze offensichtlich strenger als die bezüglich der herkömmlichen Technologie optimale Emissionsobergrenze. Man beachte nun, daß eine strengere Emissionsobergrenze eine höhere Kostenersparnis bei Übernahme der neuen Technologie impliziert. Genau entgegengesetzt verhält es sich bei einem Steuersatz. Es wurde bereits gezeigt, daß nach Übernahme der neuen Technologie der optimale Steuersatz niedriger ist als der bezüglich der alten Technologie optimale Steuersatz. Damit sinken sowohl die Steuerbelastung der Firma als auch ihre Vermeidungskosten. Im Vergleich ist die Kostenersparnis bei Übernahme der neuen Technologie bei Steuern somit geringer als bei Emissionsobergrenzen. Die Ergebnisse von MILLIMAN UND PRINCE sind in Tabelle 2.2 zusammengestellt.

Dieselbe Kritik, die MALUEG [1989] an den Ergebnissen von DOWNING UND WHITE übt, läßt sich zunächst unmittelbar auch auf das Modell von MILLIMAN UND PRINCE [1989] übertragen. Man erinnere sich, daß laut MALUEG [1989] die Kostenersparnis auf Firmenebene im Falle von kostenlos verteilten Zertifikaten davon abhängt, ob die Firma Käufer oder Verkäufer von Zertifikaten ist. Da identische Firmen und eine vollständige Übernahme der neuen Technologie betrachtet werden, kommt es offensichtlich nicht zu einem Handel von Zertifikaten. Im Fall einer heterogenen Industrie kann es jedoch vorkommen, daß die innovierende Firma ein Käufer von Zertifikaten ist, unabhängig davon, ob sie die alte oder die neue Technologie einsetzt.

In der Arbeit von JUNG ET AL. [1996] wird eine heterogene Industrie betrachtet. Anstelle der Kostenersparnis auf Firmenebene – wie bei MILLIMAN UND PRINCE – berechnen JUNG ET AL. die *industrieweite Kostenersparnis*, die sich durch vollständige

	Steuern	Subv.	kost. ausg. Zertifikate	auktionierte Zertifikate	Emissions- obergrenzen
Selbstverpflichtung auf Höhe des Instrumentes:					
ohne Patentschutz	2	2	5	1	2
mit Patentschutz	2	2	5	1	4
Außenstehender Innovator	2	2	4	1	4
Anpassung der Politik:					
Außenstehender Innovator	4	4	1	3	1

Tabelle 2.2: Verglichen wird die relative Höhe der Kostenersparnis für eine Firma durch eine Innovation bei verschiedenen umweltpolitischen Instrumenten (1 hoch \rightarrow 5 niedrig). (*Quelle*: MILLIMAN UND PRINCE [1989])

Diffusion einer neuen Technologie ergibt. Dabei betrachten sie ausschließlich den Fall, daß sich der Regulator auf die optimale Höhe seines Instrumentes verpflichtet hat, bevor die neue Technologie auf den Markt kommt. Das Modell von JUNG ET AL. zeigt, daß das Resultat von MILLIMAN UND PRINCE qualitativ auf eine heterogene Industrie übertragen werden kann. Auktionierte Zertifikate bieten die höchste industrieweite Kostenersparnis, gefolgt von Steuern und Subventionen. Kostenlos ausgeteilte Zertifikate ergeben die geringste industrieweite Kostenersparnis aller Marktinstrumente. FEES [1998] schließlich ergänzt das Modell von JUNG ET AL. [1996] und betrachtet den Fall, daß der Regulator ankündigt, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes optimal an die erfolgte Diffusion anzupassen. In diesem Fall sind Steuern und auktionierte Zertifikate äquivalent und ergeben eine höhere industrieweite Kostenersparnis als Subventionen und kostenlos ausgeteilte Zertifikate, die ihrerseits äquivalent sind.

Es wurde bereits erwähnt, daß der Marktpreis für Zertifikate von seiner ursprünglichen Höhe σ_0 auf σ_I sinkt, sobald alle Firmen die neue Technologie übernommen haben. MONTERO [1998] bemerkt, daß in diesem Fall aber die Zahlungsbereitschaft einer Firma nicht der Kostenersparnis entspricht, die sich für die individuelle Firma bei vollständiger Diffusion der neuen Technologie ergibt, wie dies sowohl bei MILLIMAN UND PRINCE als auch bei JUNG ET AL. implizit unterstellt wird. MONTERO [1998] betrachtet daher ein Nash-Gleichgewicht, bei dem alle Firmen die neue Technologie übernehmen wollen und leitet daraus die Kostenersparnis einer Firma ab, die sich bei

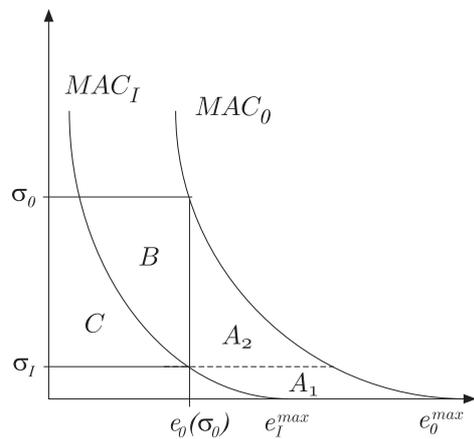


Abbildung 2.7:

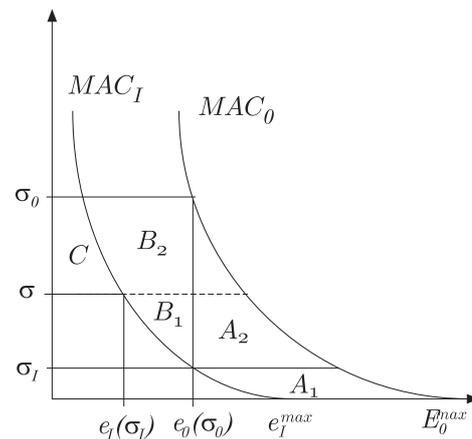


Abbildung 2.8:

der Übernahme einer neuen Technologie ergibt.

2.4 Das Modell von Montero

In der Tradition von MILLIMAN UND PRINCE [1989] und JUNG ET AL. [1996] vergleicht auch MONTERO [1998] die Innovationsanreize einer aus n Firmen bestehenden Industrie unter verschiedenen umweltpolitischen Instrumenten. MONTERO [1998] setzt ebenfalls eine vollständige Diffusion der Innovation voraus. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Aufsätzen betrachtet MONTERO jedoch nicht die aggregierte Kostenersparnis, sondern die *aggregierte Zahlungsbereitschaft* für die neue Technologie. Letztere leitet MONTERO aus einem Nash-Gleichgewicht ab, in dem alle Firmen bereit sind, die neue Technologie zu übernehmen. Diese Vorgehensweise ist entscheidend, da der Marktpreis für Zertifikate und damit indirekt die Zahlungsbereitschaft der Firmen für die neue Technologie davon abhängen, wieviele andere Firmen die neue Technologie übernehmen.

MONTERO kann zeigen, daß kleine Firmen¹⁹ bei kostenlos ausgeteilten Zertifikaten die gleiche Zahlungsbereitschaft für die neue Technologie haben wie bei auktionierten Zertifikaten. Die Argumentation ist in Abbildung 2.7 illustriert. Man erinnere sich, daß – vorausgesetzt *alle* Firmen haben die neue Technologie übernommen – der Zertifi-

¹⁹ Mit einer kleinen Firma ist hier wiederum gemeint, daß die Firmenanzahl so groß ist, daß die Übernahme der neuen Technologie durch eine einzelne Firma nur einen vernachlässigbaren Effekt auf den Zertifikatepreis hat.

katepreis auf σ_I sinkt. Für jede Firma verringern sich die Vermeidungskosten damit entsprechend der Fläche $A_1 + A_2 + B + C$. MONTERO zeigt nun, daß die Kostenersparnis nicht gleich der Zahlungsbereitschaft einer Firma ist, die neue Technologie zu übernehmen. Hierzu betrachte man den Fall, daß alle bis auf eine Firma, d.h. $n - 1$ viele Firmen die neue Technologie übernommen haben. Kann der Effekt der Investition einer einzelnen Firma auf die Höhe des Zertifikatepreises vernachlässigt werden, dann entspricht der Marktpreis für Zertifikate immer noch ungefähr σ_I . Wie hoch ist nun die Kostenersparnis der letzten Firma, wenn sie die neue Technologie übernimmt? Diese entspricht offensichtlich genau der Fläche A_1 . Dabei spielt es keine Rolle, ob es sich um kostenlos ausgeteilte oder auktionierte Zertifikate handelt. Insbesondere ist die Kostenersparnis geringer als bei Steuern. Dieses Resultat steht im Widerspruch zu den Resultaten von MILLIMAN UND PRINCE [1989] und JUNG ET. AL. [1996].

2.5 Kritische Betrachtung der Literatur

Zusammenfassend kann man feststellen, daß die umweltökonomische Literatur marktorientierten umweltpolitischen Instrumenten wie Steuern, Subventionen und Zertifikate in der Regel einen Vorrang gegenüber dem Ordnungsrecht einräumt. Zum einen ist es wohlbekannt, daß marktorientierte Instrumente eine effiziente Allokation der Emissionen ermöglichen. Dies ist mittels einheitlicher Emissionsobergrenzen bei einer heterogenen Industrie grundsätzlich nicht zu erreichen. DOWNING UND WHITE [1986] und MILLIMAN UND PRINCE [1989] behaupten, daß marktorientierte Instrumente im allgemeinen auch die höheren dynamischen Anreize bieten. In der Interpretation ihrer Ergebnisse schließen sowohl MILLIMAN UND PRINCE [1989] als auch JUNG ET AL. [1996] von einem Vergleich der industrieweiten Kostenersparnisse auf die relativen Innovationsanreize verschiedener umweltpolitischer Instrumente. MONTERO [1998] kritisiert diese Vorgehensweise und unterscheidet zwischen der industrieweiten Kostenersparnis und der aggregierten Zahlungsbereitschaft für die neue Technologie. Er kann zeigen, daß bei einer Emissionsobergrenze die Zahlungsbereitschaft für eine neue Technologie unter Umständen höher ist als bei Zertifikaten. Auch BIGLAISER UND HOROWITZ [1995], BEATH ET AL. [1995] sowie FISCHER ET AL. [1998] bemerken, daß der private Nutzen einer Innovation nicht der aggregierten Zahlungsbereitschaft entsprechen muß.

Der überwiegende Teil der Literatur, der sich mit der dynamischen Anreizwirkung um-

weltpolitischer Instrumente beschäftigt, betrachtet die Innovation einer umweltfreundlicheren Technologie als ein öffentliches Gut, dessen kostenlose Nachahmung (teilweise) durch ein Patent geschützt werden kann. Entscheidend für die Innovationsanreize eines Unternehmens ist in diesem Fall der aus dem Verkauf der Innovation erwartete Erlös. Es sei jedoch daran erinnert, daß die Modelle in der Tradition von MILLIMAN UND PRINCE [1989] zum einen eine vollständige Diffusion unterstellen. Zum anderen wird das Preissetzungsverhalten des Innovators als Monopolist nicht betrachtet. MILLIMAN UND PRINCE nehmen vielmehr an, daß der Innovator sich einen festen Anteil der Kostenersparnisse der Firmen aneignen kann. Andererseits ist aber aus der ökonomischen Theorie bekannt, daß der Innovator als Monopolist für die neue Technologie den Preis so setzen wird, daß der Erlös aus dem Verkauf der neuen Technologie maximiert wird. Die Höhe des Preises wird dabei zum einen von den Eigenschaften der Nachfragefunktion nach der neuen Technologie, zum anderen von den Eigenschaften der Produktionsfunktion bestimmt. Es stellt sich daher natürlich unmittelbar die Frage, ob eine vollständige Diffusion – wie in einem großen Teil der betrachteten Literatur angenommen – in der Regel zu rechtfertigen ist. REQUATE [1995] zeigt,²⁰ daß eine teilweise Diffusion aus der Sicht eines sozialen Planers erwünscht sein kann, wenn die Übernahme der neuen Technologie hinreichend hohe fixe Kosten erfordert. Man denke bei letzterem z.B. an die Produktionsstückkosten der neuen Technologie oder auch an die Anpassungskosten, die bei der Installation oder der Einarbeitung des Personals in die neue Technologie entstehen können. Übertreffen die Fixkosten sogar die Einsparung an variablen Vermeidungskosten durch Übernahme der neuen Technologie, dann wird eine kostenminimierende Firma nicht bereit sein, die neue Technologie zu übernehmen.

Im folgenden soll anhand eines einfachen Beispiels dargestellt werden, warum es offensichtlich interessant ist, Fixkosten in die Analyse mit einzuschließen. Das Beispiel ist in Abbildung 2.7 und 2.8 illustriert. Man betrachte hierzu eine Industrie, die mittels Zertifikaten reguliert wird. Wie bei MILLIMAN UND PRINCE [1989] wird angenommen, daß die Firmen klein sind, so daß die Übernahme der neuen Technologie durch eine einzelne Firma (fast) keinen Einfluß auf die Höhe des Zertifikatepreises hat. Zusätzlich betrachte man nun jedoch den Fall, daß die Übernahme der neuen Technologie fixe Kosten $F > 0$ erfordert. Es sei daran erinnert, daß der Zertifikatepreis bezüglich der

²⁰REQUATE [1995] vergleicht die Diffusion einer neuen Technologie bei Steuern und Zertifikaten unter Berücksichtigung des Outputmarktes und bei freiem Marktzutritt.

alten Technologie mit σ_0 bezeichnet wird. Zunächst soll der Fall betrachtet werden, daß nur *eine* Firma Zugang zu der neuen Technologie hat. Dies entspricht dem Modell von DOWNING UND WHITE [1986]. Bei einem Zertifikatspreis von σ_0 wird eine Firma genau dann die neue Technologie übernehmen wollen, wenn die Fixkosten kleiner sind als die Einsparung variabler Kosten, d.h. falls $F < A_1 + A_2 + B$ gilt (vgl. hierzu Abbildung 2.7). Nun betrachte man den Fall, daß *alle* Firmen Zugang zu der neuen Technologie haben. Der Zertifikatspreis wird dann sicherlich niedriger als σ_0 sein, sofern eine größere Anzahl an Firmen die neue Technologie übernimmt. In Abbildung 2.7 bezeichnet σ_I den Zertifikatspreis, wenn alle Firmen die neue Technologie übernommen haben. Es gilt also $\sigma_I < \sigma_0$. Die Kostendifferenz gegenüber dem Fall, daß keine Firma die neue Technologie übernommen hat, entspricht damit der Fläche $A_1 + A_2 + B + C$. MONTERO [1998] hat aber andererseits gezeigt, daß die Zahlungsbereitschaft der Fläche A_1 entspricht. Ferner betrachte man den Fall, daß die Fixkosten größer sind als die Kostenersparnis, die der Fläche A_1 entspricht, d.h. $F > A_1$. Haben alle Firmen die neue Technologie übernommen, würden die Firmen dies bereuen. Wenn nämlich nur $n - 1$ Firmen die neue Technologie übernommen hätten, wäre der Zertifikatspreis laut Annahme immer noch ungefähr bei σ_I . Die eine Firma, die nicht investiert hat, hätte somit geringere totale Kosten als die $n - 1$ Firmen, die in die neue Technologie investiert haben. Eine vollständige Diffusion kann daher kein Gleichgewicht sein. Abschließend soll der Fall betrachtet werden, daß F wesentlich größer als A_1 , aber immer noch kleiner als $A_1 + A_2 + B$ ist. Dieser Fall ist in Abbildung 2.8 dargestellt. Die Fixkosten entsprechen der Fläche $A_1 + A_2 + B_1$. Nun würden sogar mehrere Firmen die neue Technologie nicht übernehmen wollen. Einige Firmen würden die neue Technologie aber auf jeden Fall übernehmen wollen, da $F < A_1 + A_2 + B_1 + B_2$. Folglich muß es in diesem Fall zu einer teilweisen Übernahme der neuen Technologie kommen.

Bisher wurde unterstellt, daß die Fixkosten bei Übernahme der neuen Technologie ausschließlich durch reale Kosten der Produktion oder der Installation der neuen Technologie verursacht werden.²¹ Auf einem kompetitiven Markt entspricht der Preis eines Gutes den Grenzkosten der Produktion. Falls der Innovator jedoch ein Monopol auf die neue Technologie besitzt, dann wird er die neue Technologie nicht – wie eine kompetitive Firma – zu den Grenzkosten der Produktion verkaufen. Vielmehr wird er zusätzlich zu den Produktionskosten eine Lizenzgebühr für die neue Technologie verlangen. Wie

²¹Dies ist auch eine implizite Annahme in FEES [1998].

hoch er diese Lizenzgebühr optimalerweise ansetzt, wird dabei von den Eigenschaften der Nachfragefunktion und den Produktionskosten der neuen Technologie bestimmt. Die Höhe der Einnahmen aus dieser Lizenzgebühr, die sogenannte Monopolrente, bilden wiederum den Anreiz eines Innovators, eine neue Technologie zu entwickeln.

In diesem Kapitel wurde gezeigt, daß die umweltökonomische Literatur, die die dynamische Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente untersucht, wichtige Aspekte des Verhaltens eines Innovators bisher nicht berücksichtigt hat: i.) Die Möglichkeit einer teilweisen Diffusion einer neuen Vermeidungstechnologie; ii.) Den Einfluß von fixen Produktions- oder Installationskosten der neuen Technologie; iii.) Das Preissetzungsverhalten eines monopolistischen Innovators. Lediglich die Arbeiten von MONTERO [1998] und FEES [1998] nehmen zu diesen Fragen Stellung. Wie bereits in Abschnitt 2.4 erläutert, bemerkt MONTERO, daß es bei Zertifikaten zu Trittbrettfahereffekten bezüglich der Kostenersparnis bei der Diffusion einer neuen Technologie kommen kann. FEES²² [1998] zeigt, daß sich das auf Seite 27 bereits erwähnte „Optimalergebnis“ auch auf beliebig hohe Fixkosten übertragen läßt: Verpflichtet sich der Regulator, den Steuersatz bzw. die Menge an Zertifikaten optimal an die Diffusion einer neuen Vermeidungstechnologie anzupassen, dann ist die resultierende Allokation sozial optimal. FEES betrachtet jedoch nicht den Fall einheitlicher Emissionsobergrenzen.

Die hier vorgestellte Arbeit geht bei der Beantwortung obiger Fragenkomplexe weit über die Beiträge von MONTERO [1998] und FEES [1998] hinaus. Hierzu wird im nächsten Kapitel ein einfaches Modell vorgestellt. Es werden nicht nur marktorientierte Instrumente wie Steuern, Subventionen und Zertifikate, sondern auch einheitlichen Emissionsobergrenzen betrachtet. In Kapitel 4 und 5 wird anhand dieses Modelles detaillierter auf die Fragestellung eingegangen, inwiefern die *Diffusion* einer neuen Technologie bei verschiedenen umweltpolitischen Instrumenten von der Höhe der Fixkosten sowie von der zeitlichen Abfolge von Diffusion und Regulierung abhängt. Es sei daran erinnert, daß MONTERO [1998] das Nash-Gleichgewicht der Investition in die neue Technologie bei vollständiger Diffusion charakterisiert. Das Resultat von MONTERO ist daher als spezieller Fall niedriger Fixkosten in der Analyse dieser Arbeit inbegriffen. Das Szenario von FEES wird um den Fall einheitlicher Emissionsobergrenzen erweitert. In Kapitel 5.3 wird mit Optionen auf Zertifikate eine weitere Möglichkeit vorgestellt,

²²Dieser Aufsatz stellt die Resultate von MILLIMAN UND PRINCE [1989] und REQUATE UND UNOLD [1998] einander gegenüber und erweitert diese Arbeiten um den Fall einer optimalen Antwort des Regulators auf die Diffusion einer neuen Vermeidungstechnologie.

eine Industrie umweltpolitisch zu regulieren. Dieses Instrument stellt sich als besonders interessant heraus, da der Regulator eine ex-post optimale Allokation auch dann erreichen kann, wenn er sich auf die Höhe seines Instrumentes ex-ante verpflichtet. Kapitel 6 geht auf die Anreize umweltpolitischer Instrumente in die *Entwicklung* einer umweltfreundlicheren Technologie ein. Hierzu wird das Preissetzungsverhalten des Innovators als Monopolist für die neue Technologie analysiert. Zum einen wird dabei untersucht, wie hoch die Monopolrente des Innovators bei verschiedenen umweltpolitischen Instrumenten ausfällt. Zum anderen wird – mit Hilfe der Ergebnisse aus Kapitel 4 – das teilspielperfekte Nash-Gleichgewicht verschiedener Regulierungsszenarien bzw. -spiele charakterisiert.

Kapitel 3

Das Grundmodell

In diesem Kapitel soll ein einfaches Modell eingeführt werden, das als Grundlage der weiteren Betrachtungen dieser Arbeit dient. Das Modell knüpft an die im letzten Kapitel vorgestellten Arbeiten von MILLIMAN UND PRINCE [1989], JUNG ET AL. [1996] und MONTERO [1998] an. So wird im folgenden ebenfalls eine Industrie betrachtet, die einen Schadstoff emittiert, der bei der Produktion eines Gutes anfällt. Dabei wird weder der Produktionsprozeß des Gutes noch der Outputmarkt berücksichtigt. Vielmehr wird ausschließlich die Höhe der Vermeidungsanstrengungen der Firmen modelliert. Hierzu wird angenommen, daß die Firmen der betrachteten Industrie eine konventionelle Vermeidungstechnologie einsetzen können, um den Schadstoff teilweise zu vermeiden. Wird die Industrie nun mittels eines umweltpolitischen Instrumentes reguliert, dann bestimmt die Höhe dieses Instrumentes die Vermeidungsanstrengungen der Firmen. Alternativ zu dieser herkömmlichen Technologie können die Firmen aber auch eine neue Technologie übernehmen, mittels derer der Schadstoff zu geringeren Kosten vermieden werden kann. Die Übernahme der neuen Technologie verursacht jedoch fixe Kosten.

Dieses Kapitel ist wie folgt gegliedert: Im ersten Abschnitt wird das Modell von REQUATE und UNOLD [1998] vorgestellt. Im darauf folgenden Abschnitt wird das soziale Optimum charakterisiert. In Abschnitt 3.3 wird untersucht, wieviele Firmen die neue Technologie bei Steuern und auktionierten Zertifikaten übernehmen. Abschließend wird auf die Anreize bei kostenlos ausgegebenen Zertifikaten²³, bei Steuern oder Subventio-

²³Die kostenlose Vergabe von handelbaren Zertifikaten wird in der englischsprachigen Literatur auch „grandfathering“ genannt.

nen und schließlich bei einheitlichen Emissionsstandards eingegangen. Zur einfacheren Lesbarkeit wird im folgenden bei längeren Beweisen auf den mathematischen Anhang verwiesen.

3.1 Die Vermeidungskosten

Man betrachte eine aus n Firmen bestehende Industrie. Die Industriegröße sei exogen vorgegeben. Alle Firmen emittieren einen homogenen Schadstoff, der teilweise vermieden werden kann. Die Vermeidungstechnologie der Firmen ($i = 1, \dots, n$) sei vollständig durch ihre Kostenfunktion C_i beschrieben, welche die üblichen Annahmen erfüllt:

$$\begin{aligned} C_i(e_i) &> 0 \quad \text{falls} \quad e_i < e_i^{max} \quad , \\ C_i(e_i) &= 0 \quad \text{falls} \quad e_i \geq e_i^{max} \quad . \end{aligned}$$

Desweiteren sind die Grenzvermeidungskosten positiv, d.h. $-C'_i(e_i) > 0$ falls $e_i < e_i^{max}$, und steigend in den Emissionen, d.h. $C''_i(e_i) > 0$, falls $e_i < e_i^{max}$, wobei $-C'_i(e_i) = dC_i(e_i)/de_i$ und $C''_i(e_i) = d^2C_i(e_i)/(de_i)^2$ gilt.

Im folgenden wird vorausgesetzt, daß zu Beginn des Betrachtungszeitraumes alle Firmen identisch sind, so daß sie dieselben Vermeidungskosten $C_0(e)$ haben. Die Firmen können jedoch in eine Vermeidungstechnologie investieren, die zu geringeren Vermeidungskosten $C_I(e)$ führt (siehe auch Abbildung 3.1), d.h.

$$-C'_I(e) < -C'_0(e) \quad \text{für alle} \quad e < e_0^{max} \quad .$$

Die Installation der neuen Technologie verursacht jedoch fixe Kosten $F > 0$.

3.2 Das soziale Optimum

Bevor die umweltpolitischen Instrumente im einzelnen betrachtet werden, soll zunächst das soziale Optimum charakterisiert werden. Hierzu sei eine Schadenfunktion $D(E)$ unterstellt, die den sozialen Schaden, verursacht durch die Emissionen in monetärer Form wiedergibt. Weiterhin gehe man davon aus, daß nur die aggregierten Emissionen in den Schaden eingehen, nicht jedoch deren Herkunft bzw. der Ort des Ausstoßes.

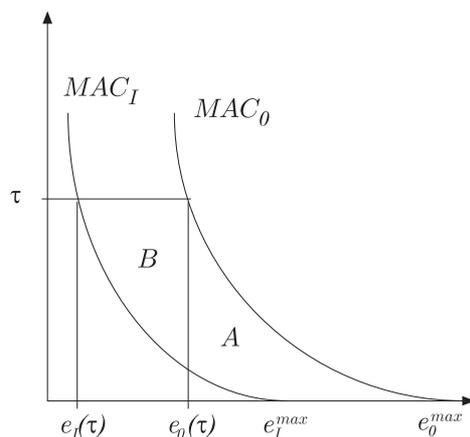


Abbildung 3.1: Abgebildet sind die Grenzvermeidungskosten der Firmen unter der konventionellen (MAC_0) und der neuen (MAC_I) Vermeidungstechnologie. In diesem Beispiel hat der Regulator einen Steuersatz τ gesetzt.

Die Schadenfunktion steige in den Emissionen und sei konvex, d.h.

$$D'(E) > 0 \quad \text{und} \quad D''(E) > 0 \quad .$$

Im folgenden bezeichnet n_I die Anzahl an Firmen, die die neue Technologie I betreibt. Dementsprechend vermeiden $n_0 = n - n_I$ viele Firmen mit der herkömmlichen Technologie 0. Ein sozialer Planer minimiert die gesamten sozialen Kosten:

$$\min_{e_0, e_I, n_I} \{n_I[C_I(e_I) + F] + n_0C_0(e_0) + D(n_Ie_I + n_0e_0)\} \quad .$$

Die sozial optimale Allokation ist dann durch folgendes Resultat charakterisiert:

Proposition 3.1 *Es existiert ein Intervall von Fixkosten $(\underline{F}, \overline{F})$, so daß*

- i) für $F \geq \overline{F}$ keine Firma die neue Technologie übernehmen sollte,*
- ii) für $F \leq \underline{F}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen sollten.*
- iii) Für $F \in (\underline{F}, \overline{F})$ ist eine teilweise Diffusion optimal. Die optimale Anzahl an Firmen n_I^* , die in die neue Technologie investieren sollten, ist steigend in F . Der optimale Grenzscha-den $MD^*(F)$ steigt ebenfalls in $F \in (\underline{F}, \overline{F})$.*

Der Beweis findet sich im Anhang. Proposition 3.1 sollte intuitiv einleuchtend sein: Falls die Installationskosten der neuen Vermeidungstechnologie sehr hoch sind, sollte keine Firma die neue Technologie übernehmen. In diesem Fall sind das optimale

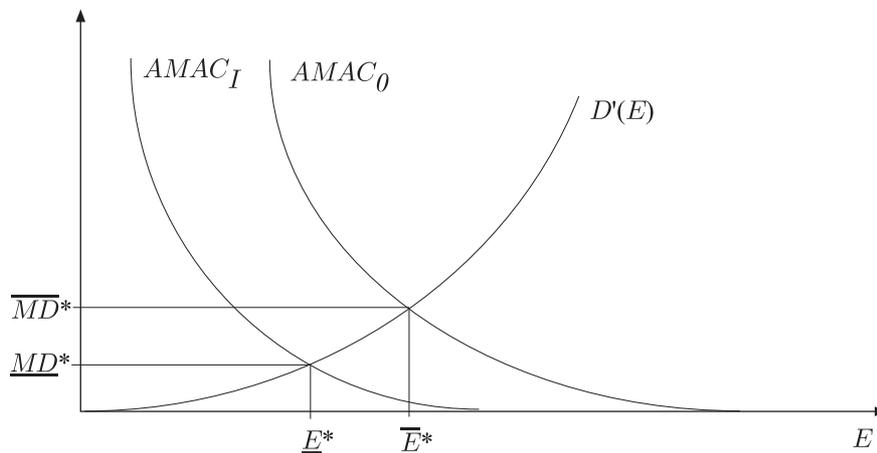


Abbildung 3.2: Die Abbildung zeigt die aggregierten Grenzvermeidungskosten bevor ($AMAC_0$) und nachdem ($AMAC_I$) die neue Vermeidungstechnologie vollständig übernommen wurde. Die zugehörigen optimalen Emissionsniveaus sind \underline{E}^* und \bar{E}^* . \underline{MD}^* und \overline{MD}^* sind die zugehörigen sozial optimalen Grenzschäden.

Emissionsniveau \bar{E}^* und der optimale Grenzschaden \overline{MD}^* unabhängig von F (siehe Abbildung 3.2). \bar{F} bezeichnet dabei die minimalen Fixkosten, für die es gerade noch optimal ist, daß keine Firma die neue Technologie übernimmt. Falls die fixen Kosten hinreichend klein sind, sollten alle Firmen die neue Technologie übernehmen. In diesem Fall sind die optimalen Emissionen \underline{E}^* und der optimale Grenzschaden \underline{MD}^* ebenfalls unabhängig von F . Die maximalen Fixkosten, für die es gerade noch optimal ist, daß alle Firmen die neue Technologie übernehmen, sind dabei mit \underline{F} bezeichnet. Für mittlere Investitionskosten ist partielle Diffusion optimal. Je niedriger die fixen Kosten, desto mehr Firmen sollten die neue Vermeidungstechnologie übernehmen und um so niedriger ist der zugehörige optimale Grenzschaden.

3.3 Steuern und auktionierte Zertifikate

Im folgenden soll auf die einzelnen umweltpolitischen Instrumente eingegangen werden. Dabei werden zunächst zwei Situationen verglichen. Der Regulator hat zu Beginn des Betrachtungszeitraumes *entweder* das Instrument der Besteuerung *oder* der Versteigerung von L handelbaren Zertifikaten zur Verfügung. Der Steuersatz *oder* der

Zertifikatepreis wird mit x bezeichnet. Kostenminimierung der Firmen erfordert

$$-C'_0(e_0) = x \quad , \quad (3.3.1)$$

$$-C'_I(e_I) = x \quad , \quad (3.3.2)$$

für Firmen mit der herkömmlichen bzw. der neuen Technologie. Daraus ergeben sich eindeutige Emissionen $e_0(x)$ bzw. $e_I(x)$ der Firmen ohne bzw. mit der neuen Vermeidungstechnologie. Die aggregierten Emissionen oder – anders ausgedrückt – die aggregierte Faktornachfrage nach Emissionen $E(x)$ bestimmen sich dann bei gegebener Technologie durch die Summe der individuellen Faktornachfragen der Firmen. Haben n_I viele Firmen die neue Technologie übernommen und sind dementsprechend $n_0 = n - n_I$ viele Firmen bei der herkömmlichen Technologie geblieben, dann gilt $E(x) = n_I e_I(x) + n_0 e_0(x)$. Man kann leicht zeigen, daß bei gegebener Technologie die Faktornachfrage der Firmen fallend im Preis für Emissionen x ist. Dazu betrachte man die Emissionen $e_0(x)$ bzw. $e_I(x)$ in Gleichungen (3.3.1) und (3.3.2) als Funktion des Preises für Emissionen x . Implizites Differenzieren von Gleichungen (3.3.1) und (3.3.2) nach x ergibt

$$\begin{aligned} -C''_i(e_i(x))e'_i(x) &= 1 \quad \text{bzw.} \\ e'_i(x) &= \frac{1}{-C''_i(e_i(x))} < 0 \quad . \end{aligned}$$

Daraus folgt auch unmittelbar $E'(x) = n_I e'_I(x) + n_0 e'_0(x) < 0$. Schließlich beachte man, daß die individuelle Faktornachfrage $e_i(x)$ die Umkehrfunktion der Grenzvermeidungskostenfunktion ist. Dementsprechend bezeichnet man die inverse Funktion der aggregierten Faktornachfrage $E(x)$ als die *aggregierte Grenzvermeidungskostenkurve* (AMAC). Der einfacheren Schreibweise wegen wird im folgenden das Argument der Emissionen im allgemeinen nicht mitgeführt, d.h. es bezeichne $e_0 = e_0(x)$ bzw. $e_I = e_I(x)$ die eindeutigen Emissionen bei einem Preis für Emissionen von x .

Nun sei vorausgesetzt, daß die Firmen mittels einer *Steuer* reguliert werden. Es bezeichne τ den Steuersatz. Die Kostendifferenz ΔC zwischen den beiden Technologien ist abhängig vom Steuersatz und gegeben durch

$$\Delta C(\tau) = C_0(e_0) + \tau e_0 - C_I(e_I) - \tau e_I - F \quad . \quad (3.3.3)$$

Man betrachte den Fall, daß $n_I \leq n$ Firmen die neue Technologie einsetzen, während die übrigen $n_0 = n - n_I$ Firmen bei der herkömmlichen Technologie bleiben. Wenn die Firmen bezüglich der beiden Typen von Technologien indifferent sind, dann muß folgende Gleichung gelten

$$\Delta C(\tau) = 0 \quad . \quad (3.3.4)$$

Nun sei unterstellt, daß die Firmen mit Hilfe von *Zertifikaten* reguliert werden. Es bezeichne σ den Marktpreis für Zertifikate. Hierbei hängt die Höhe des gleichgewichtigen Zertifikatspreises von der Anzahl der investierenden Firmen ab. Aus der Tatsache, daß ein höherer Anteil von Firmen mit der neuen Technologie zu niedrigeren aggregierten Grenzvermeidungskosten führt, folgt unmittelbar, daß der gleichgewichtige Zertifikatspreis $\sigma(n_I)$ um so kleiner ausfällt, je größer die Anzahl der investierenden Firmen ist. Es bezeichne n_I mit $0 \leq n_I \leq n$ die *gleichgewichtige Anzahl von investierenden Firmen*, falls zum einen

$$C_0(e_0) + \sigma(n_I)e_0(\sigma) - C_I(e_I) - \sigma(n_I + 1)e_I(\sigma) - F \leq 0 \quad (3.3.5)$$

gilt, d.h. keine Firma mit herkömmlicher Technologie in die neue Technologie investieren will, zum anderen

$$C_0(e_0) + \sigma(n_I - 1)e_0(\sigma) - C_I(e_I) - \sigma(n_I)e_I(\sigma) - F \geq 0 \quad (3.3.6)$$

erfüllt ist, d.h. keine Firma mit der neuen Technologie ihre Investitionsentscheidung bereut. Zunächst betrachte man $n_I = n$. Dann muß Gleichung (3.3.6) erfüllt sein. Nun sei angenommen, daß $n_I = 0$ gilt. Dann muß Gleichung (3.3.5) erfüllt sein. Zuletzt sei unterstellt, daß die Gleichungen (3.3.5) und (3.3.6) für ein n_I mit $0 < n_I < n$ erfüllt sind. Man gehe davon aus, daß die Firmen sich nacheinander entscheiden können, in die neue Technologie zu investieren oder bei der herkömmlichen Technologie zu verbleiben. In diesem Fall führen Marktkräfte stets zum Gleichgewicht.²⁴

²⁴Geht man hingegen davon aus, daß die Firmen gleichzeitig ziehen, dann ist zum einen nicht klar, wie es zum Gleichgewicht kommt. Zum anderen ist das Gleichgewicht dann nur bezüglich des Gleichgewichtspreises σ und der Anzahl an Firmen n_I , die die neue Technologie übernehmen, eindeutig bestimmt. Es bleibt offen, welche Firmen die neue Technologie übernehmen. Eine Eindeutigkeit kann aber erzwungen werden, indem man voraussetzt, daß die Firmen in einer zufälligen Reihenfolge ziehen. In diesem Fall ist das Gleichgewicht (3.3.5) und (3.3.6) ein teilspielperfektes Gleichgewicht eines sequentiellen Spiels.

Falls die Anzahl der Firmen groß ist, so daß die Investitionsentscheidung einer einzelnen Firma (fast) keinen Einfluß auf den gleichgewichtigen Zertifikatepreis hat,²⁵ dann können die zwei Ungleichungen (3.3.5) und (3.3.6) durch eine einzige Gleichung ersetzt werden:

$$C_0(e_0) + \sigma e_0 - C_I(e_I) - \sigma e_I - F = 0 \quad . \quad (3.3.7)$$

Die Kostendifferenz $\Delta C(\sigma)$ zwischen den beiden Technologien ist in einem Investitionsungleichgewicht also gleich Null. Abgesehen davon, daß τ durch σ ersetzt wurde, ist diese Gleichung identisch mit (3.3.4). Daher gilt folgendes Lemma bei Steuern sowie bei Zertifikaten gleichermaßen:

Lemma 3.1 *Es existiert höchstens ein Steuersatz $\tilde{\tau}$ bzw. Zertifikatepreis $\tilde{\sigma}$ mit $\tilde{\sigma} = \tilde{\tau} =: \tilde{x}$, so daß beide Typen von Firmen gleichzeitig am Markt bestehen können. Bezüglich dieses Preises \tilde{x} existieren eindeutige Emissionsniveaus \tilde{e}_I und \tilde{e}_0 , welche von den Firmen mit bzw. ohne der neuen Technologie gewählt werden. Falls $\tau > \tilde{\tau}$ ($\sigma > \tilde{\sigma}$), dann ist der Kostenvorteil der neuen Technologie positiv. Darüber hinaus ist \tilde{x} steigend in F .*

Der Beweis findet sich wiederum im Anhang.

Zunächst betrachte man den Fall, daß die Industrie mittels eines *Steuersatzes* der Höhe $\tilde{\tau}$ reguliert wird. Die Anzahl der investierenden Firmen n_I wird dann nicht eindeutig bestimmt, da n_I in die drei Gleichungen (3.3.1) – (3.3.4) nicht eingeht. Daher ist auch das aggregierte Emissionsniveau nicht eindeutig. Das *niedrigste* aggregierte Emissionsniveau wird erreicht, wenn *alle* Firmen in die neue Technologie investieren. In diesem Fall erhält man

$$E = \underline{E} = n\tilde{e}_I \quad . \quad (3.3.8)$$

Das *höchste* aggregierte Emissionsniveau bei einem Steuersatz $\tilde{\tau}$ kommt zustande, wenn *keine* Firma die neue Technologie übernimmt. In diesem Fall erhält man

$$E = \overline{E} = n\tilde{e}_0 \quad . \quad (3.3.9)$$

Da $\tilde{\tau}$ und \tilde{e}_i ($i = 0, I$) von F abhängen, sind auch \underline{E} und \overline{E} Funktionen von F .

²⁵Man erinnere sich, daß dies implizit auch bei MILLIMAN UND PRINCE [1989] und JUNG ET AL. [1996] unterstellt wird.

Nun soll der Fall betrachtet werden, daß der Regulator *Zertifikate* versteigert hat. Der Fall, daß Zertifikate kostenlos ausgegeben werden, wird im nächsten Abschnitt untersucht. Das folgende Lemma zeigt, daß man im Gegensatz zu einem Steuerregime im Fall von auktionierten Zertifikaten im Gleichgewicht immer eine eindeutige Anzahl von investierenden Firmen erhält:

Lemma 3.2 *Es sei L eine beliebige Anzahl von ausgegebenen Zertifikaten und σ der markträumende Zertifikatepreis.*

i.) Falls $L > \bar{E}$ gilt, dann ist $\sigma < \tilde{\sigma}$, und keine Firma wird die neue Technologie übernehmen.

ii.) Falls $L < \underline{E}$ gilt, dann ist $\sigma > \tilde{\sigma}$, und alle Firmen werden die neue Technologie übernehmen.

iii.) Falls $\underline{E} \leq L \leq \bar{E}$ gilt, dann ist $\sigma = \tilde{\sigma}$, und genau

$$n_I = \frac{n\tilde{e}_0 - L}{\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I} \tag{3.3.10}$$

Firmen übernehmen die neue Technologie.

Den Beweis findet man im Anhang.

Man beachte, daß das unter Punkt *iii.)* beschriebene Gleichgewicht nur bis auf eine Permutation der n_I von n Firmen eindeutig bestimmt wird, die die neue Technologie übernehmen (siehe auch Fußnote 24). Es mag überraschen, daß man denselben Gleichgewichtspreis $\sigma = \tilde{\sigma}$ für ein ganzes Intervall an Zertifikaten erhält. Falls jedoch Firmen mit verschiedenen Technologien gleichzeitig auf dem Markt sind, müssen sie zwischen den Technologien indifferent sein, d.h. die Kostendifferenz zwischen alter und neuer Technologie muß gleich Null sein. Dies kann aber nur für einen einzigen Zertifikatepreis der Fall sein. Was passiert, wenn man die Anzahl der Zertifikate von $L = \bar{E}$ auf $L = \underline{E}$ reduziert? Der Preis für Zertifikate würde zunächst steigen²⁶ und zwar so lange bis eine weitere Firma einen Anreiz hat, die neue Technologie zu übernehmen. Nach dem Wechsel der Technologie würde der Preis wieder auf $\sigma = \tilde{\sigma}$ fallen. Genau genommen würde der Graph, der für $L \in [\underline{E}, \bar{E}]$ die Anzahl der Zertifikate gegen den Gleichgewichtspreis abträgt, also eine Sägezahnkurve darstellen (siehe auch Abbildung 3.3). Ist

²⁶Man beachte, daß die Investition einer Firma und die damit verbundene Reduzierung der Emissionen genau genommen immer einen Einfluß auf den Zertifikatepreis hat, da die Nachfrage nach Emissionen fällt.

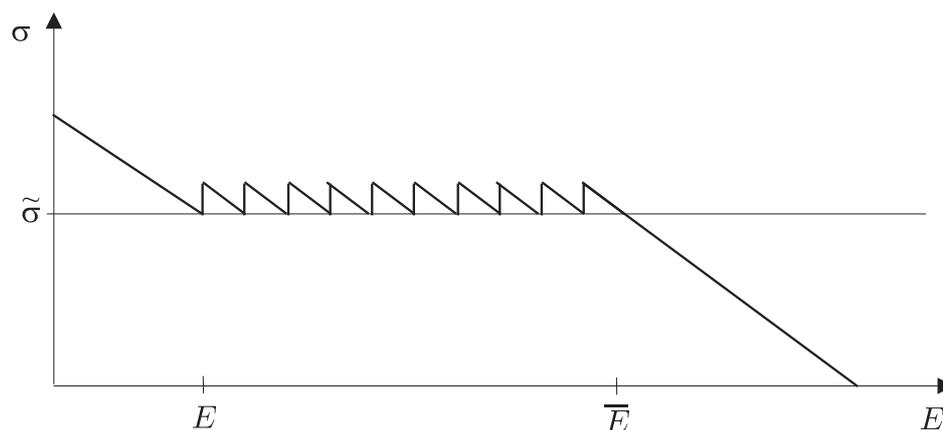


Abbildung 3.3: Der Graph, der die Anzahl der Zertifikate gegen den Gleichgewichtspreis für $L \in [\underline{E}, \bar{E}]$ abträgt, stellt eine Sägezahnkurve dar. Der Sprung entsteht jeweils, wenn eine weitere Firma die neue Technologie übernimmt.

der Markt hinreichend groß, kann man diese jedoch durch eine Gerade im Intervall $L \in [\underline{E}, \bar{E}]$ approximieren.

3.4 Kostenlos ausgegebene Zertifikate und Subventionen

Es wurde bereits an anderer Stelle erörtert, daß ein Teil der traditionellen Literatur (siehe MALUEG [1989], MILLIMAN und PRINCE [1989], und JUNG ET AL. [1996]) zu dem Ergebnis kommt, daß kostenlos ausgegebene Zertifikate niedrigere Investitionsanreize als auktionierte Zertifikate bzw. Steuern bieten. Diese Autoren argumentieren, daß die Zertifikate durch die Investitionen in neue Vermeidungstechnologien an Wert verlieren. Im letzten Abschnitt wurde jedoch schon für auktionierte Zertifikate gezeigt, daß der *ursprüngliche* Wert der Zertifikate für die Investitionsentscheidung keine Rolle spielt. Nun soll gezeigt werden, daß dies auch für kostenlos ausgegebene Zertifikate gilt. Hierzu sei unterstellt, daß jede Firma $\hat{e}_i = \hat{e}$ viele Zertifikate kostenlos zugeteilt bekommen hat. Da zunächst alle Firmen identisch sind, wird es auch keinen Handel mit Zertifikaten geben, solange keine Firma in die neue Technologie investiert hat. Da die neue Technologie für jedes Emissionsniveau e zu niedrigeren Grenzvermeidungskosten führt, werden die Investoren zu Verkäufern von Zertifikaten und die Nicht-Investoren zu

Käufern. Die Firmen sind genau dann indifferent zwischen den beiden Technologien, falls diese im Gleichgewicht gleiche Kosten verursachen, d.h.

$$\Delta C(\sigma) = C_0(e_0) + \sigma \cdot [e_0 - \hat{e}] - C_I(e_I) + \sigma \cdot [\hat{e} - e_I] - F = 0 \quad . \quad (3.4.1)$$

Man sieht sofort, daß sich $\sigma \cdot \hat{e}$ herauskürzt. Daher ist Gleichung (3.4.1) äquivalent zu Gleichung (3.3.7). Man erhält also unmittelbar folgendes Resultat:

Proposition 3.2 *Die Anreize, die neue Technologie zu übernehmen, sind identisch bei kostenlos ausgegebenen wie bei auktionierten Zertifikaten.*

Da der Zertifikatepreis mit der Anzahl der investierenden Firmen sinkt, ergibt sich sowohl bei einem Regime auktionierten, als auch bei einem Regime kostenlos ausgegebenen Zertifikate für die Nicht-Investoren ein „Trittbrettfahrer-Effekt“²⁷. Man beachte, daß sich die Anfangsausstattung $\hat{e}_i = \hat{e}$ als pauschale Subventionierung der Firmen interpretieren läßt, wobei man, ohne Einschränkung der Allgemeinheit, annehmen kann, daß alle Firmen die gleiche Anfangsausstattung erhalten.²⁸ Pauschale Transfers beeinflussen jedoch nie eine marginale Entscheidung, in diesem Fall die Investitionsentscheidung bezüglich der neuen Technologie.

Mit der gleichen Begründung kann man auch leicht erkennen, daß Subventionen, die für vermiedene Emissionen gezahlt werden, dieselben Anreize bieten wie Steuern auf Emissionen. Hierzu bezeichne \hat{e} das Emissionsniveau, dessen Unterschreitung mit einer Subvention ζ pro Einheit Emissionen subventioniert wird. Die totalen Kosten der Firmen sind also gegeben durch $TC_i(e_i) = C_i(e_i) - \zeta [\hat{e} - e_i]$. Man erhält das folgende Ergebnis:

Proposition 3.3 *Die Anreize, die neue Technologie zu übernehmen, sind identisch bei Steuern und Subventionen gleicher Höhe.*

Beweis: Es sei angenommen, daß $-C'_i(\hat{e}) < \zeta$ gilt. Dann setzen die Firmen $-C'_i(e_i) = \zeta$. Darüber hinaus sind die Firmen indifferent zwischen den beiden Technologien, falls

²⁷In der engl.-sprachigen Literatur wird ein Trittbrettfahrer-Effekt als „free-riding“ bezeichnet.

²⁸Solange der Zertifikatemarkt kompetitiv bleibt, könnte man den einzelnen Firmen auch unterschiedliche Mengen an kostenlosen Zertifikaten zuteilen. Man beachte dabei jedoch, daß die Verteilung der Anfangsausstattung einen direkten Einfluß auf die totalen Kosten und damit den Gewinn der Firmen hat (vgl. hierzu auch MONTGOMERY [1972]).

$C_0(e_0) - \zeta[\widehat{e} - e_0] - C_I(e_I) + \zeta[\widehat{e} - e_I] - F = 0$ gilt. Diese Gleichung ist jedoch äquivalent zu $C_0(e_0) - \zeta e_0 - C_I(e_I) + \zeta e_I - F = 0$. Daher kann man Lemma 3.1 auch auf Subventionen anwenden. Q.E.D.

Im folgenden werden kostenlos ausgeteilte Zertifikate und Subventionen daher nicht mehr getrennt betrachtet.

3.5 Emissionsstandards

Zuletzt stelle man sich eine Situation vor, in der der Regulator eine einheitliche, absolute Emissionsobergrenze²⁹ festlegt. Eine solche absolute Emissionsobergrenze, die für alle Firmen gleichermaßen gilt, wird im folgenden *Emissionsstandard* oder kurz *Standard* genannt. Dieser sei mit s bezeichnet. Jede Firma darf also nicht mehr als $e = s$ viele Emissionen ausstoßen. Wiederum läßt sich – bei leichtem Mißbrauch der Notation – die Kostendifferenz zwischen den beiden Technologien bei gegebenem Standard definieren als

$$\Delta C(s) = C_0(s) - C_I(s) - F \quad .$$

Eine Firma ist indifferent in ihrer Investitionsentscheidung, falls gilt

$$\Delta C(s) = 0 \quad . \tag{3.5.1}$$

Da $-C'_0(s) > -C'_I(s)$, sinkt die LS der Gleichung (3.5.1) in s . Man erhält daher unmittelbar folgendes Ergebnis:

Lemma 3.3 *Zu jedem F existiert ein eindeutiger Standard $\tilde{s} = s(F)$, so daß*

- i.) für $s > \tilde{s}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt,*
- ii.) für $s < \tilde{s}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen.*

²⁹Eine absolute Emissionsobergrenze ist natürlich nur eine mögliche Art einer Umweltauflage bzw. Umweltnorm. Ein guter Überblick über die möglichen Formen von Umweltnormen findet sich in HELFAND [1991]. Für einen Vergleich von absoluten Emissionsobergrenzen und relativen Emissionsauflagen siehe auch EBERT [1998] und für einen Vergleich von absoluten Emissionsobergrenzen und Prozeßnormen BESANKO [1987].

iii.) Im Fall $s = \tilde{s}$ ist die Anzahl der investierenden Firmen nicht eindeutig. Es hat jedoch keine Firma einen positiven Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen.

Man beachte, daß immer alle oder keine Firma die neue Technologie übernehmen. Eine teilweise Übernahme der neuen Technologie ist ausgeschlossen. Andererseits kann man leicht zeigen, daß eine teilweise Übernahme der neuen Technologie auch nicht effizient wäre. Denn eine effiziente Allokation erfordert, daß die Grenzvermeidungskosten aller Firmen identisch sind. Laut Annahme über die Grenzvermeidungskosten implizieren unterschiedliche Technologien jedoch unmittelbar, daß sich die Grenzvermeidungskosten bei einem Standard s zwischen den Firmen unterscheiden, d.h. es gilt $-C'_I(s) < -C'_0(s)$ für alle $s < e_0^{\max}$.

Kapitel 4

Diffusion neuer Vermeidungstechnologien unter verschiedenen Rahmenbedingungen

Eine erste Charakterisierung verschiedener umweltpolitischer Instrumente im letzten Kapitel ergab, daß bei Zertifikaten im allgemeinen eine teilweise Diffusion der neuen Technologie zu erwarten ist. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu der von MILLIMAN UND PRINCE [1989] und JUNG ET AL. [1996] getroffenen Annahme einer vollständigen Diffusion der neuen Technologie. In diesem Kapitel sollen die Anreize zur Übernahme einer neuen Technologie in verschiedenen Szenarien näher betrachtet werden.

Im allgemeinen hat der Regulator mehrere Möglichkeiten, sowohl den Zeitpunkt als auch die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes festzusetzen. Zum einen kann er sich auf die Höhe des gewählten umweltpolitischen Instrumentes verpflichten, *bevor* eine neue Technologie auf den Markt kommt. Zum anderen kann er sich aber auch verpflichten, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes optimal an die Diffusion einer neuen Technologie *anzupassen*. Im Rahmen einer normativen Analyse lohnt es sich dabei, alle möglichen Szenarien zu untersuchen, um anschließend beurteilen zu können, welche Strategie geringere soziale Kosten verspricht. Bevor daraus Politikempfehlungen abgeleitet werden können, müssen aber zusätzlich auch Aspekte, wie z.B. die Zeitkonsistenz der Selbstverpflichtung und der Informationsbedarf des Regulators berücksichtigt werden.

Zunächst sei eine Situation betrachtet, in der sich der Regulator auf die Höhe des gewählten umweltpolitischen Instrumentes verpflichtet, bevor die neue Technologie auf den Markt kommt. Auf welches Niveau soll er sich dann festlegen? Erwartet er keine neue Technologie, kennt aber sowohl die Kosten der konventionellen Technologie als auch den sozialen Schaden der Emissionen, dann sollte er offensichtlich das bezüglich der alten Technologie optimale Niveau festsetzen. Erwartet der Regulator hingegen die neue Technologie, dann sollte er sich auf das bezüglich der neuen Technologie optimale Niveau verpflichten. BAUMOL UND OATES [1971] bemerken jedoch, daß es in der Praxis beinahe unmöglich sei, den sozialen Grenzschaten auch nur annähernd genau zu erfassen. Sie schlagen deshalb einen sogenannten *Standard-Preis-Ansatz* vor. Dabei wird ein aus der Politik (oft willkürlich) vorgegebenes aggregiertes Emissionsziel mit Hilfe einer *Steuer* durchgesetzt. Kennt der Regulator die Grenzvermeidungskosten der Firmen, dann kann er den zu einem Emissionsziel korrespondierenden Steuersatz berechnen. MARIN [1991] betont, daß der Regulator meist auch die Grenzvermeidungskosten der Firmen nicht genau kenne. Kennt er diese Kosten nur ungenau, dann kann er bei einem Standard-Preis-Ansatz den Steuersatz immerhin in einem „Trial and Error“ Prozeß im Laufe der Zeit so anpassen, daß das Emissionsziel eingehalten wird. Man beachte aber, daß der Regulator im Vergleich zu Steuern bei *Zertifikaten* weder die Grenzvermeidungskosten noch den Grenzschaten kennen muß, um ein aggregiertes Emissionsziel einzufordern. Er muß lediglich die dem Emissionsziel entsprechende Menge an Zertifikaten ausgeben. Der eigentliche Vorteil von marktorientierten Instrumenten wie Steuern und Zertifikaten gegenüber einer Auflagenpolitik ist daher, daß ein aggregiertes Emissionsziel selbst dann zu geringsten Kosten erreicht werden kann, wenn der Regulator nur geringe Informationen besitzt.

Schließlich stelle man sich eine Situation vor, in der sich der Regulator verpflichtet hat, die Höhe des gewählten umweltpolitischen Instrumentes optimal an die Übernahme der neuen Technologie anzupassen. Um auf diese Weise reagieren zu können, benötigt der Regulator offensichtlich vollständige Information sowohl über die Technologien als auch über den Schaden. Daher läßt sich die Kritik von BAUMOL UND OATES [1971] bzw. MARIN [1991] natürlich auch an einem solchen Szenario anbringen. FEES [1998] zeigt, daß in diesem Fall, d.h. wenn der Regulator vollständige Informationen besitzt, Steuern und Zertifikate als äquivalente Instrumente angesehen werden können. Mit beiden Instrumenten kann die sozial optimale Allokation herbeigeführt werden. Zunächst betrachte man ein Steuerregime. Da die Vermeidung nach erfolgter Diffusion

zu geringeren Grenzkosten möglich ist, sollte der Regulator den Steuersatz verringern. MILLIMAN UND PRINCE [1989] bemerken jedoch, daß in der Praxis eine Steuersenkung im allgemeinen auf Widerstand treffe. Hier liegt wiederum ein Vorteil der Zertifikaten vor, da der Regulator nichts unternehmen muß.

Dieses Kapitel ist wie folgt gegliedert. Zunächst wird – wie in Kapitel 3 – eine homogene Industrie betrachtet. Im folgenden Abschnitt wird unterstellt, daß sich der Regulator auf ein aggregiertes Emissionsziel selbstverpflichtet hat. Dabei zeigt sich, daß die Allokation der Emissionen nach (teilweiser) Übernahme der neuen Technologie nicht effizient ist. Daher wird in Abschnitt 4.2 ein Szenario untersucht, in dem sich der Regulator dazu verpflichtet, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes optimal an die Diffusion der neuen Technologie anzupassen. Abschnitt 4.3 untersucht schließlich den Fall asymmetrischer Firmen.

4.1 Vergleich der Investitionsanreize für ein aggregiertes Emissionsziel

Zunächst soll ein Szenario untersucht werden, demzufolge der Regulator beschließt, ein aggregiertes Emissionsziel \hat{E} durchzusetzen. Er kann dieses umsetzen, indem er entweder Steuern erhebt, Subventionen zahlt, Zertifikate ausgibt oder einen einheitlichen Emissionsstandard festlegt. Man nehme nun an, daß sich der Regulator für einen ausreichend langen Zeitraum auf die Höhe seines Politikinstrumentes verpflichtet hat, bevor die neue Technologie auf den Markt kommt.³⁰

Es wurde bereits gezeigt, daß die Firmen bei Steuern $-C'_0(e_0) = \tau$ setzen. Dies führt zu Emissionen $e_0(\tau)$. Die aggregierten Emissionen sind dann gegeben durch $E_0(\tau) = ne_0(\tau)$. Um ein aggregiertes Emissionsziel \hat{E} zu erreichen, muß der Regulator die Steuer auf die Höhe $\tau = AMAC_0(\hat{E})$ festsetzen. Im Fall von Zertifikaten wird der Regulator eine Anzahl von $L = \hat{E}$ vielen Zertifikaten ausgeben und im Fall eines einheitlichen Emissionsstandards den Standard auf $s = \hat{E}/n$ festlegen.

³⁰Dies wird implizit auch in MILLIMAN UND PRINCE [1989] und JUNG ET AL. [1996] unterstellt.

4.1.1 Aggregiertes Emissionsziel

Interessant ist nun die Frage, wie viele Firmen die neue Technologie übernehmen, sobald eine solche auf dem Markt ist. Anhand der Resultate des letzten Kapitels erhält man folgende Ergebnisse:

Proposition 4.1 (Steuern) *Es sei angenommen, daß der Regulator eine Emissionssteuer festgelegt hat, um ein aggregiertes Emissionsziel \hat{E} zu implementieren (Standard-Preis-Ansatz). Dann*

- i) investiert für $\hat{E} > \bar{E}$ keine Firma in die neue Technologie,*
- ii) investieren für $\hat{E} < \bar{E}$ alle Firmen in die neue Technologie, und die aggregierten Emissionen E sind kleiner als \hat{E} .*
- iii) Für $\hat{E} = \bar{E}$ ist die Anzahl der investierenden Firmen nicht eindeutig bestimmt. Die Firmen sind indifferent zwischen der alten und der neuen Technologie. Daher hat keine Firma einen positiven Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen.*

Der Beweis findet sich im Anhang.

Proposition 4.2 (Zertifikate) *Es sei angenommen, daß der Regulator Zertifikate ausgegeben hat, um ein aggregiertes Emissionsziel \hat{E} zu implementieren. Dann*

- i) investiert für $\hat{E} \geq \bar{E}$ keine Firma in die neue Technologie,*
- ii) investieren für $\hat{E} \leq \underline{E}$ alle Firmen in die neue Technologie.*
- iii) Für aggregierte Emissionsziele $\underline{E} < \hat{E} < \bar{E}$ ist die Anzahl der Firmen, die die neue Technologie übernehmen, gegeben durch Gleichung (3.3.10).*

Der Beweis folgt unmittelbar aus Lemma 3.2.

Proposition 4.3 (Standards) *Es sei angenommen, daß der Regulator einen einheitlichen Emissionsstandard festgesetzt hat, um ein aggregiertes Emissionsziel \hat{E} zu implementieren. Dann existiert ein Emissionsziel $\hat{\hat{E}}$ mit $\underline{E} < \hat{\hat{E}} < \bar{E}$, so daß*

- i) für alle $\hat{E} > \hat{\hat{E}}$ keine Firma in die neue Technologie investiert,*

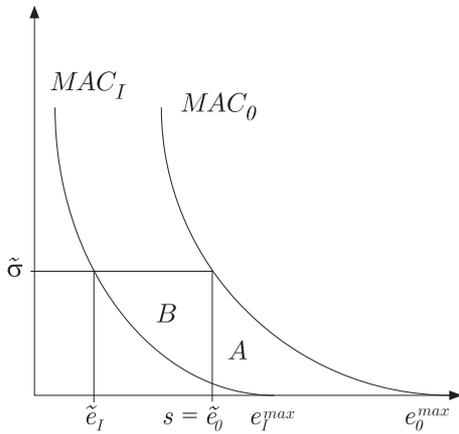


Abbildung 4.1:

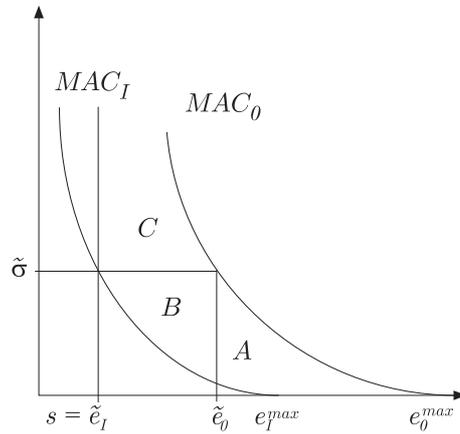


Abbildung 4.2:

ii) für alle $\hat{E} < \hat{\bar{E}}$ alle Firmen in die neue Technologie investieren.

iii) Für $\hat{E} = \hat{\bar{E}}$ ist die Anzahl der investierenden Firmen wiederum nicht eindeutig bestimmt, da die Firmen indifferent zwischen der alten und der neuen Technologie sind. Keine Firma hat jedoch einen positiven Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen.

Der formale Beweis findet sich wiederum im Anhang. Die Intuition kann sehr schön aus Abbildung 4.1 abgelesen werden. Dabei bezeichnet $\tilde{\sigma} = \tilde{\sigma}(F)$ den Zertifikatspreis, zu dem die Firmen bei Fixkosten der Höhe $F \hat{=} A + B$ indifferent zwischen der neuen und der alten Technologie sind. Es sei daran erinnert, daß $\bar{E} = n\tilde{e}_0$ sowie $\underline{E} = n\tilde{e}_I$ gilt, wobei \tilde{e}_0 bzw. \tilde{e}_I die optimalen Emissionen der Firmen mit herkömmlicher bzw. neuer Technologie bei einem Zertifikatspreis von $\tilde{\sigma}$ sind. Im Fall eines Emissionsziels $\hat{E} = \bar{E}$ setzt der Regulator daher einen Standard $s = \tilde{e}_0$. Die Einsparung an variablen Kosten $C_0(\tilde{e}_0) - C_I(\tilde{e}_0) \hat{=} A$ ist kleiner als die Höhe der Fixkosten $F \hat{=} A + B$. Daher ist der Kostenvorteil der neuen Technologie negativ, d.h. keine Firma ist bereit, die neue Technologie zu übernehmen. Umgekehrt verhält es sich, falls $\hat{E} = \underline{E}$ gilt. Nun ist der Standard durch $s = \tilde{e}_I$ gegeben. Die Einsparung an variablen Kosten $C_0(\tilde{e}_I) - C_I(\tilde{e}_I) \hat{=} A + B + C$ ist größer als die Höhe der Fixkosten, d.h. der Kostenvorteil der neuen Technologie ist positiv. Da der Kostenunterschied bei Standards $\Delta C(s)$ stetig und fallend in s ist, existiert ein aggregierter Emissionsstandard $\hat{\bar{E}}$, so daß alle Firmen für $\hat{E} < \hat{\bar{E}}$ investieren und für $\hat{E} > \hat{\bar{E}}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt.

Die Resultate sind in Tabelle 4.1 gegenübergestellt. Man sieht, daß über einen breiten Bereich von Emissionszielen alle Instrumente äquivalent sind. Falls das Emissionsziel

Bereich des Emissionszieles \hat{E}	Anzahl der Firmen, die neue Technologie übernehmen bei		
	Steuern oder Subventionen	auktionierten und kostenlosen Zertifikaten	Standards
$\hat{E} \geq \bar{E}$	$n_I = 0$	$n_I = 0$	$n_I = 0$
$\hat{E} \in [\hat{E}, \bar{E})$	$n_I = n$	$0 < n_I < n$	$n_I = 0$
$\hat{E} \in (\underline{E}, \hat{E})$	$n_I = n$	$0 < n_I < n$	$n_I = n$
$\hat{E} \leq \underline{E}$	$n_I = n$	$n_I = n$	$n_I = n$

Tabelle 4.1:

hinreichend klein ist, werden alle Firmen investieren, falls das Emissionsziel hinreichend groß ist, wird keine Firma die neue Technologie übernehmen. Bei einem großen, aber nicht zu großen Emissionsziel führen Steuern und Subventionen zu vollständiger Diffusion, während bei Zertifikaten die neue Technologie nur teilweise übernommen wird. Bei Emissionsstandards wird die neue Technologie in diesem Fall von keiner Firma übernommen. Man beachte, daß die hier vorgestellten Resultate für Emissionsziele $\hat{E} \in (\underline{E}, \hat{E})$ den traditionellen Ergebnissen widersprechen. Bei Steuern, Subventionen und vor allem auch bei Standards übernehmen mehr Firmen die neue Technologie als bei auktionierten oder auch bei kostenlos ausgegebenen Zertifikaten. Man kann daher auch davon sprechen, daß Steuern, Subventionen und Standards einen höheren Anreiz in die Übernahme neuer Technologien bieten als Zertifikate.

Aber bedeutet dies, daß Steuern ein besseres Instrument als Zertifikate darstellen, wenn man den Standpunkt eines sozialen Planers einnimmt? Da die Anzahl der Firmen, die die neue Technologie übernehmen, von der Höhe des betrachteten umweltpolitischen Instrumentes abhängt, muß man sich auf ein spezielles aggregiertes Emissionsziel festlegen, um beurteilen zu können, ob – verglichen mit der sozial optimalen Allokation – zu viele oder zu wenige Firmen die neue Technologie übernehmen.

4.1.2 Ursprünglich optimales aggregiertes Emissionsziel

Um diesen Aspekt näher zu untersuchen, soll im folgenden eine Situation betrachtet werden, in der der Regulator die Höhe seines Instruments bezüglich der alten Technologie 0 optimal festgesetzt und sich verpflichtet hat, die Höhe des Instrumentes für einen hinreichend langen Zeitraum nicht zu verändern. Dies erscheint plausibel, falls

der Regulator für einen längeren Zeitraum keine neue Technologie erwartet.³¹ Aus Propositionen 3.1 und 4.1 ergibt sich folgendes Resultat:

Proposition 4.4 (Steuern und Subventionen) *Wenn die Steuer (bzw. Subvention) vor Übernahme der neuen Technologie auf das optimale Niveau gesetzt worden ist, dann erfolgt*

- i) keine Übernahme für $F > \bar{F}$,*
- ii) vollständige Übernahme für $F < \bar{F}$.*
- iii) Für $F = \bar{F}$ ist die Anzahl der die neue Technologie übernehmenden Firmen nicht eindeutig bestimmt. Es besteht jedoch kein positiver Anreiz für eine Firma, die neue Technologie zu übernehmen.*

Der Beweis findet sich im Anhang.

Es sei daran erinnert, daß bei der Charakterisierung der sozial optimalen Allokation \bar{F} so konstruiert worden war, daß für Fixkosten $F \geq \bar{F}$ keine Firma die neue Technologie übernehmen sollte. Dementsprechend sollten für Fixkosten $F \leq \underline{F}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Proposition 4.4 impliziert daher, daß für $F \in (\underline{F}, \bar{F})$ zu viele Firmen die neue Technologie übernehmen. Bezüglich eines Zertifikateregimes erhält man andererseits folgendes Ergebnis:

Proposition 4.5 (Zertifikate) *Es sei angenommen, daß die ausgegebene Menge an Zertifikaten optimal war, bevor die neue Technologie auf den Markt kam. Dann existieren Fixkosten $\hat{F} < \underline{F}$, so daß*

- i) für $F \geq \bar{F}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt,*
- ii) für $F \leq \hat{F}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen,*
- iii.) für $F \in (\hat{F}, \bar{F})$ die Anzahl der investierenden Firmen suboptimal ist.*

Der Beweis folgt aus den Propositionen 3.1 und 4.2. Er findet sich im Anhang.

³¹Man vergleiche hierzu die weiter oben bereits erwähnte Kritik von MARIN [1991].

Zuletzt sei eine Regulierung mittels eines Standards unterstellt. Man beachte, daß der bezüglich der alten Technologie optimale Standard durch $s = \bar{e}^* = \bar{E}^*/n$ gegeben ist. Damit lassen sich wiederum Fixkosten $\hat{\hat{F}}$ definieren, bei denen die Firmen zwischen den beiden Technologien gerade indifferent sind:

$$\hat{\hat{F}} = C_0(\bar{e}^*) - C_I(\bar{e}^*) \quad .$$

Damit ergibt sich folgendes Resultat:

Proposition 4.6 (Standards) *Wenn der einheitliche Standard optimal gesetzt wurde, bevor die neue Technologie übernommen worden ist, dann existieren Fixkosten $\hat{\hat{F}}$ mit $\hat{F} < \hat{\hat{F}} < \bar{F}$, so daß*

- i) für $F > \hat{\hat{F}}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt,*
- ii) für $F < \hat{\hat{F}}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen,*
- iii) für $F = \hat{\hat{F}}$ die Anzahl der investierenden Firmen nicht eindeutig gegeben ist. Es gibt jedoch für keine Firma einen positiven Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen.*

$\hat{\hat{F}}$ kann dabei größer oder kleiner als \underline{F} sein.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Ob Standards höhere oder niedrigere als sozial optimale Anreize bieten, die neue Technologie zu übernehmen, hängt davon ab, ob $\hat{\hat{F}}$ größer oder kleiner ist als \underline{F} . Im Fall $\hat{\hat{F}} < \underline{F}$ übernehmen für $F \in [\hat{\hat{F}}, \bar{F})$ zu wenige Firmen die neue Technologie. Im Fall $\hat{\hat{F}} > \underline{F}$ übernehmen für $F \in (\underline{F}, \hat{\hat{F}})$ zu viele und für $F \in [\hat{\hat{F}}, \bar{F})$ zu wenige Firmen die neue Technologie.

Die bisherigen Ergebnisse sind in Abbildung 4.3 und Tabelle 4.2 zusammengestellt. Demnach existiert ein Intervall an Fixkostenparametern $(\hat{\hat{F}}, \hat{\hat{F}})$, für die sowohl Steuern als auch Standards größere Investitionsanreize in die neue Technologie bieten als Zertifikate. Insbesondere können die Anreize bei Steuern und Zertifikaten zu hoch aus der Sicht eines sozialen Planers sein. Man beachte auch, daß die aggregierten Emissionen bei Steuern und Subventionen bei Übernahme einer neuen Technologie auf ein suboptimales Niveau sinken.

Bereich für F	Übernahme der neuen Technologie		
	Steuern oder Subventionen	auktion. bzw. kostenl. Zertifikate	Standards
i.) Fall $\underline{F} < \widehat{F}$			
$F \leq \widehat{F}$	vollständig (optimal)	vollständig (optimal)	vollständig (optimal)
$F \in (\widehat{F}, \underline{F}]$	vollständig (optimal)	teilweise Übernahme (Unterinvestition)	vollständig (optimal)
$F \in (\underline{F}, \widehat{F})$	vollständig (Überinvestition)	teilweise Übernahme (Unterinvestition)	vollständig (Überinvestition)
$F \in [\widehat{F}, \overline{F})$	vollständig (Überinvestition)	teilweise Übernahme (Unterinvestition)	keine Investition (Unterinvestition)
$F \geq \overline{F}$	keine Investition (optimal)	keine Investition (optimal)	keine Investition (optimal)
ii.) Fall $\underline{F} > \widehat{F}$			
$F \leq \widehat{F}$	vollständig (optimal)	vollständig (optimal)	vollständig (optimal)
$F \in (\widehat{F}, \widehat{F}]$	vollständig (optimal)	teilweise Übernahme (Unterinvestition)	vollständig (optimal)
$F \in (\widehat{F}, \underline{F})$	vollständig (optimal)	teilweise Übernahme (Unterinvestition)	keine Investition (Unterinvestition)
$F \in [\underline{F}, \overline{F})$	vollständig (Überinvestition)	teilweise Übernahme (Unterinvestition)	keine Investition (Unterinvestition)
$F \geq \overline{F}$	keine Investition (optimal)	keine Investition (optimal)	keine Investition (optimal)

Tabelle 4.2: Übernahme der neuen Technologie, wenn sich der Regulator auf die ursprünglich optimale Höhe des umweltpolitischen Instrumentes selbstverpflichtet hat.

Dies bedeutet, daß der Steuersatz oder der Emissionsstandard gesenkt bzw. die Anzahl an Zertifikaten verringert werden sollten.

Doch auch mittels einer nachträglichen, spontanen, d.h. von den Firmen nicht antizipierten, Verringerung des *Steuersatzes* kann der Regulator das soziale Optimum in der Regel nicht erreichen. Laut Proposition 4.4 haben bei einer Steuer im Fall $F < \bar{F}$ bereits alle Firmen die neue Technologie übernommen. Andererseits kann ein Wiederabbau der neuen Technologie jedoch nicht effizient sein, falls die Fixkosten irreversibel sind. Daher bleibt dem Regulator nur noch die Möglichkeit, den Steuersatz an die bereits erfolgte vollständige Diffusion anzupassen. Darüber hinaus beachte man, daß der Regulator mittels Steuern das soziale Optimum nicht einmal dann erreichen kann, wenn er den Steuersatz an die neue Technologie anpaßt, *bevor* die Firmen sie übernommen haben. In Abschnitt 3.3 wurde gezeigt, daß bei gegebenem Steuersatz entweder alle oder keine Firma in die neue Technologie investieren. Ist daher eine partielle Übernahme der neuen Technologie sozial optimal, dann führt eine ex-ante Verpflichtung auf einen bestimmten Steuersatz nicht zu ex-post Effizienz. Daher ist eine Verpflichtung auf einen Steuersatz – wie KENNEDY UND LAPLANTE [1998] zeigen – in der Regel nicht zeitkonsistent.³²

Im Gegensatz zu Steuern läßt sich bei *Zertifikaten* die sozial optimale Allokation auch nachträglich noch implementieren. Wenn der Regulator die Menge an Zertifikaten nämlich verringert, dann steigt der Zertifikatepreis. Dadurch haben weitere Firmen einen Anreiz, in die neue Technologie zu investieren. Da bei der ursprünglichen Zertifikatenumenge zu wenige Firmen die neue Technologie übernommen haben, kann der Regulator die sozial optimale Diffusion nachträglich erreichen.

Zuletzt betrachte man eine Regulierung mittels eines *Emissionsstandards*. Das soziale Optimum kann bei einem Standard offensichtlich im allgemeinen nicht erreicht werden, da eine partielle Übernahme der neuen Technologie implizieren würde, daß die Grenzvermeidungskosten von Firmen des Types 0 nicht gleich den Grenzvermeidungskosten der Firmen des Types *I* sind. Eine solche Allokation kann jedoch nicht effizient sein.

³²In Abschnitt 4.3 wird jedoch gezeigt werden, daß im Fall asymmetrischer Firmen auch unter Steuern für jeden gegebenen Steuersatz τ ein eindeutiges Gleichgewicht existiert. Im Fall einer heterogenen Industrie ist daher auch ein Steuerregime zeitkonsistent.

4.2 Anpassung der Politik – Ratcheting

Man stelle sich nun eine Situation vor, in der sich der Regulator verpflichtet, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes an die erfolgte Übernahme einer neuen Technologie optimal *anzupassen*. Im Gegensatz zur Diskussion des letzten Abschnittes antizipieren die Firmen also bereits bei ihrer Investitionsentscheidung eine optimale Reaktion des Regulators.

4.2.1 Marktinstrumente

FEESS [1998] zeigt, daß unter dieser Voraussetzung *Steuern, Subventionen* sowie *Zertifikate* sozial optimale Anreize bieten, die neue Technologie zu übernehmen. Hierzu sei unterstellt, daß der Regulator die Kostenfunktionen sowohl der herkömmlichen als auch der neuen Technologie kennt. Da die Firmen ihre Technologie wählen, bevor der Regulator die Höhe seines Instrumentes anpaßt, besteht bei einem Zertifikateregime ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Anzahl an Zertifikaten L und deren Marktpreis $\sigma(L)$. Daher kann man so tun, als ob der Regulator direkt den Zertifikatepreis $\sigma(L)$ festsetzen würde, obwohl er in Wirklichkeit natürlich L viele Zertifikate ausgibt. Im folgenden steht x daher wieder entweder für den Zertifikatepreis oder für einen Steuersatz, d.h. $x = \tau = \sigma$. Der Regulator minimiert die sozialen Kosten

$$\min_x \{n_I C_I(e_I(x)) + (n - n_I) C_0(e_0(x)) + D(n_I e_I(x) + (n - n_I) e_0(x))\} \quad ,$$

wobei die Firmen letztlich ihre Grenzkosten gleich dem Preis für Emissionen x setzen, d.h. $-C'_I(e_I) = -C'_0(e_0) = x$. Das aggregierte Emissionsniveau ist dann gegeben durch $E = n_I e_I(x) + (n - n_I) e_0(x)$. Die Bedingung erster Ordnung lautet daher

$$-C'_I(e_I) = -C'_0(e_0) = D'(E) \quad .$$

Wie erwartet, müssen die Grenzvermeidungskosten also dem aggregierten Grenzscha-den entsprechen. Man erhält somit folgendes Resultat

Proposition 4.7 (Feess [1998]) *Es sei angenommen, daß die Industrie entweder durch Steuern oder durch Subventionen oder durch Zertifikate reguliert ist. Darüber hinaus hat sich der Regulator verpflichtet, die Höhe des Instrumentes optimal an den Technologiewechsel anzupassen. In diesem Fall existiert für alle Marktinstrumente ein eindeutiges teilspielperfektes Gleichgewicht, das zu der sozial optimalen Allokation führt.*

Ein formaler Beweis findet sich bei FEESS [1998]. Die Intuition wird am Beispiel einer Steuer gezeigt. Hierzu entsinne man sich, daß der Regulator die Höhe des Steuersatzes optimalerweise so an die Übernahme der neuen Technologie anpassen wird, daß die Grenzvermeidungskosten dem Grenzscha-den entsprechen, d.h. $\tau(n_I) = D'(E(\tau))$. Nun sind die aggregierten Grenzvermeidungskosten um so niedriger, je mehr Firmen die neue Technologie übernommen haben.³³ Da der soziale Schaden laut Annahme konvex ist, wird der Regulator daher den Steuersatz $\tau(n_I)$ um so niedriger setzen, je mehr Firmen investiert haben. Darüber hinaus sei daran erinnert, daß der sozial optimale Grenzscha-den mit $MD^*(F)$ bezeichnet ist und im sozialen Optimum für $F \in [\underline{F}, \bar{F}]$ laut Gleichung (A.4) im Anhang $C_I(e_I) - C_0(e_0) + (e_I - e_0)MD^*(F) + F = 0$ gilt. Indem man $\tau(F) = MD^*(F)$ einsetzt, ergibt sich Gleichung (3.3.4). Der sozial optimale Grenzscha-den entspricht für $F \in [\underline{F}, \bar{F}]$ also genau dem Steuersatz, für den beide Typen von Firmen gleichzeitig auf dem Markt sein können, d.h. $MD^*(F) = \tilde{\tau}(F)$. Nun sei unterstellt, daß weniger als sozial optimal viele Firmen die neue Technologie übernommen haben. Dann wird der Regulator den Steuersatz höher setzen als den sozial optimalen Grenzscha-den. Damit ist die Kostenersparnis der neuen Technologie aber positiv. Die Firmen die die neue Technologie nicht übernommen haben, haben einen Anreiz zu investieren. Die Entscheidung der Firmen kann also keine gleichgewichtige gewesen sein. Schließlich sei angenommen, daß mehr als sozial optimal viele Firmen die neue Technologie übernommen haben. Dann wird der Regulator den Steuersatz niedriger als den sozial optimalen Grenzscha-den setzen. Damit ist die Kostenersparnis der neuen Technologie aber negativ. Die Firmen, die die neue Technologie übernommen haben, bereuen ihre Entscheidung. Wiederum kann dies keine gleichgewichtige Handlung gewesen sein.

4.2.2 Standards

Schließlich gehe man davon aus, daß die Industrie mittels eines *Standards* reguliert ist. Wiederum verpflichtet sich der Regulator, die Höhe des Standards optimal anzupassen, nachdem die Firmen investiert haben. Der Regulator wird also die sozialen Kosten

$$\min_s \{n_I C_I(s) + (n - n_I)C_0(s) + D(ns)\} \quad (4.2.1)$$

³³FEESS unterstellt dabei ebenfalls das viele-Firmen-Argument, d.h. die Investition einer *einzelnen* Firma hat keinen Einfluß auf die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes.

minimieren. Die Bedingung erster Ordnung lautet

$$-\frac{1}{n} [n_I C'_I(s) + (n - n_I) C'_0(s)] = D'(ns) \quad . \quad (4.2.2)$$

Der Regulator setzt den Standard also so, daß die durchschnittlichen Grenzkosten dem Grenzschaten entsprechen.

Zunächst sei der Fall $n_I = n$ betrachtet. Dann folgt aus Gleichung (4.2.2) unmittelbar $-C'_I(s) = D'(ns)$. Insbesondere gilt also $s = \underline{e}^*$. Nun definiere man diejenigen Fixkosten, für die die Firmen bei einem Standard $s = \underline{e}^*$ gerade indifferent zwischen den beiden Technologien sind:

$$\tilde{F} = C_0(\underline{e}^*) - C_I(\underline{e}^*) \quad .$$

Schließlich unterstelle man $n_I = 0$. Dann folgt aus Gleichung (4.2.2) unmittelbar $-C'_0(s) = D'(ns)$. Insbesondere gilt also $s = \bar{e}^*$. Es sei daran erinnert, daß die Fixkosten, für die die Firmen bei einem Standard $s = \bar{e}^*$ indifferent sind, mit $\hat{\hat{F}}$ bezeichnet werden (vergleiche Abbildung 4.3). Man erhält folgendes Ergebnis:

Proposition 4.8 (Standards) *Es sei angenommen, daß der Regulator sich verpflichtet, die Höhe des Standards optimal an den Technologiewechsel anzupassen. Dann existieren Fixkosten $\tilde{F} > \hat{\hat{F}}$, so daß*

- i.) für $F \leq \hat{\hat{F}}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Der Standard entspricht $s = \underline{e}^*$.
- ii.) für $F \geq \tilde{F}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt. Der Standard entspricht $s = \bar{e}^*$.
- iii.) für jedes $F \in (\hat{\hat{F}}, \tilde{F})$ existieren drei Gleichgewichte:
 - a.) alle Firmen investieren und der Standard entspricht $s = \underline{e}^*$,
 - b.) die neue Technologie wird von $n_I(F) = n \frac{D'(ns) + C'_0(s)}{C'_0(s) - C'_I(s)}$ vielen Firmen übernommen und der Standard entspricht $\underline{e}^* < s(n_I) < \bar{e}^*$,
 - c.) keine Firma investiert und der Standard entspricht $s = \bar{e}^*$.

Der Beweis findet sich im Anhang. Auf der einen Seite ist klar, daß für hinreichend niedrige Fixkosten alle Firmen investieren werden. Auf der anderen Seite wird keine

Firma investieren, falls die Fixkosten hinreichend hoch sind. Zuletzt sei unterstellt, daß die Fixkosten im Intervall $(\widehat{F}, \widetilde{F})$ liegen. Dann existiert kein eindeutiges, sondern für jedes F drei mögliche Gleichgewichte. Dabei sind sowohl vollständige als auch keine Übernahme der neuen Technologie mögliche Gleichgewichte. Darüber hinaus existiert jedoch auch ein Gleichgewicht mit partieller Übernahme der neuen Technologie.

Die Existenz mehrerer Gleichgewichte bei Standards mag vielleicht überraschen. Zunächst soll das Gleichgewicht mit teilweiser Übernahme der neuen Technologie (vgl. Fall *iii.b.* in Proposition 4.8) betrachtet werden. Es sei daran erinnert, daß in diesem Gleichgewicht einerseits die Kostendifferenz zwischen der alten und der neuen Technologie der Höhe der Fixkosten, andererseits die durchschnittlichen Grenzvermeidungskosten dem Grenzscha-den entsprechen. Man kann leicht zeigen, daß dieses Gleichgewicht nicht robust³⁴ ist. Hierzu nehme man an, daß, anstatt $n_I(F)$, $n_I(F) + 1$ viele Firmen die neue Technologie übernommen haben. D.h. eine Firma ist versehentlich von der gleichgewichtigen Strategie abgewichen. Der Regulator setzt dann den Standard strenger als $s(n_I(F))$. Damit ist aber auch die Kostenersparnis größer als die Höhe der Fixkosten. Folglich würden nun auch noch diejenigen Firmen die neue Technologie übernehmen wollen, die dies bisher nicht getan haben. Mit der gleichen Argumentation kann man zeigen, daß im Fall, daß $n_I(F) - 1$ viele Firmen – anstatt der gleichgewichtigen Zahl $n_I(F)$ – die neue Technologie übernommen haben, diese ihre Investition bereuen. Betrachtet man die Vermeidungskosten der Firmen bezüglich der drei möglichen Gleichgewichte, dann fallen diese am niedrigsten aus, wenn keine Firma die neue Technologie übernimmt, und am höchsten, wenn alle Firmen investiert haben. Daher haben die Firmen ein gemeinsames Interesse, daß keine Firma investiert. Sind innerhalb der Industrie Absprachen möglich, dann werden die Firmen sich einigen, daß keine Firma investiert. Es genügt aber auch schon, daß die Firmen das Investitionsverhalten der jeweils anderen Firmen beobachten können. Auch dann wird offensichtlich keine Firma investieren. Denn zunächst ist es günstiger für jede Firma, abzuwarten, ob die anderen Firmen investieren. Übernehmen diese die neue Technologie nicht, dann wird sie es auch nicht tun. Da dies für alle Firmen gleichermaßen gilt, wird es zu keiner Investition kommen. Daher erscheint es gerechtfertigt anzunehmen, daß für $F \in (\widehat{F}, \widetilde{F})$ das Gleichgewicht *iii.b* gespielt wird (d.h. keine Firma übernimmt die neue Technologie).

Nebenbei sei darauf aufmerksam gemacht, daß bei Standards unter Umständen mehr

³⁴Bei Gleichgewicht *iii.b*) handelt es sich um kein „trembling-hand-perfektes“ Gleichgewicht im Sinne von SELTEN [1975].

Firmen die neue Technologie übernehmen als bei Steuern bzw. Zertifikaten. Hierzu unterstelle man, daß $\widehat{F} > \underline{F}$ gilt. Während in diesem Fall für Fixkosten $F < \widehat{F}$ bei Standards alle Firmen investieren werden, kommt es bei Steuern und Zertifikaten für $F \in (\underline{F}, \widehat{F})$ nur zu teilweiser Übernahme der neuen Technologie. Dies steht im Gegensatz zu FEES [1998]. Allerdings übernehmen bei Standards für Fixkosten $F \in (\underline{F}, \widehat{F})$ dann sogar *zu viele* Firmen die neue Technologie.

4.3 Asymmetrische Firmen

In diesem Abschnitt soll die bisherige Analyse von symmetrischen auf asymmetrische Firmen verallgemeinert werden. Der Fall einer heterogenen Industrie wird bereits in JUNG ET AL. [1996] untersucht. Die Autoren erweitern und bestätigen im wesentlichen die Analyse von MILLIMAN UND PRINCE [1989]. Dabei setzen auch sie wiederum die vollständige Diffusion einer neuen Technologie voraus und ziehen durch einen Vergleich der industrieweiten Kostenersparnis Rückschlüsse auf die Investitionsanreize von umweltpolitischen Instrumenten.

Daher stellt sich die Frage, ob sich die im Widerspruch zu MILLIMAN UND PRINCE [1989] stehenden Resultate aus den Abschnitten 3 - 4.2 auch im Fall einer heterogenen Industrie aufrecht erhalten lassen. Hierzu betrachte man eine aus $i = 1, \dots, n$ asymmetrischen Firmen bestehende Industrie. Wie bereits in Kapitel 3 sei unterstellt, daß die i -te Firma zu Beginn Vermeidungskosten in Höhe von $C_i^0(e_i^0)$ hat. Sie kann jedoch eine umweltfreundlichere Technologie mit geringeren variablen Kosten $C_i^I(e) < C_i^0(e)$ und geringeren Grenzvermeidungskosten $-C_i^I(e) < -C_i^0(e)$ zu fixen Kosten F_i übernehmen. Die Firmen unterscheiden sich dabei sowohl in den fixen als auch in den variablen Kosten, da diese im allgemeinen von Größe und Art der Vermeidung der einzelnen Firma abhängen.

Um im Modellrahmen dieser Arbeit eindeutige Aussagen treffen zu können, muß eine kritische Annahme gemacht werden: Im folgenden wird in zweierlei Hinsicht vollkommener Wettbewerb unterstellt. Zum einen verhalten sich die Firmen als Preisnehmer auf dem Zertifikatemarkt, zum anderen können sie die Höhe der aggregierten Emissionen mit ihrer (individuellen) Investitionsentscheidung nicht meßbar beeinflussen. Genaugenommen ist eine solche Annahme nur mit einem kontinuierlichen Modell vereinbar. REQUATE UND UNOLD [1999] untersuchen daher eine Industrie, die aus einem

Kontinuum an Firmen besteht.

4.3.1 Steuern und Zertifikate

Zunächst gehe man – analog zu Abschnitt 3.3 – davon aus, daß die Industrie entweder durch Steuern oder durch Zertifikate reguliert ist. Der Steuersatz bzw. Marktpreis für Zertifikate sei wiederum mit x bezeichnet. Anstelle der Gleichungen (3.3.1) - (3.3.2) erhält man jetzt für jede Firma $i = 1, \dots, n$:

$$-C_i^0'(e_i^0) = x \quad , \quad (4.3.1)$$

sofern sie die alte Technologie beibehält und

$$-C_i^I'(e_i^I) = x \quad , \quad (4.3.2)$$

sofern sie die neue Technologie übernimmt. Daraus ergeben sich eindeutige Emissionen $e_i^I = e_i^I(x)$ und $e_i^0 = e_i^0(x)$. Zu gegebenem x besteht für Firma i eine Kostendifferenz zwischen den beiden Technologietypen von

$$\Delta C_i(x) = [C_i^0(e_i^0) + xe_i^0] - [C_i^I(e_i^I) + xe_i^I + F_i] \quad .$$

Wie schon in Kapitel 3 bezeichnet $\Delta C_i(\tau)$ – mit leichtem Mißbrauch der Notation – im folgenden die Kostendifferenz bei einer Regulierung mittels Steuern mit einem Steuersatz τ und $\Delta C_i(\sigma)$ bei einer Regulierung mittels Zertifikaten mit einem korrespondierenden Marktpreis für Zertifikate σ .

Zunächst sei unterstellt, daß der Regulator eine *Steuer* erhebt. Eine Firma hat genau dann kein Interesse daran, in die neue Technologie zu investieren, wenn $\Delta C_i(\tau) < 0$ gilt. Gilt andererseits $\Delta C_i(\tau) > 0$, dann haben die Firmen einen Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen. Mit Hilfe des Umhüllenden Satzes, d.h. durch Ausnutzung von Gleichungen (4.3.1) und (4.3.2), erhält man

$$\frac{d}{d\tau} \Delta C_i(\tau) = e_i^0(\tau) - e_i^I(\tau) > 0 \quad .$$

Da sowohl $\Delta C_i(0) < 0$ als auch, für ein hinreichend großes τ , $\Delta C_i(\tau) > 0$ gilt, muß wegen des Zwischenwertsatzes ein $\tilde{\tau}_i$ existieren mit $\Delta C_i(\tilde{\tau}_i) = 0$. Anstelle von Lemma 3.1 erhält man nun:

Lemma 4.1 *Es existiert genau ein Steuersatz $\tilde{\tau}_i$, so daß Firma i zwischen dem Einsatz beider Technologien indifferent ist.*

Nun betrachte man den Fall, daß die Industrie durch *Zertifikate* reguliert ist. Es bezeichne δ_i eine Indikatorfunktion, die die Werte 0 oder 1 annimmt. Für $\delta_i = 0$ bleibt Firma i bei der alten Technologie, für $\delta_i = 1$ setzt sie die neue Technologie ein. Eine Markträumung des Zertifikatemarktes erfordert somit

$$L = \sum_{i=1}^n e_i^0(\sigma) + \sum_{i=1}^n \delta_i (e_i^I(\sigma) - e_i^0(\sigma)) \quad . \quad (4.3.3)$$

Der Zertifikatpreis im Gleichgewicht sei mit $\sigma(\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n})$ bezeichnet. Im Gegensatz zu Abschnitt 3.3 wird der Marktpreis für Zertifikate nicht nur davon bestimmt, wieviele, sondern auch welche Firmen in die neue Technologie investiert haben. Die Gleichungen (4.3.1), (4.3.2) und (4.3.3) besitzen im allgemeinen keine eindeutige Lösung in σ und $\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n}$. Vielmehr existieren verschiedene Kombinationen aus Teilmengen investierender Firmen und zugehörigen Zertifikatpreisen, die die Gleichungen (4.3.1), (4.3.2) und (4.3.3) erfüllen. In einigen dieser Zertifikatemarktgleichgewichte sind Investoren jedoch schlechter gestellt als wenn sie nicht investiert hätten. Es sollen nur die Lösungen $\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n}$ betrachtet werden, welche ein Nash-Gleichgewicht in der Investitionsentscheidung der Firmen darstellen.

Man betrachte die Investitionsentscheidung der j -ten Firma. Hierzu definiere man

$$\{\delta_i\}_{-j} = \{ \{ \delta_i \}_{i=1,\dots,j-1,j+1,\dots,n}, \delta_j = 0 \} \quad ,$$

d.h. Firma j hat die neue Technologie nicht übernommen, und

$$\{\delta_i\}_j = \{ \{ \delta_i \}_{i=1,\dots,j-1,j+1,\dots,n}, \delta_j = 1 \} \quad ,$$

d.h. Firma j hat die neue Technologie übernommen. In Analogie bezeichne $\sigma_{-j} = \sigma(\{\delta_i\}_{-j})$ den Marktpreis für Zertifikate, wenn Firma j die neue Technologie nicht übernommen hat und $\sigma_j = \sigma(\{\delta_i\}_j)$ den Marktpreis für Zertifikate, wenn Firma j die neue Technologie übernommen hat. Sowohl σ_{-j} als auch σ_j hängen von der Investitionsentscheidung der anderen Firmen ab. Für beliebiges, gegebenes $\{\delta_i\}_{i=1,\dots,j-1,j+1,\dots,n}$ gilt jedoch $\sigma_j < \sigma_{-j}$. Firma j wird bei gegebenem $\{\delta_i\}_{i=1,\dots,j-1,j+1,\dots,n}$ zum einen genau dann nicht in die neue Technologie investieren wollen, wenn gilt

$$C_j^0(e_j^0(\sigma_{-j})) + \sigma_{-j} e_j^0(\sigma_{-j}) - C_j^I(e_j^I(\sigma_j)) - \sigma_j e_j^I(\sigma_j) - F_j \leq 0 \quad . \quad (4.3.4)$$

Zum anderen bereit sie es nicht, investiert zu haben, wenn gilt

$$C_j^0(e_j^0(\sigma_{-j})) + \sigma_{-j} e_j^0(\sigma_{-j}) - C_j^I(e_j^I(\sigma_j)) - \sigma_j e_j^I(\sigma_j) - F_j \geq 0 \quad . \quad (4.3.5)$$

Ein *Investitionsleichgewicht* ist dadurch charakterisiert, daß Gleichung (4.3.4) für alle Firmen, die die neue Technologie nicht übernommen haben und Gleichung (4.3.5) für alle Firmen, die die neue Technologie übernommen haben, erfüllt sein muß. Es bezeichne $\tilde{\sigma}_j$ den Zertifikatepreis, zu dem es Firma j gerade nicht bereut, die neue Technologie übernommen zu haben, d.h.

$$\tilde{\sigma}_j := \frac{C_j^0(e_j^0(\sigma_{-j})) + \sigma_{-j}e_j^0(\sigma_{-j}) - C_j^I(e_j^I(\tilde{\sigma}_j)) - F_j}{e_j^I(\tilde{\sigma}_j)} . \quad (4.3.6)$$

Da $\sigma_{-j} = \sigma(\{\delta_i\}_{-j})$ dadurch bestimmt wird, wie sich die anderen Firmen entscheiden haben, wirkt sich das Investitionsverhalten der anderen Firmen auch auf den „Schwellenpreis“ für Emissionen $\tilde{\sigma}_j(\{\delta_i\}_j)$ aus. Da $\tilde{\sigma}_j$ offensichtlich nicht eindeutig bestimmt ist, existiert im allgemeinen auch kein eindeutiges Investitionsleichgewicht. Man kann jedoch zeigen, daß zu jeder Menge an ausgegebenen Zertifikaten mindestens ein Nash-Gleichgewicht in der Investitionsentscheidung der Firmen existiert. Hierzu sei unterstellt, daß alle Firmen zunächst die herkömmliche Technologie betreiben. Es bezeichne $\tilde{\sigma}_1$ den niedrigsten Preis für Emissionen, bei dem es genau eine Firma nicht bereut, die neue Technologie übernommen zu haben, wenn alle anderen $n - 1$ Firmen die alte Technologie einsetzen, d.h.

$$\tilde{\sigma}_1 := \min \left\{ \sigma_j \mid \sigma_j = \frac{C_j^0(e_j^0) + \sigma(\{\delta_i = 0\}_{i=1,\dots,n})e_j^0 - C_j^I(e_j^I) - F_j}{e_j^I} \right\} ,$$

wobei $e_j^I = e_j^I(\sigma_j)$ und $e_j^0 = e_j^0(\sigma(\{\delta_i = 0\}_{i=1,\dots,n}))$ gilt. Die zu $\tilde{\sigma}_1$ korrespondierende Firma wird im folgenden als Firma $i = 1$ bezeichnet. Weiterhin läßt sich auf analoge Weise ein $\tilde{\sigma}_2$ definieren:

$$\tilde{\sigma}_2 := \min \left\{ \sigma_j \mid \sigma_j = \frac{C_j^0(e_j^0) + \sigma(\{\delta_i = 0\}_{i=2,\dots,n}, \delta_1 = 1)e_j^0 - C_j^I(e_j^I) - F_j}{e_j^I} \right\} ,$$

wobei nun

$$\begin{aligned} e_j^I &= e_j^I(\sigma(\{\delta_i = 0\}_{i=2,\dots,j-1,j+1,\dots,n}, \{\delta_i\}_{1,j} = 1)) \quad \text{bzw.} \\ e_j^0 &= e_j^0(\sigma(\{\delta_i = 0\}_{i=2,\dots,n}, \delta_1 = 1)) \end{aligned}$$

gilt. Die zu $\tilde{\sigma}_2$ gehörende Firma wird im folgenden als Firma 2 bezeichnet. Sukzessive lassen sich auf diese Weise für alle Firmen „Schwellenpreise“ $\tilde{\sigma}_i$ bestimmen und die Firmen anhand dieser Schwellenpreise anordnen. Für Firma n gilt schließlich

$$\tilde{\sigma}_n := \frac{C_n^0(e_n^0) + \sigma(\{\delta_i = 1\}_{i=1,\dots,n-1}, \delta_n = 0)e_n^0 - C_n^I(e_n^I) - F_n}{e_n^I(\sigma(\{\delta_i = 1\}_{i=1,\dots,n}))} .$$

Nun sei unterstellt, daß die Firmen nacheinander in der Reihenfolge der „Schwellenpreise“ ziehen. In diesem Fall führen Marktkräfte zu einem Nash-Gleichgewicht in der Investitionsentscheidung der Firmen. Dieses Gleichgewicht muß im allgemeinen jedoch nicht das einzig mögliche Nash-Gleichgewicht sein.³⁵

Wie schon in Kapitel 3 sei nun angenommen, daß die Firmen klein sind, so daß die Übernahme der neuen Technologie durch eine einzelne Firma (fast) keinen Einfluß auf die Höhe des Zertifikatepreises hat.³⁶ Dann gilt $\sigma_{-j} \approx \sigma_j$, und Gleichung (4.3.6) läßt sich näherungsweise schreiben als

$$\tilde{\sigma}_j = \frac{C_j^0(e_j^0) - C_j^I(e_j^I) - F_j}{e_j^I(\tilde{\sigma}_j) - e_j^0(\tilde{\sigma}_j)} .$$

Damit kann Lemma 4.1 unmittelbar auf Zertifikate übertragen werden. Dabei genügt es, $\tilde{\tau}_i$ durch $\tilde{\sigma}_i$ zu ersetzen.

Nun bezeichne $\tilde{x}_i := \tilde{\tau}_i = \tilde{\sigma}_i$ den „Schwellenpreis“ für Emissionen, bei dem Firma i gerade indifferent zwischen den beiden Technologien ist. Man beachte, daß ein Vergleich der Investitionsanreize in Abhängigkeit der Fixkosten – wie im symmetrischen Fall – nicht möglich ist. Da sich die Firmen sowohl in den Fixkosten als auch in den variablen Kosten beider Technologien unterscheiden, kann es sein, daß eine Firma mit niedrigeren Fixkosten ein höheres \tilde{x}_i hat als eine andere Firma mit entsprechend höheren Fixkosten (siehe hierzu auch Abbildung 4.4). Im folgenden werden die Firmen daher ausschließlich anhand ihres „Schwellenpreises“ \tilde{x}_i parametrisiert und die Investitionsanreize bezüglich der Verteilung der \tilde{x}_i abgeleitet.

Die Firmen können anhand ihrer \tilde{x}_i in dem Sinn angeordnet werden, daß Firma 1

³⁵Zum einen stellt der hier vorgestellte Mechanismus nicht die einzige Möglichkeit dar, den Firmen „Schwellenpreise“ zuzuordnen. Zum anderen werden die Firmen im allgemeinen nicht in der Reihenfolge der $\tilde{\sigma}_i$ ziehen.

³⁶Es wurde bereits erwähnt, daß diese Annahme strenggenommen nur mit einem kontinuierlichen Modell vereinbar ist. REQUATE UND UNOLD [1999] betrachten ein Kontinuum von Firmen, deren Kostenfunktionen C_i^0 bzw. C_i^I in i stetig sind.

In dem hier betrachteten Modell soll jedoch der Fall betrachtet werden, daß die Firmen sich beliebig in den Vermeidungskosten und Fixkosten unterscheiden können. Dabei gibt es eine Einschränkung, nämlich daß eine individuelle Firma die aggregierte Nachfrage nach Zertifikaten durch ihre Investitionsentscheidung nicht beeinflussen kann. Einen solchen Fall in einem kontinuierlichen Modell abzubilden, würde einen sehr viel größeren mathematischen Aufwand benötigen, jedoch keine neuen Aussagen erbringen (siehe auch REQUATE UND UNOLD [1999]).

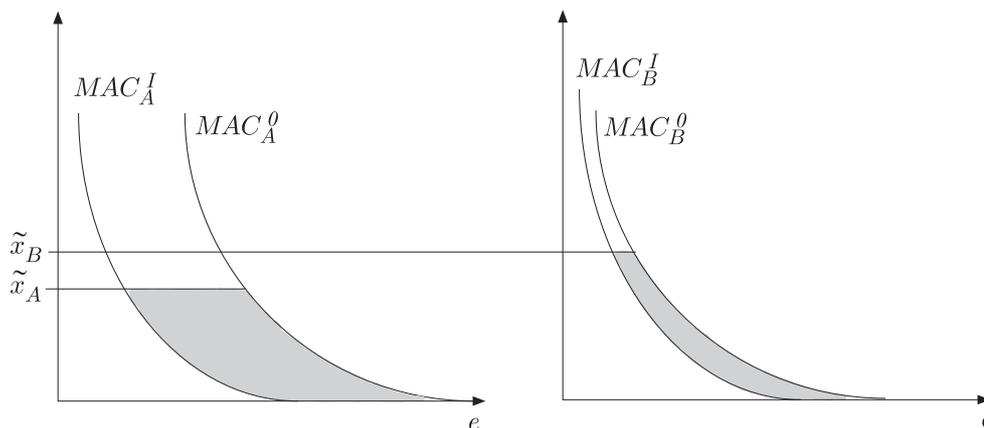


Abbildung 4.4: Dargestellt sind die Grenzvermeidungskosten zweier Firmen A und B. Im Unterschied zum Fall symmetrischer Firmen läßt sich das Investitionsverhalten nicht allein anhand der Fixkosten parameterisieren. Die grauen Flächen sollen dabei der Höhe der Fixkosten entsprechen. Obwohl Firma B offensichtlich niedrigere Fixkosten als Firma A aufbringen müßte, wird sie erst bei einem höheren Steuersatz bzw. Zertifikatspreis $x_B > x_A$ investieren.

beim niedrigsten Preis für Emissionen investiert und Firma n dementsprechend beim höchsten,³⁷ d.h.

$$\tilde{x}_1 < \dots < \tilde{x}_i < \dots < \tilde{x}_n \quad .$$

Gilt für den Preis für Emissionen $x \leq \tilde{x}_1$, dann wird keine Firma die neue Technologie übernehmen.³⁸ Wiederum bezeichnen in diesem Fall $AMAC_0(E)$ die aggregierten Grenzvermeidungskosten. Für $x = \tilde{x}_1$ sind die aggregierten Emissionen gegeben durch

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n e_i^0(\tilde{x}_1) \quad .$$

Gilt für den Preis für Emissionen hingegen $x > \tilde{x}_n$, dann werden alle Firmen die neue Technologie übernehmen. In diesem Fall seien die aggregierten Grenzvermeidungskosten mit $AMAC_I(E)$ bezeichnet. Für $x = \tilde{x}_n$ sind die aggregierten Emissionen gegeben

³⁷Strenggenommen müßte man auch Gleichheit der „Schwellenpreise“ verschiedener Firmen zu lassen, d.h. $\tilde{x}_i \leq \tilde{x}_{i+1}$ etc. Der Fall identischer „Schwellenpreise“ entspricht jedoch der Analyse symmetrischer Firmen und wird deshalb im folgenden nicht berücksichtigt.

³⁸Auch in diesem Abschnitt wird unterstellt, daß bei Indifferenz zwischen den beiden Technologietypen, die Firma bei der herkömmlichen Technologie verbleibt.

durch

$$\underline{E} = \sum_{i=1}^n e_i^I(\tilde{x}_n) \quad .$$

Die Breite des Intervalls $[\tilde{x}_1, \tilde{x}_n]$ läßt sich als ein Maß der Inhomogenität der Industrie interpretieren. Je kleiner das Intervall, desto homogener ist die Industrie bezüglich ihrer Vermeidungskosten. Im Extremfall $\tilde{x}_1 = \tilde{x}_n$, d.h. der „Schwellenpreis“ ist für alle Firmen derselbe, sind die Firmen symmetrisch bezüglich ihres Investitionsverhaltens.³⁹ Dies entspricht dem Modell aus Abschnitt 3.3.

Nun soll noch einmal auf eine Regulierung mittels *Zertifikate* zurückgekommen werden. Ein Gleichgewicht auf dem Zertifikatemarkt sei folgendermaßen definiert:

Definition 1 Die Menge $(\sigma, \{\delta_i(\sigma)\}_{i=1, \dots, n})$ sei ein Investitionsgleichgewicht auf dem Zertifikatemarkt, falls für alle $i = 1, \dots, n$ gilt

$$\begin{aligned} \delta_i(\sigma) &= 1 \quad \text{genau dann, wenn} \quad \Delta C_i(\sigma) > 0 \quad , \\ \delta_i(\sigma) &= 0 \quad \text{genau dann, wenn} \quad \Delta C_i(\sigma) \leq 0 \quad . \end{aligned}$$

Mit Hilfe des bisher gesagten ergibt sich folgender Hilfssatz:

Lemma 4.2 Zu jeder Anzahl von Zertifikaten $L > 0$ existiert ein eindeutiges Investitionsgleichgewicht, das Definition 1 entspricht.

- i.) Für $L < \underline{E}$ übernehmen alle Firmen die neue Technologie,
- ii.) für $L \geq \overline{E}$ übernimmt keine Firma die neue Technologie.
- iii.) Für $L \in [\underline{E}, \overline{E}]$ existiert ein $i_0 \in \{1, \dots, n\}$, so daß alle Firmen mit $i < i_0$ in die neue Technologie investieren und alle Firmen mit $i \geq i_0$ bei der herkömmlichen Technologie verbleiben.

Der Beweis findet sich im Anhang.

³⁹Die Firmen müssen jedoch nicht identisch sein, wie in Kapitel 3 unterstellt wird. Zwei Firmen mit demselben „Schwellenpreis“ können sich vielmehr in den Fixkosten F^i unterscheiden. In diesem Fall müssen aber auch die Vermeidungskosten bezüglich der herkömmlichen bzw. neuen Technologie verschieden sein.

4.3.2 Kostenlos ausgegebene Zertifikate

Man kann leicht zeigen, daß die Äquivalenz von versteigerten und kostenlos ausgegebenen Zertifikaten auch im Fall einer heterogenen Industrie gilt. Bei einer kostenlosen Ausgabe von Zertifikaten erhalten die Firmen eine Anfangsausstattung \hat{e}_i , wobei gilt

$$L = \sum_{i=1}^n \hat{e}_i \quad .$$

Die Kostendifferenz zwischen den beiden Technologien ist gegeben durch

$$\Delta C_i(\sigma) = [C_i^0(e_i^0) + \sigma(e_i^0 - \hat{e}_i)] - [C_i^I(e_i^I) + \sigma(e_i^I - \hat{e}_i) + F_i] \quad ,$$

Offensichtlich kürzt sich $\sigma \cdot \hat{e}_i$ wieder heraus. Proposition 3.2 hält daher auch der Verallgemeinerung auf asymmetrische Firmen stand:

Lemma 4.3 *Auktionierte und kostenlos ausgegebene Zertifikate führen zu demselben Investitionsgleichgewicht.*

Die Anfangsausstattung beeinträchtigt die Kostenverteilung, nicht jedoch – wie von JUNG ET AL. [1996] behauptet – die Anreize bzw. das Investitionsverhalten der einzelnen Firmen. Dabei spielt es insbesondere keine Rolle, wie die Zertifikate auf die einzelnen Firmen verteilt werden.⁴⁰ Letzteres steht im Einklang mit MONTGOMERY [1972]. Ein analoges Resultat erhält man auch bei einem Vergleich von Subventionen und Steuern.

4.3.3 Emissionsstandards

Es ist bekannt, daß marktorientierte umweltpolitische Instrumente ordnungsrechtlichen Instrumenten wegen ihrer statischen Effizienz überlegen sind. Sind die Firmen asymmetrisch – wie hier angenommen – dann induziert ein einheitlicher Emissionsstandard nicht dieselben Grenzvermeidungskosten für alle Firmen. Letzteres ist jedoch eine notwendige Bedingung für eine effiziente Allokation.

⁴⁰Dies gilt natürlich nur, solange der Zertifikatemarkt kompetitiv bleibt. HAHN [1984] zeigt, daß es im Falle eines nicht-kompetitiven Zertifikatemarktes nur zu einer Lösung zu geringsten Kosten kommt, falls die Anfangsverteilung an Zertifikaten der Verteilung im Gleichgewicht entspricht. STAVINS [1995] zeigt, daß bei Transaktionskosten die Anfangsverteilung ebenfalls Einfluß auf die Effizienz hat. MONTERO [1997] zeigt schließlich, daß dies auch bei unstetigen Grenzvermeidungskosten und konstanten Transaktionskosten der Fall ist.

Man betrachte einen einheitlichen Emissionsstandard s . Die Kostendifferenz zwischen den beiden Technologien ist dann gegeben durch

$$\Delta C_i(s) = C_i^0(s) - [C_i^I(s) + F_i] \quad .$$

Es ergibt sich unmittelbar folgendes Resultat:

Lemma 4.4 *Für alle Firmen $i = 1, \dots, n$ existiert ein eindeutiger Standard \tilde{s}_i , so daß Firma i indifferent zwischen der herkömmlichen und der neuen Technologie ist. Für $s < \tilde{s}_i$ wird Firma i bei der herkömmlichen Technologie bleiben, für $s > \tilde{s}_i$ wird sie die neue Technologie übernehmen.*

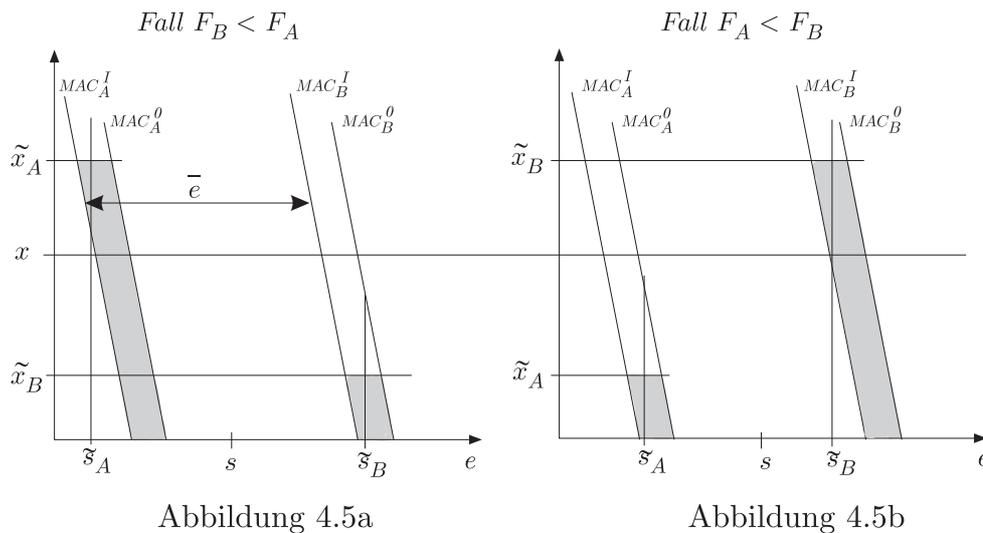
Die Firmen können daher – ähnlich wie bei Steuern und Zertifikaten – anhand ihrer „Emissionsschwelle“ \tilde{s}_i gereiht werden. Firma 1 hat den niedrigsten, Firma n den höchsten Wert⁴¹

$$\tilde{s}_1 < \dots < \tilde{s}_i < \dots < \tilde{s}_n \quad .$$

Diese Anordnung beruht jedoch auf Standards und damit auf den absoluten Emissionen der Firmen. Dies kann nicht verglichen werden mit der weiter oben eingeführten Anordnung der Firmen bei Steuern oder bei Zertifikaten, die auf dem Preis für Emissionen und damit auf dem Konzept der Grenzkosten beruht. Um dies zu verdeutlichen, sollen im folgenden zwei der n Firmen näher betrachtet werden. Hierzu sei unterstellt, daß die zwei Firmen A und B ähnliche Grenzvermeidungskosten haben, mit der Ausnahme, daß Firma B auf einem höheren absoluten Niveau als Firma A vermeidet. Es gilt also $-C_A^0'(e) = -C_B^0'(\bar{e} + e)$ und $-C_A^I'(e) = -C_B^I'(\bar{e} + e)$, wobei \bar{e} die Differenz der Emissionsniveaus bei identischen Grenzvermeidungskosten bezeichnet. Zusätzlich unterscheiden die Firmen sich in ihren Fixkosten F_A und F_B (siehe auch Abbildung 4.5a/b).

Nun gehe man davon aus, daß die Industrie mittels *Steuern* oder mittels *Zertifikate* reguliert ist. Dann wird offensichtlich die Firma mit den niedrigeren Fixkosten auch bei einem niedrigeren Steuersatz bzw. Zertifikatepreis einen Anreiz haben, zu investieren. Für $F_A < F_B$ erhält man $\tilde{x}_A < \tilde{x}_B$ (vergleiche Abbildung 4.5b). Ein Vertauschen der Fixkosten zwischen den beiden Firmen entspricht einem Vertauschen der Indizes.

⁴¹Im allgemeinen müßte wiederum auch eine Gleichheit der „Emissionsschwellen“ zugelassen werden (siehe hierzu auch Fußnote 37).



Dargestellt sind die Grenzvermeidungskosten zweier Firmen A und B. Die grau schraffierte Fläche bezeichnet die Fixkosten der jeweiligen Firma.

Im Aggregat bleiben die Vermeidungskosten und Emissionen jedoch unverändert. Nun sei ein einheitlicher *Emissionsstandard* betrachtet. Wiederum betrachte man Abbildung 4.5a/b. Firma B hat offensichtlich einen Anreiz, die neue Technologie zu einem Standard s zu übernehmen, unabhängig davon, ob sie höhere (siehe Abbildung 4.5b) oder niedrigere Fixkosten (siehe Abbildung 4.5a) als Firma A hat. Insbesondere ändert ein Vertauschen der Fixkosten im Beispiel von Abbildung 4.5a/b nicht die Einschätzung der Firmen bezüglich des Standards, zu dem sie indifferent zwischen den beiden Technologien sind. Man beachte jedoch, daß bei Standards das Vertauschen der Fixkosten zwischen den beiden Firmen – im Gegensatz zu Steuern und Zertifikaten – einen Einfluß auf die aggregierten Vermeidungskosten hat.

Verschiedene Allokationen von (Grenz-)Vermeidungskosten, die sich bei Steuern und bei Zertifikaten identisch verhalten, können sich bei Standards also verschieden auswirken. Daher ist es nicht möglich, die dynamischen Anreize von Standards mit denen von Steuern und Zertifikaten zu vergleichen. Vielmehr kann man zeigen, daß Standards höhere oder niedrigere Anreize als pretiale Instrumente bieten können (siehe MONTERO [1998], JUNG ET AL. [1996]). Es sei jedoch daran erinnert, daß Standards bei asymmetrischen Firmen – im Gegensatz zu Marktinstrumenten – im allgemeinen nicht statisch effizient sind.

4.3.4 Aggregiertes Emissionsziel

Im folgenden stelle man sich – analog zu Abschnitt 4.1 – eine Situation vor, in der der Regulator ein aggregiertes Emissionsziel \hat{E} setzt, *bevor* die Firmen in die neue Technologie investieren. Im Fall einer Steuer wird er also $\tau = AMAC_0(\hat{E})$ setzen und bei Zertifikaten $L = \hat{E}$ viele Zertifikate austeilern. Aus Lemmata 4.1 und 4.2 ergeben sich folgende Resultate:

Proposition 4.9 (Steuern) *Es sei angenommen, daß der Regulator ein aggregiertes Emissionsziel \hat{E} mittels eines Standard-Preis-Ansatzes umsetzt, wobei er nur die alte Technologie berücksichtigt. Dann existiert ein Emissionsniveau \underline{E}_t mit $\underline{E}_t < \bar{E}$, so daß*

- i.) für $\hat{E} \geq \bar{E}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt,*
- ii.) für $\hat{E} < \underline{E}_t$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen und die aggregierten Emissionen E kleiner als \hat{E} sind.*
- iii.) Für $\underline{E}_t \in [\underline{E}_t, \bar{E})$ die neue Technologie teilweise übernommen wird und die aggregierten Emissionen E kleiner als \hat{E} sind.*

Der Beweis findet sich im Anhang.

Proposition 4.10 (Zertifikate) *Es sei angenommen, daß der Regulator $L = \hat{E}$ viele Zertifikate ausgibt. Dann existiert ein Emissionsniveau \underline{E}_p mit $\underline{E}_p < \bar{E}$, so daß*

- i.) für $\hat{E} \geq \bar{E}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt,*
- ii.) für $\hat{E} < \underline{E}_p$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen.*
- iii.) Für $\hat{E} \in [\underline{E}_p, \bar{E})$ wird die neue Technologie teilweise übernommen.*

Es gilt $\underline{E}_p < \underline{E}_t$.

Der Beweis findet sich wiederum im Anhang.

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Bei hinreichend hohen und hinreichend niedrigen Emissionszielen ergibt sich kein Unterschied zu den Ergebnissen aus Abschnitt 4.1. Die neue Technologie wird von allen bzw. keiner Firma übernommen.

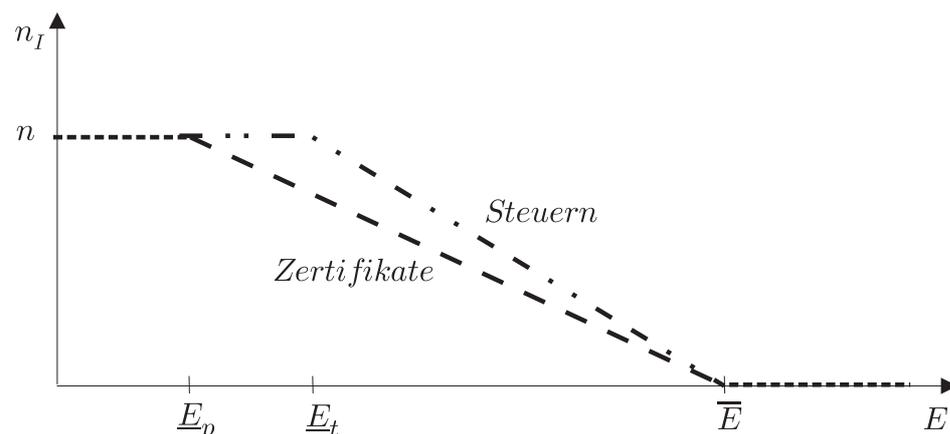


Abbildung 4.6:

Auch bei mittleren Emissionszielen ändert sich insofern nichts, als daß bei Zertifikaten die Anzahl der investierenden Firmen geringer als bei Steuern ist. Grund dafür ist wiederum der durch einen fallenden Zertifikatepreis ausgelöste externe Effekt. Im Gegensatz zu symmetrischen Firmen kommt es jedoch bei asymmetrischen Firmen im Intervall $[\underline{E}_t, \bar{E}]$ auch bei Steuern zu partieller Übernahme der neuen Technologie. Darüber hinaus ist die Allokation bei beliebigem Steuersatz nun – im Gegensatz zum Fall symmetrischer Firmen – eindeutig.⁴² Damit ist aber auch das auf Seite 56 diskutierte Problem einer möglichen Zeitinkonsistenz eines Steuerregimes (KENNEDY UND LAPLANTE [1998]) aufgelöst.

4.3.5 Das soziale Optimum

Es sei wiederum die Funktion des sozialen Schadens aus Kapitel 3 vorausgesetzt. In Abschnitt 3.2 wurde die sozial optimale Allokation in Bezug auf die Höhe der bei Übernahme der neuen Technologie anfallenden Fixkosten betrachtet. Nun unterscheiden sich die Firmen jedoch in ihren Fixkosten. Daher erscheint es interessant, die sozial optimale Allokation bezüglich der Steigung der Schadenfunktion zu untersuchen. Hierzu sei angenommen, daß die soziale Schadenfunktion von einem Schadenparameter s abhängt. Der Schadenparameter ist exogen gegeben und bewertet die Gefährlichkeit des Schadstoffes. Der Grenzschaden steigt in s , d.h. $D_{Es}(E, s) > 0$.

⁴²Die Eindeutigkeit gilt offensichtlich nur, wenn sich die Firmen – wie unterstellt – in ihren „Schwellensteuersätzen“ echt unterscheiden, d.h. $\tau_1 < \dots < \tau_n$.

Ein sozialer Planer würde die sozialen Kosten minimieren, d.h.

$$\min_{\{e_i^0, e_i^I, \delta_i\}_{i=1, \dots, n}} \left\{ \left[\sum_i \delta_i [C_i^I(e_i^I) + F_i] + (1 - \delta_i)C_i^0(e_i^0) \right] + D\left(\sum_i \delta_i e_i^I + (1 - \delta_i)e_i^0, s\right) \right\}.$$

Die Indikatorfunktion δ_i kann wiederum die Werte $\delta_i = 0$ und $\delta_i = 1$ annehmen, je nachdem, ob Firma i die Technologie 0 ($\delta_i = 0$) oder Technologie I ($\delta_i = 1$) einsetzen soll.

Aus der Sicht eines sozialen Planers kann, je nach Höhe des Schadenparameters s , im allgemeinen entweder eine vollständige, eine partielle, oder auch keine Übernahme der neuen Technologie erwünscht sein. Es bezeichne \bar{E}^* die sozial optimalen Emissionen, falls keine Firma die neue Technologie übernehmen sollte und \underline{E}^* die sozial optimalen Emissionen, falls alle Firmen die neue Technologie übernehmen sollten. Man beachte, daß sowohl $\underline{E}^*(s)$ als auch $\bar{E}^*(s)$ von der Höhe des Schadenparameter s abhängen. Zunächst sei unterstellt, daß *keine* Firma die neue Technologie übernehmen sollte. Man definiere daher einen Schadenparameter \underline{s} , so daß gilt

$$D_E(\bar{E}^*(s), s) = AMAC_0(\bar{E}^*(s)) \quad \text{falls } s \leq \underline{s} \quad .$$

Der sozial optimale Grenzscha-den im Fall $s = \underline{s}$ ist dann gegeben durch $\underline{MD}^* := D_E(\bar{E}^*, \underline{s})$. Nun gehe man davon aus, daß *alle* Firmen die neue Technologie übernehmen sollten. Hierzu definiere man einen Schadenparameter \bar{s} , so daß gilt

$$D_E(\underline{E}^*(s), s) = AMAC_I(\underline{E}^*(s)) \quad \text{falls } s \geq \bar{s} \quad .$$

Der sozial optimale Grenzscha-den im Fall $s = \bar{s}$ ist dann gegeben durch $\overline{MD}^* := D_E(\underline{E}^*, \bar{s})$.

Die sozial optimale Allokation kann somit durch folgende Proposition charakterisiert werden:

Proposition 4.11 (Soziales Optimum) *Es existiert ein Intervall an Schadenparametern $[\underline{s}, \bar{s}]$ mit einem zugehörigen Intervall an Grenzscha-den $[\underline{MD}^*, \overline{MD}^*]$, so daß*

- i.) für $s \leq \underline{s}$ keine Firma die neue Technologie übernehmen sollte. Für den optimalen Grenzscha-den gilt $MD^*(s) \leq \underline{MD}^*$.
- ii.) für $s \geq \bar{s}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen sollten. Für den optimalen Grenzscha-den gilt $MD^*(s) \geq \overline{MD}^*$.

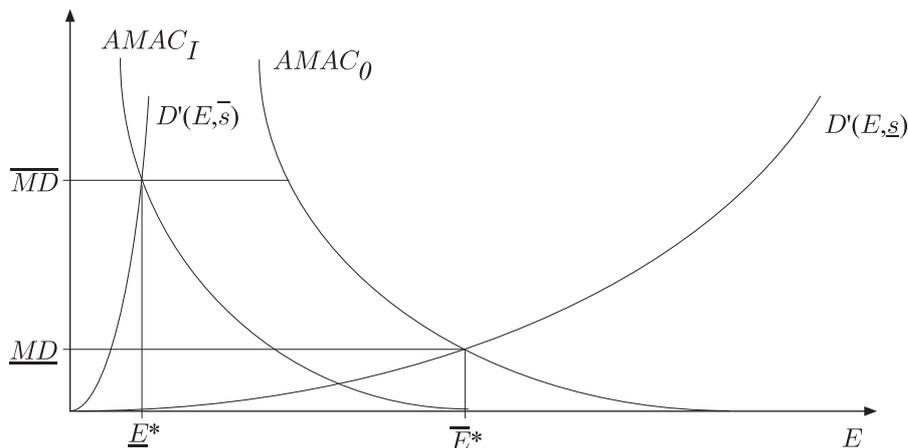


Abbildung 4.7: Die sozial optimale Allokation in Abhängigkeit des Schadenparameters s .

- iii.) für $s \in (\underline{s}, \bar{s})$ gilt bezüglich des optimalen Grenzschadens $\underline{MD}^* < MD^*(s) < \overline{MD}^*$. Alle Firmen mit $\tilde{x}_i < MD^*(s)$ sollten die neue Technologie übernehmen, alle Firmen mit $\tilde{x}_i > MD^*(s)$ sollten die neue Technologie nicht übernehmen. Ob eine Firma mit $\tilde{x}_i = MD^*(s)$ die neue Technologie übernehmen sollte, wird durch die Lösung des Ganzzahligkeitsproblems bestimmt.

Der Beweis findet sich im Anhang. In Abbildung 4.7 ist die sozial optimale Allokation graphisch dargestellt.

Für $s \in (\underline{s}, \bar{s})$ ist eine teilweise Diffusion der neuen Technologie sozial optimal. Es sei daran erinnert, daß die Firmen anhand ihrer „Schwellenpreise“ für Emissionen angeordnet werden können, d.h. $\tilde{x}_1 < \dots < \tilde{x}_n$. Damit läßt sich aus Proposition 4.11 folgern

Folgerung 4.1 Zu jedem $s \in (\underline{s}, \bar{s})$ korrespondiert ein $\hat{i}_0 \in \{1, \dots, n\}$, so daß alle Firmen mit $i < \hat{i}_0$ die neue Technologie übernehmen und alle Firmen mit $i > \hat{i}_0$ die neue Technologie nicht übernehmen sollten. Ob Firma \hat{i}_0 die neue Technologie übernehmen sollte, wird durch die Lösung des Ganzzahligkeitsproblems bestimmt.

4.3.6 Ursprünglich optimales aggregiertes Emissionsziel

Nun sei die Industrie analog zu Abschnitt 4.1 bezüglich der herkömmlichen Technologie optimal reguliert. Man betrachte hierzu auch Abbildung 4.7. Das ursprünglich, d.h.

bezüglich der alten Technologie, optimale Emissionsniveau wird durch den Schnittpunkt aus Grenzschadenkurve und $AMAC_0$ -Kurve, d.h. $D'(E, s) = AMAC_0(E)$, bestimmt. Die Lösung sei mit $E_0(s)$ bezeichnet. Der Regulator setzt bei Steuern den Steuersatz auf $\tau_0 = AMAC_0(E_0)$, bei Zertifikaten gibt er $L = E_0$ viele Zertifikate aus. Man beachte, daß die Grenzschadenfunktion um so steiler ist, je größer der Schadenparameter s ausfällt. Damit ist auch der ursprüngliche Steuersatz um so größer bzw. die ursprünglich optimale Anzahl an Zertifikaten um so kleiner, je größer der Schadenparameter ist.

Man gehe zunächst von *Steuern* aus. In dem hier betrachteten Szenario bleibt der Steuersatz unverändert, egal ob einige oder alle Firmen die neue Technologie übernehmen oder nicht. Wird die neue Technologie jedoch von einer oder mehreren Firmen übernommen, dann sinken die aggregierten Grenzvermeidungskosten und damit auch der optimale Steuersatz. Daher sind in diesem Fall der ursprüngliche Steuersatz und – in Folge – die Anreize, die neue Technologie zu übernehmen, zu hoch.

Entgegengesetzt verhält es sich bei einem *Zertifikateregime*. Sobald einige Firmen die neue Technologie übernehmen, sinkt der Marktpreis für Zertifikate, da die Faktornachfrage nach Emissionen fällt. Die ursprüngliche Anzahl an Zertifikaten ist nun zu groß im Vergleich zu den optimalen aggregierten Emissionen. Somit ist aber auch der Marktpreis für Zertifikate niedriger als der optimale Zertifikatepreis. Folglich sind die Anreize zu niedrig.

Man erhält daher – in Übereinstimmung mit den Resultaten aus Abschnitt 4.1 und im Widerspruch zu JUNG ET AL. [1996] – folgende Ergebnisse bei Steuern bzw. bei Zertifikaten:

Proposition 4.12 (Steuer) *Es sei angenommen, daß der Steuersatz auf das bezüglich der alten Technologie und des Schadenparameters s optimale Niveau gesetzt worden ist. Dann existiert ein Schadenparameter $\bar{s}_t < \bar{s}$ so daß*

- i.) für $s \leq \underline{s}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt,.*
- ii.) für $s > \bar{s}_t$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen.*
- iii.) Falls $s \in (\underline{s}, \bar{s}_t]$, dann kommt es zu teilweiser Übernahme der neuen Technologie.*

Darüber hinaus kommt es zu Überinvestition, falls $s \in [\underline{s}, \bar{s}]$.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Proposition 4.13 (Zertifikate) *Es sei angenommen, daß der Regulator die bezüglich der herkömmlichen Technologie und des Schadenparameters s optimale Anzahl an Zertifikaten ausgegeben hat. Dann existiert ein Schadenparameter $\bar{s}_p > \bar{s}$ so daß*

- i.) für $s \leq \underline{s}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt,*
- ii.) für $s \geq \bar{s}_p$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen.*
- iii.) Falls $s \in (\underline{s}, \bar{s}_p)$, dann kommt es zu teilweiser Übernahme der neuen Technologie.*

Darüber hinaus kommt es zu Unterinvestition, falls $s \in [\underline{s}, \bar{s}_p]$.

Der Beweis findet sich wiederum im Anhang.

4.3.7 Anpassung der Politik

Die Ergebnisse des letzten Abschnittes haben das Resultat aus Abschnitt 4.1 bestätigt, daß das ursprünglich gesetzte Emissionsziel im allgemeinen nicht mehr optimal ist, sobald eine neue Technologie den Markt durchdringt. Ist es aber auch im Fall einer heterogenen Industrie aus normativer Sicht besser, wenn der Regulator sich verpflichtet, die Höhe des Instrumentes an die Diffusion der neuen Technologie anzupassen? Es wurde bereits in Abschnitt 4.2 diskutiert, daß in diesem Fall Zertifikate, Steuern und Subventionen äquivalente Instrumente sind. Analog zu Proposition 4.7 läßt sich zeigen, daß auch bei asymmetrischen Firmen mittels dieser Instrumente das soziale Optimum implementiert werden kann, falls der Regulator die Höhe des Instruments optimal an das Investitionsverhalten der Firmen anpaßt.⁴³

Nachdem die Firmen ihre Investitionsentscheidung getroffen haben, setzt der Regulator die Höhe des Instrumentes optimaler Weise so, daß die Grenzvermeidungskosten

⁴³Aufgrund des Ganzzahligkeitsproblems des hier behandelten diskreten Modelles kann sich das dezentrale Ergebnis bezüglich des Investitionsverhalten der marginalen Firma i_0 von der sozial optimalen Allokation unterscheiden. Ist die Anzahl an Firmen jedoch groß genug und daher der Einfluß des Investitionsverhaltens einer Firma auf die aggregierten Emissionen vernachlässigbar, hat dies nur einen bedeutungslosen Einfluß auf die sozialen Kosten.

dem Grenzscha-den entsprechen. Es bezeichne $AMAC_{\{\delta_i(x)\}_{i=1,\dots,n}}$ die Grenzvermeidungskostenkurve bei partieller Diffusion.⁴⁴ Hieraus ergibt sich eine aggregierte Faktornachfrage nach Emissionen von $E(x) = \sum_{i=1}^n e_i^0(x) + \sum_{i=1}^n \delta_i(e_i^I(x) - e_i^0(x))$. Die optimalen Emissionen und der korrespondierende optimale Preis für Emissionen ergeben sich aus dem Schnittpunkt der aggregierten Grenzvermeidungskostenkurve und der Grenzscha-denkurve, d.h. $AMAC_{\{\delta_i(x)\}_{i=1,\dots,n}}(E) = D'(E)$. Der Regulator setzt daher $\tau = D'(E(\tau))$ im Fall einer Steuer bzw. gibt L viele Zertifikate aus, so daß im Gleichgewicht auf dem Zertikatemarkt $\sigma = D'(L)$ gilt.

Es sei daran erinnert, daß \tilde{x}_i den Preis für Emissionen bezeichnet, bei dem Firma i gerade indifferent zwischen der alten und der neuen Technologie ist. Andererseits muß aber in einem Investitionsgleichgewicht für jede Firma $\delta_i = 0$ im Fall $\tilde{x}_i > x(\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n})$ bzw. $\delta_i = 1$ im Fall $\tilde{x}_i < x(\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n})$ gelten. Somit ergibt sich folgendes Resultat:

Proposition 4.14 *Es sei angenommen, daß der Regulator ankündigt, die Anzahl an Zertifikaten bzw. die Höhe des Steuersatzes optimal an die erfolgte Übernahme der neuen Technologie anzupassen. In diesem Fall existiert sowohl bei Steuern als auch bei Zertifikaten ein eindeutiges, teilspielperfektes Nash-Gleichgewicht. Dieses entspricht der sozial optimalen Allokation.*

Der Beweis findet sich im Anhang.

Entscheidend für die Gültigkeit dieses Ergebnisses ist wiederum die Annahme kleiner Firmen. Nur in diesem Fall existiert im allgemeinen ein eindeutiges Nash-Gleichgewicht.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden anhand mehrerer Szenarien die Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente analysiert, eine neue Vermeidungstechnologie zu übernehmen. Eine allgemeine Aussage, bei welchem Instrument mehr Firmen die neue Technologie übernehmen, läßt sich nicht machen. Vielmehr ergeben die Resultate dieses Kapitels ein differenzierteres Bild als es in der traditionellen Literatur vorzufinden ist.

⁴⁴Strenggenommen hängt $AMAC_{\{\delta_i(x)\}_{i=1,\dots,n}}$ davon ab, welche Firmen die neue Technologie übernommen haben. Die Annahme kleiner Firmen impliziert jedoch, daß die aggregierten Grenzvermeidungskostenkurve näherungsweise nur davon abhängt wieviele Firmen die neue Technologie übernommen haben.

Bei einem aggregierten Emissionsziel bieten Steuern (ein sogenannter Standard-Preis-Ansatz) die höchsten Anreize. Wurde das aggregierte Emissionsziel bezüglich der alten Technologie optimal gesetzt, dann sind die Anreize bei Steuern aus Sicht eines sozialen Planer sogar zu groß. Erstaunlicherweise können in einem solchen Szenario auch Standards höhere Anreize bieten als Zertifikate. Diese Einschätzung widerspricht der traditionellen Literatur. Letztere ordnet auktionierten Zertifikaten die höchsten Anreize zu, gefolgt von Steuern und Standards.

Antizipieren die Firmen hingegen, daß der Regulator die Höhe des Instrumentes an die Übernahme der neuen Technologie anpaßt, dann führen die marktorientierten Instrumente zu einer äquivalenten Allokation. Diese ist darüber hinaus sozial optimal. Da die Übernahme der neuen Technologie den Preis für Emissionen verringert, sinken auch die Vermeidungskosten der Firmen, und zwar sowohl für die Firmen mit der neuen Technologie als auch mit der alten Technologie. Es kommt also zu einem externen Effekt. Bei Standards ist das teilspielperfekte Gleichgewicht in einem solchen Szenario hingegen nicht eindeutig. Es kann – aus normativer Sicht – zu zu hoher als auch zu zu niedriger Diffusion der neuen Technologie kommen.

Betrachtet man eine homogene Industrie, so sind Steuern durch eine unschöne Eigenschaft charakterisiert. Entspricht nämlich der Steuersatz auf Emissionen genau dem Steuersatz, für den die Firmen zwischen den beiden Technologien indifferent sind, dann wird das Investitionsgleichgewicht nicht eindeutig bestimmt. Wegen dieser Eigenschaft eines Steuerregimes kommen KENNEDY UND LAPLANTE [1998] zu der Aussage, daß eine Selbstverpflichtung des Regulators auf die Höhe des Steuersatzes vor der Diffusion einer neuen Technologie in der Regel nicht zeitkonsistent sei. In Abschnitt 4.3 wurde eine heterogene Industrie betrachtet. Dabei konnte gezeigt werden, daß diese unbefriedigende Eigenschaft eines Steuerregimes im Fall asymmetrischer Firmen nicht auftritt. Vielmehr existiert im Fall asymmetrischer Firmen bei Steuern ein eindeutiges Investitionsgleichgewicht.

Kapitel 5

Eine Alternative – Emissionsoptionen

Verpflichtet sich der Regulator, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes optimal an die erfolgte Übernahme der neuen Technologie anzupassen, dann bieten Marktinstrumente – wie im letzten Abschnitt gezeigt wurde – sozial optimale Anreize zur Übernahme der neuen Technologie. Eine solche optimale Anpassung der Höhe des Instrumentes wird in der Realität jedoch selten eintreten. Dafür kann es mehrere Gründe geben. Einerseits kennt der Regulator die Grenzvermeidungskosten der Technologien meist nicht exakt, sondern nur näherungsweise. Firmen haben oft einen strategischen Anreiz, diese Information solange wie möglich zurückzuhalten oder falsche Kosten anzugeben. Im Laufe der Zeit wird der Regulator zwar aus verschiedenen Quellen eine immer bessere Abschätzung der tatsächlichen Kosten bekommen, bei Einführung einer neuen Technologie muß er sich jedoch zunächst meist auf die Aussagen der zu regulierenden Industrie verlassen.⁴⁵ Sowohl ROBERTS und SPENCE [1976], KWEREL [1977] als auch DASGUPTA ET AL. [1980] haben deshalb Mechanismen entwickelt, die die Firmen dazu veranlassen, ihre wahren Vermeidungskosten zu offenbaren. Diese Mechanismen sehen eine geeignete Kombination aus Steuern, Subventionen und Zertifikaten vor, und sind daher in der Praxis komplex und verwaltungsaufwendig. Andererseits spielen für eine Regierung meist nicht nur die Minimierung der sozialen Kosten von Emissionen,

⁴⁵Vor der Umsetzung des Acid-Rain-Programmes wurden von der US-EPA Studien zu den entstehenden Vermeidungskosten der Kraftwerksbetreiber in Auftrag gegeben (siehe z.B. RICO [1995] und SMITH ET AL. [1998]).

sondern oft auch andere Ziele bei der Festlegung der Höhe des umweltpolitischen Instrumentes eine Rolle. Steuern und auktionierte Zertifikate können zum „Stopfen“ von Haushaltslöchern oder – wie im Rahmen der deutschen Ökosteuereform – zum Senken anderer Steuern, Abgaben oder Sozialversicherungsbeiträgen eingesetzt werden. Es kann sich aber z.B. auch der Lobby-Einfluß von Umweltverbänden bzw. Wirtschaftsverbänden auf die Regierung im Lauf der Zeit verändern. Das Mißtrauen der Industrie gegenüber der langfristigen Verlässlichkeit und Konstanz umweltpolitischer Ziele seitens der Regierung führt zu hoher Diskontierung zukünftiger Vermeidungskosten. Um der regulierten Industrie Planungs- bzw. Investitionssicherheit zu geben, sieht das Acid Rain Programm (ARP) des CAAA daher eine verbindliche Festlegung der aggregierten Emissionsobergrenze bis 2010 vor. Terminzertifikatemärkte (permit futures) sind unter Unsicherheit jedoch im allgemeinen nicht ex-post effizient. Um die ex-post Effizienz zu erhöhen, erlaubt das ARP Banking von Zertifikaten. REQUATE [1998b] zeigt, daß es jedoch von der natürlichen Abbaurate des Schadstoffes und von der Steigung der Schadenfunktion abhängt, ob Banking zu Wohlfahrtsverbesserungen oder -verschlechterungen führt. Alternative Vorschläge, die ex-post Effizienz zu erhöhen, werden von KLING und RUBIN [1997], die eine Abzinsung von gebankten Zertifikaten fordern, und REQUATE [1998b] gemacht, der das Eingreifen eines wohlwollenden staatlichen Agenten fordert.

Die folgenden Abschnitte sollen einen Mechanismus vorstellen, der sich an die Finanzmarkttheorie anlehnt. Terminmärkte für Aktien sind unter Unsicherheit unvollständige Märkte. Man kann zeigen, daß unter bestimmten Umständen die Einführung von Optionen den Markt vervollständigen kann (ROSS [1976]). Optionen beinhalten dabei das Recht, nicht jedoch wie bei reinen Termingeschäften die Pflicht, eine Aktie an einem bestimmten Termin zu einem bestimmten Preis zu kaufen (Call) oder zu verkaufen (Put). Im folgenden soll ein solcher Optionsmechanismus auf den Terminzertifikatemarkt übertragen werden. Emissionsoptionen wurden in einem anderen Zusammenhang schon von LAFFONT und TIROLE [1996b] untersucht. Die Autoren betrachten eine Regulierung mittels auktionierter Zertifikate und Optionen auf Zertifikate jedoch unter dem Aspekt der Optimalbesteuerung bei Schattenkosten der öffentlichen Finanzierung. In dieser Arbeit wird gezeigt, daß durch die Einführung von Optionen auf Zertifikate sowohl ex-post Effizienz sichergestellt werden kann als auch der Informationsbedarf des Regulators auf die Grenzschaadenfunktion beschränkt bleibt. Während die Mechanismen von ROBERTS und SPENCE [1976] bzw. KWEREL [1977] den Firmen optimale

Anreize geben sollen, dem Regulator die wahren Vermeidungskosten zu offenbaren, ist der Regulator in dem im folgenden vorgestellten Mechanismus auf keine Information seitens der Firmen angewiesen. Betrachtet wird ein Zwei-Perioden-Modell. In der ersten Periode gibt der Regulator Zertifikate aus und versteigert zusätzlich Emissionsoptionen. Diese können von den Firmen in der zweiten Periode zu einem bestimmten Preis gegen Zertifikate eingelöst werden.⁴⁶

Die folgenden Abschnitte sind wie folgt gegliedert. Zunächst wird ein einfaches Modell vorgestellt. In Abschnitt 5.2 wird das soziale Optimum unter vollkommener Voraussicht abgeleitet. Abschnitt 5.3 geht kurz auf Terminmärkte für Zertifikate unter Unsicherheit ein und stellt anschließend einen Options-Mechanismus vor. Schließlich wird in Abschnitt 5.4 die Diffusion einer neuen Technologie bei einem solchen Mechanismus untersucht.

5.1 Das modifizierte Modell

Man betrachte eine kompetitive Industrie in einem Zwei-Perioden-Modell. In Periode 2 stoßen alle Firmen einen homogenen Schadstoff aus, dessen Ausstoß durch eine Vermeidungstechnologie reduziert werden kann. Wie leicht gezeigt werden kann, führen Zertifikate in einem solchen Fall bei gegebenem aggregierten Emissionsniveau zu einer Allokation mit geringsten aggregierten Vermeidungskosten. Dies impliziert, daß die Grenzvermeidungskosten der einzelnen Firmen identisch sind. Im folgenden sei angenommen, daß die aggregierten Vermeidungskosten in Periode 2 verschiedene Naturzustände α annehmen können. Der stochastische Parameter α sei dabei stetig auf dem Intervall $[0, \Omega]$ verteilt, d.h. $\alpha \in [0, \Omega]$. Es seien $AC_\alpha(E)$ die aggregierten Vermeidungskosten, um ein aggregiertes Emissionsziel E zu geringsten Kosten einzuhalten, wenn der Zustand α eintritt. Obwohl der Outputmarkt nicht explizit berücksichtigt wird, kann der Zufallsparameter α als stochastischer Nachfrageparameter interpretiert werden. Ist die Nachfrage nach dem in Kuppelproduktion mit dem Schadstoff produzierten Gut hoch, dann sind die Vermeidungskosten, um das aggregierte Emissionsziel E einzuhalten, höher als für eine niedrige Nachfrage nach demselben Gut. Der Zufallsparameter α kann aber auch Schwankungen in den Preisen für Vermeidungsinputs, z.B. schwefelarme Kohle, oder erwartete Änderungen in der Vermeidungstechnologie widerspiegeln. Die

⁴⁶Man kann also in gewissem Sinne von einer Call-Option sprechen.

Vermeidungskosten, um ein aggregiertes Emissionsziel E einzuhalten, sinken, wenn die Inputs der Vermeidung billiger werden,⁴⁷ oder wenn eine verbesserte Vermeidungstechnologie auf den Markt kommt. Man beachte, daß der Zufallsparameter die aggregierten Vermeidungskosten beeinflusst. Trifft ein Nachfrageschock beispielsweise nur einen Teil der gesamten Industrie, etwa weil der Stromverbrauch in Norddeutschland wegen eines kalten Winters steigt, bleibt die Nachfrage für den Rest der Industrie jedoch konstant, etwa weil dort das Wetter „normal“ verläuft, dann werden trotzdem die aggregierten Grenzvermeidungskosten und damit auch die individuellen Grenzvermeidungskosten steigen, d.h. der Schock in einer Region betrifft die gesamte Industrie. Die aggregierte Kostenfunktion genügt der folgenden Annahme:

$$AC_{\alpha}(E) \begin{cases} > 0 & \text{falls } E < E_{\alpha}^{\max} \\ = 0 & \text{falls } E \geq E_{\alpha}^{\max} \end{cases} .$$

D.h. die Vermeidungskosten sind positiv, falls E kleiner ist als das kostenminimierende Emissionsniveau E_{α}^{\max} , welches von α abhängt. Es sei weiterhin unterstellt, daß E_{α}^{\max} , $AC_{\alpha}(E)$ und die aggregierten Grenzvermeidungskosten $AMAC_{\alpha}(E) = -AC'_{\alpha}(E)$ in α steigen und $AC''_{\alpha}(e) > 0$, d.h. die Grenzvermeidungskosten in E fallen. Die „günstigste“ Vermeidungskostenfunktion wird mit $AC_0(E)$ und die „schlechteste“ mit $AC_{\Omega}(E)$ bezeichnet. In Periode 1 kennen die Firmen die Vermeidungskosten zu jedem möglichen Zustand α und dessen Verteilung $\mu(\alpha)$. Letztere sei auf eins normiert, d.h.

$$\int_0^{\Omega} \mu(\alpha) d\alpha = 1 \quad .$$

Die für die zweite Periode erwarteten Vermeidungskosten $\overline{AC}(E)$ sind gegeben durch

$$\overline{AC}(E) = \int_0^{\Omega} AC_{\alpha}(E) \mu(\alpha) d\alpha \quad ,$$

und die daraus abgeleiteten erwarteten Grenzvermeidungskosten durch

$$\overline{AMAC}(E) = \int_0^{\Omega} AMAC_{\alpha}(E) \mu(\alpha) d\alpha \quad .$$

⁴⁷Z.B. wurde während der Phase I des ARP Kohle aus dem Powder River Basin, die einen niedrigeren Schwefelgehalt aufweist, billiger und reduzierte so die Vermeidungskosten der Kraftwerksbetreiber (siehe auch MONTERO UND ELLERMAN [1998]).

5.2 Das soziale Optimum unter vollkommener Voraussicht

Bevor im nächsten Abschnitt auf Optionen auf Zertifikate eingegangen wird, soll im folgenden zunächst wiederum das soziale Optimum charakterisiert werden. Hierzu sei die soziale Schadenfunktion $D(E)$ aus Abschnitt 3.2 in Erinnerung gerufen. Damit sind die gesamten sozialen Kosten in Periode 2 gegeben durch

$$TSC(\alpha, E) = AC_\alpha(E) + D(E) \quad .$$

Auf eine Diskontierung wird verzichtet. Nun sei darüber hinaus vorausgesetzt, daß der soziale Planer vollkommene Information besitzt, insbesondere kennt er den Zustand α . Dann ist die Bedingung erster Ordnung zur Minimierung der sozialen Kosten gegeben durch

$$-AC'_\alpha(E) = D'(E) \quad , \quad (5.2.1)$$

Die optimalen aggregierten Emissionen seien mit E_α^* bezeichnet. Diese hängen vom Zustand α ab. Sie sollten so gesetzt sein, daß der Grenzschaten den aggregierten Grenzvermeidungskosten entspricht. Komparative Statik von Gleichung (5.2.1) bezüglich α ergibt

$$\frac{\partial E_\alpha^*}{\partial \alpha} = \frac{\partial AMAC_\alpha(E_\alpha^*)/\partial \alpha}{(D''(E_\alpha^*) + AC''_\alpha(E_\alpha^*))} > 0 \quad .$$

Wie nicht anders zu erwarten war, steigen die optimalen Emissionen E_α^* in α . Die niedrigsten optimalen aggregierten Emissionen E_0^* liegen im Zustand $\alpha = 0$, die höchsten optimalen aggregierten Emissionen E_Ω^* im Zustand $\alpha = \Omega$ vor. In Abbildung 5.1 wird das Resultat graphisch dargestellt.

5.3 Optionen

Nun soll eine dezentrale Ökonomie betrachtet werden. Zunächst sei angenommen, daß die Industrie mittels traditioneller Zertifikate reguliert wird. Der Regulator gibt also in der ersten Periode, d.h. unter Unsicherheit des zukünftigen Zustandes α , eine Anzahl von L vielen Zertifikaten aus. Die Höhe des Zertifikatepreises hängt in der Regel vom Zustand α ab. Der Marktpreis für Zertifikate im Naturzustand α sei mit σ_α

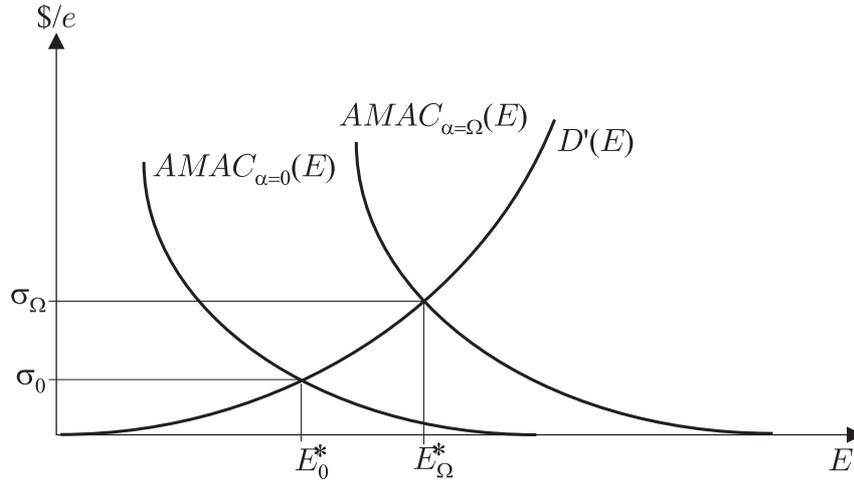


Abbildung 5.1: Die Abbildung zeigt die aggregierten Grenzvermeidungskosten $AMAC_0(E)$ für $\alpha = 0$ und $AMAC_{\Omega}(E)$ für $\alpha = \Omega$. Die niedrigsten optimalen Emissionen E_0^* liegen im Zustand $\alpha = 0$ vor, die höchsten optimalen Emissionen E_{Ω}^* im Zustand $\alpha = \Omega$.

bezeichnet. In der zweiten Periode, nachdem α bekannt ist, werden die Firmen ihre Vermeidungsaktivitäten dann so setzen, daß ihre Grenzvermeidungskosten dem Zertifikatepreis entsprechen, d.h. $AMAC_{\alpha}(L) = \sigma_{\alpha}$. Legt sich der Regulator in Periode 1 auf eine bestimmte Menge an Zertifikaten fest, so ist die Allokation in Periode 2 also im allgemeinen ex-post nicht effizient. Ex-ante würde ein rationaler Regulator den erwarteten sozialen Schaden minimieren

$$\min_L \left\{ \int_0^{\Omega} [AC_{\alpha}(L) + D(L)] \mu(\alpha) d\alpha = \overline{AC}(L) + D(L) \right\} .$$

Die ex-post Allokation wäre effizient für den ex-ante erwarteten Zustand α mit einem Zertifikatepreis $\sigma_{\alpha} = \bar{\sigma}$, wobei $\bar{\sigma}$ den erwarteten Zertifikatepreis bezeichnet.

Nun sei unterstellt, daß der Regulator in der ersten Periode nur $L_0 = E_0^*$ viele Zertifikate ausgibt, entweder indem er sie versteigert oder kostenlos verteilt. Zusätzlich versteigert der Regulator nun jedoch Optionen. Dabei sind die Optionen mit dem Index $i \in \mathbb{N}$ durchnummeriert. Man betrachte also Optionen e_i und ein Optionsmenue $\{e_i\}_{i \in \mathbb{N}}$. Jede Option e_i kann in Periode 2 ausgeübt werden. Durch Zahlen eines Striking Preises s_i kann die Option dabei in ein Emissionszertifikat umgetauscht werden, das zum Ausstoß von e Einheiten an Emissionen berechtigt. Die Striking Preise werden folgendermaßen festgelegt: Es bezeichne e_1 die Option mit dem niedrigsten Striking Preis s_1 . Dieser sei gegeben durch $s_1 = D'(E_0^* + e)$. Die Option e_2 habe nun den nächst

höheren Striking Preis s_2 . Dieser ist gegeben durch $s_2 = D'(E_0^* + 2e)$. Die i -te Option hat demnach einen Striking Preis

$$s_i = D'(E_0^* + i \cdot e) \quad . \quad (5.3.1)$$

Die Idee dabei ist, die Funktion des marginalen Schadens $D'(E)$ mittels eines Menues an Optionen zu approximieren (siehe hierzu auch Abbildung 5.3). Insbesondere gibt es nur eine Option jeder Art.⁴⁸ Durch geeignete Wahl von e kann der Regulator die Schadenfunktion mittels des Optionsmenues beliebig genau approximieren. Im Limes $e \rightarrow 0$ besteht das Optionsmenue $\{e_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ aus einem Kontinuum an Optionen und entspricht genau der Grenzschadenfunktion $D'(E)$. Es sei angemerkt, daß der Regulator in der ersten Periode, anstatt $L_0 = E_0^*$ viele Zertifikate auszugeben, auch L_0 viele Optionen mit Striking Preis $s \leq \sigma_0 = D'(E_0^*)$ versteigern kann.

Nun gehe man davon aus, daß der Regulator in der ersten Periode L_0 viele Zertifikate ausgeteilt und Optionen e_i mit zugehörigem Striking Preis s_i versteigert hat. In Periode 2, nachdem der Zustand α bekannt ist, können die verschmutzenden Firmen entweder (i) eine Option ausüben, indem sie den Striking Preis bezahlen, (ii) auf dem Zertifikatemarkt ein Zertifikat, daß zur Emission von e Einheiten berechtigt, kaufen oder (iii) e Einheiten an Emissionen vermeiden. Das Spiel hat also folgende Schritte:

1. **$\mu(\alpha)$ ist bekannt:** Der Regulator gibt L_0 viele Zertifikate aus und versteigert Optionen e_i mit zugeordnetem Striking Preis s_i .
2. **α wird beobachtet:** Die Firmen entscheiden zwischen Vermeiden, Ausüben ihrer Optionen und Handel von Zertifikaten.

Im folgenden soll das teilspielperfekte Gleichgewicht dieses Spiels charakterisiert werden. Ein Gleichgewicht in Periode 2 erfordert, daß die Firmen alle Optionen, deren Striking Preis s_i niedriger als der gleichgewichtige Zertifikatepreis σ_α ist, ausüben. Optionen, deren Striking Preis s_i höher als der gleichgewichtige Zertifikatepreis σ_α ist, werden nicht ausgeübt werden, da es günstiger ist, Zertifikate auf dem Zertifikatemarkt

⁴⁸Dies ist jedoch keine Einschränkung. Man kann genausogut auch m Optionen jeder Art austeilen, wobei dann jede in ein Zertifikat eingetauschte Option zum Ausstoß von e/m Einheiten Emissionen berechtigt.

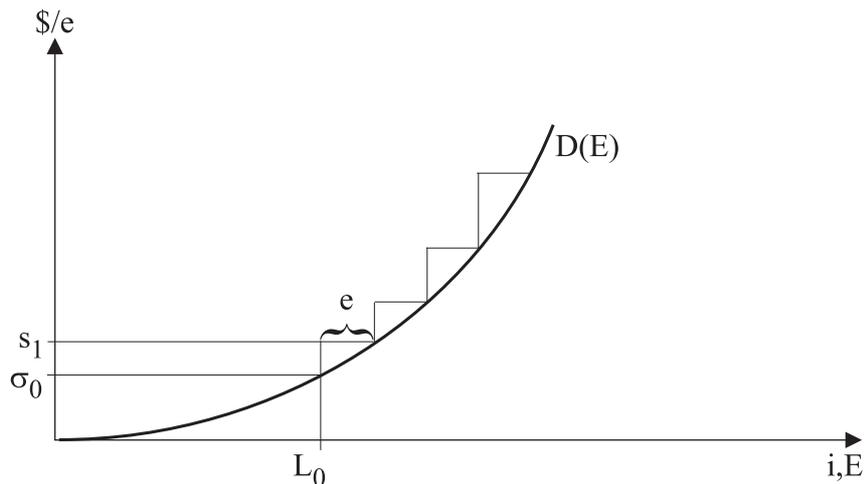


Abbildung 5.2: Die Abbildung illustriert das Menue an Optionen, welches der Regulator versteigert.

zum Preis σ_α zu kaufen.⁴⁹ Desweiteren entsprechen die Grenzvermeidungskosten jeder Firma im Gleichgewicht den aggregierten Grenzvermeidungskosten der Industrie und damit den aggregierten Grenzvermeidungskosten. Es bezeichne σ_α^* den Marktpreis für Zertifikate, der im Zustand α dem sozial optimalen Grenzscha- den $D'(E_\alpha^*)$ entspricht, d.h. $\sigma_\alpha^* := D'(E_\alpha^*)$. Dann ergibt sich folgender Hilfssatz:

Lemma 5.1 (Gleichgewicht in Periode 2) *Es sei angenommen, daß die Industrie Optionen $e_i \in \{e_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ hält. Dann ist der gleichgewichtige Zertifikatepreis σ_α im Zustand α gegeben durch $D'(E_\alpha^*) + \delta \geq \sigma_\alpha \geq D'(E_\alpha^*)$ mit $\delta \geq 0$. Durch geeignete Wahl von e wird δ beliebig klein. Im Gleichgewicht werden alle Optionen mit Striking Preis $s_i \leq \sigma_\alpha$ ausgeübt.*

Beweis: Es erfolgt ein indirekter Beweis. Hierzu sei angenommen, daß die Industrie sich in Periode 2 im Zustand α befindet und der gleichgewichtige Zertifikatepreis durch $\sigma < D'(E_\alpha^*)$ gegeben ist. Offensichtlich wurden nur Optionen mit $s_i < \sigma$ ausgeübt. Dann existieren jedoch weniger als E_α^* viele Zertifikate und man erhält $\sigma = AMAC_\alpha(L) > D'(E_\alpha^*)$. Dies widerspricht der Annahme. Weiterhin gilt, daß L mit $\sigma = AMAC_\alpha(L) > D'(E_\alpha^*)$ nur dann eine gleichgewichtige Menge an Zertifikaten

⁴⁹Bei Optionen, deren Striking Preis dem gleichgewichtigen Zertifikatepreis entsprechen, sind die Firmen indifferent zwischen Ausüben und Nicht-Ausüben der Option. Das Verhalten der Firmen ist in diesem Fall daher nicht eindeutig.

sein kann, falls für alle nicht eingelösten Optionen $s_i > AMAC_\alpha(L + e)$ gilt. Damit kann man δ folgendermaßen definieren $\delta = AMAC_\alpha(E_\alpha^* - e) - AMAC_\alpha(E_\alpha^*)$. Für $e \rightarrow 0$ gilt $\delta \rightarrow 0$, d.h. ein Zertifikatspreis $\sigma > D'(E_\alpha^*)$ kann in diesem Fall ebenfalls nicht gleichgewichtig sein. Q.E.D.

Der letzte Hilfssatz impliziert unmittelbar, daß im Zustand $\alpha = \Omega$ bezüglich des Marktpreises für Zertifikate $\sigma = \sigma_\Omega^*$ gilt. Daher werden Optionen mit $s_i > \sigma_\Omega$ nicht eingelöst.

Nun betrachte man die erste Stufe des Spiels, in der der Regulator Optionen versteigert. Entscheidend dafür, ob die Firmen eine Option e_i kaufen möchten, ist der erwartete Kapitalgewinn der Option. Es bezeichne ν_i den Kapitalgewinn der i -ten Option. Offensichtlich erfährt die Option e_i in Zuständen α mit $s_i < \sigma_\alpha$ einen positiven Kapitalgewinn. Insbesondere haben laut Lemma 5.1 alle Optionen mit $s_i < \sigma_\Omega$ einen positiven Kapitalgewinn im Zustand $\alpha = \Omega$. Andererseits sind die Firmen gerade indifferent zwischen Ausüben der Option und Kaufen eines Zertifikates, falls $s_i = \sigma_\alpha$ gilt. Man definiere eine Funktion $g(i) \in [0, \Omega]$, die jeder Option e_i einen Naturzustand $\alpha = g(i)$ zuordnet, für den die Firmen gerade indifferent sind, die Option auszuüben, d.h. es gilt $s_i = \sigma_{g(i)}$. Dann ist der erwartete Kapitalgewinn $\bar{\nu}_i$ einer Option e_i gegeben durch

$$\bar{\nu}_i = \int_{g(i)}^{\Omega} \mu(\alpha)(\sigma_\alpha - s_i)d\alpha \quad . \quad (5.3.2)$$

Alle Optionen mit $s_i < \sigma_\Omega^*$ weisen einen positiven, erwarteten Kapitalgewinn auf.

Zuletzt soll der Preis einer Option in Periode 1 mittels einer Arbitrageüberlegung hergeleitet werden. Hierzu bezeichne p_i den Preis einer Option und \bar{c}_i die erwarteten gesamten Kosten, Option e_i auszuüben. Eine Firma, die in der 2-ten Periode e Einheiten emittieren möchte, kann entweder eine Option in Periode 1 ersteigern, in Periode 2 ein Zertifikat auf dem Zertifikatemarkt kaufen oder e Einheiten des Schadstoffes vermeiden. Die erwarteten Kosten, e Einheiten zu emittieren, indem man eine Option e_i in Periode 1 kauft, ist bestimmt durch die Summe aus dem Preis für die Option, den erwarteten Ausübungskosten der Option und dem erwarteten Zertifikatspreis, falls die Option nicht ausgeübt wird, sondern ein Zertifikat erstanden wird:

$$\bar{c}_i = p_i + \int_{g(i)}^{\Omega} \mu(\alpha)s_i d\alpha + \int_0^{g(i)} \mu(\alpha)\sigma_\alpha d\alpha \quad \text{für } s_i \geq \sigma_0 \quad . \quad (5.3.3)$$

Andererseits ist der erwartete Zertifikatspreis $\bar{\sigma}$ gegeben durch

$$\bar{\sigma} = \int_0^{\Omega} \mu(\alpha)\sigma_\alpha d\alpha \quad , \quad (5.3.4)$$

und die erwarteten Grenzvermeidungskosten der Firma entsprechen den erwarteten aggregierten Grenzvermeidungskosten $\overline{AMAC}(E)$. Arbitrage erfordert nun, daß die drei Alternativen dieselben erwarteten Kosten verursachen:

$$\bar{c}_i = \bar{\sigma} = \overline{AMAC}(E) \quad . \quad (5.3.5)$$

Daher sind die Firmen in Periode 1 zwischen den drei Alternativen indifferent. Insbesondere sind die erwarteten gesamten Kosten, eine Option e_i auszuüben, demnach für alle Optionen gleich groß, d.h. für $i, j \in \mathbb{N}$ gilt

$$\bar{c}_i = \bar{c}_j \quad .$$

Aus den Gleichungen (5.3.3) - (5.3.5) kann unmittelbar der Gleichgewichtspreis p_i der Option e_i abgeleitet werden

$$\begin{aligned} p_i &= \int_0^\Omega \mu(\alpha) \sigma_\alpha d\alpha - \int_{g(i)}^\Omega \mu(\alpha) s_i d\alpha - \int_0^{g(i)} \mu(\alpha) \sigma_\alpha d\alpha \\ &= \int_{g(i)}^\Omega \mu(\alpha) (\sigma_\alpha - s_i) d\alpha = \bar{v}_i \quad . \end{aligned} \quad (5.3.6)$$

Wie intuitiv erwartet, entspricht er dem erwarteten Kapitalgewinn \bar{v}_i . Die Ergebnisse dieses Abschnitts können wie folgt zusammengefaßt werden:

Proposition 5.1 *Es sei angenommen, daß der Regulator $L_0 = E_0^*$ viele Zertifikate ausgibt und ein Menu von Optionen mit gemäß Gleichung (5.3.1) zugeordneten Striking Preisen s_i versteigert. In diesem Fall kann der Regulator durch geeignete Wahl von e erreichen, daß die ex-post Allokation für alle $\alpha \in [0, \Omega]$ in einer beliebigen δ -Umgebung (mit $\delta > 0$) des sozialen Optimums liegen. Der Gleichgewichtspreis p_i einer Option e_i ist gleich dem erwarteten Kapitalgewinn \bar{v}_i .*

Die maximalen optimalen Emissionen E_Ω^* entstehen im Zustand $\alpha = \Omega$. Dann gilt für den Gleichgewichtspreis $\sigma_\Omega^* = D'(E_\Omega^*)$. Die minimalen optimalen Emissionen E_0^* entstehen im Zustand $\alpha = 0$. Dann gilt für den Gleichgewichtspreis $\sigma_0^* = D'(E_0^*)$. Für endliches e repräsentiert der Optionsmechanismus eine diskrete Approximation der Grenzschadenkurve. Für $e \rightarrow 0$ wird die ex-post Allokation sozial optimal. In der Praxis werden jedoch diskrete Schritte von e , z.B. Tonnen an SO_2 , ausreichen.

5.4 Ein Beispiel:

Diffusion einer neuen Vermeidungstechnologie

Abschließend soll untersucht werden, wie sich der in diesem Kapitel vorgestellte Mechanismus auf die Diffusion neuer Technologien auswirkt. Zunächst sei an das unbefriedigende Ergebnis aus Abschnitt 4.1 erinnert. In dem dort beschriebenen Szenario wollte sich der Regulator auf die Menge an ausgegebenen Zertifikaten selbstverpflichten. Da er keine neue Technologie erwartet hat, hat sich der Regulator auf die bezüglich der alten Technologie optimale Menge an Zertifikaten festgelegt. Als Folge war die Allokation der Emissionen jedoch nach der Diffusion einer neuen Technologie nicht mehr optimal. In der Praxis erwarten sowohl der Regulator als auch die Firmen in der Regel einen technologischen Fortschritt in der Form neuer Vermeidungstechnologien. Die genauen Kosten solcher neuer Technologien ist ihnen jedoch zunächst meist nicht genau bekannt. Der Regulator wird die Menge an Zertifikaten dann anhand seiner Erwartungen festlegen. In Abschnitt 5.3 wurde gezeigt, daß die Allokation auch in diesem Fall in der Regel nicht ex-post optimal ist. Der in diesem Kapitel eingeführte Mechanismus kann hier Abhilfe schaffen.

Man gehe – wie schon in Abschnitt 3 – von einer aus n Firmen bestehenden, kompetitiven Industrie aus. In Periode 1 betreiben alle Firmen eine konventionelle Technologie 0, die vollständig durch ihre Kostenfunktion $C_0(e)$ beschrieben ist. Die Firmen erwarten jedoch für Periode 2 eine neue Vermeidungstechnologie I mit niedrigeren Grenzvermeidungskosten, d.h. $-C'_I(e) < -C'_0(e)$ für alle $e < e_0^{\max}$. Die Übernahme der neuen Technologie verursacht Fixkosten $F > 0$. Die Höhe der Fixkosten sei jedoch in Periode 1 noch nicht bekannt, sondern nur deren Verteilung $\rho(F)$, wobei gelten soll

$$\int_0^\infty \rho(F) dF = 1 \quad .$$

Dabei sei unterstellt, daß $\rho(F)$ für alle Firmen gleichermaßen gilt. Das Spiel hat nun die folgende Abfolge:

1. Ausgabe von L_0 Zertifikaten und Auktionierung eines Optionsmenues $\{e_i\}_{i \in \mathbb{N}}$.
2. Die Firmen beobachten F und können in die neue Vermeidungstechnologie investieren.
3. Ausüben von Optionen, Handeln von Zertifikaten und Setzen der Emissionen.

Im folgenden soll das teilspielperfekte Gleichgewicht dieses Spiels hergeleitet werden.

Zunächst betrachte man Periode 3. Es seien $AMAC_{n_I}(E)$ die aggregierten Grenzvermeidungskosten, falls n_I viele Firmen die neue Technologie übernommen haben. Der Marktpreis für Zertifikate ist mit σ bezeichnet. Die Firmen werden alle Optionen einlösen, für die der Striking Preis geringer ist als der Marktpreis für Zertifikate, d.h. $s_i \leq \sigma$. Es bezeichne L die Gesamtmenge an Zertifikaten, d.h. die Summe aus den ursprünglich ausgeteilten Zertifikaten L_0 und den eingelösten Optionen. Da die Firmen ihre Grenzvermeidungskosten gleich dem Marktpreis für Zertifikate setzen, ist bei Markträumung auf dem Zertifikatemarkt, d.h. $L = E$, der Marktpreis für Zertifikate gegeben durch $AMAC_{n_I}(L) = \sigma$. Es sei daran erinnert, daß aus der Konstruktion des Optionsmenues für hinreichend kleines e immer $\sigma = D'(L)$ folgt. Daher ist die Allokation der Emissionen ex-post für jede Anzahl von Firmen, die die neue Technologie übernommen hat, effizient. Insbesondere gilt $L = \underline{E}^*$ und $\sigma = \sigma_0 = \underline{MD}^*$, falls alle Firmen investiert haben, und $L = \overline{E}^*$ bzw. $\sigma = \sigma_\Omega = \overline{MD}^*$, falls keine Firma die neue Technologie übernommen hat.

In der 2. Stufe beobachten die Firmen F und treffen daraufhin ihre Investitionsentscheidung. In Abschnitt 3.2 wurden die Fixkosten \underline{F} und \overline{F} folgendermaßen konstruiert: Für $F \leq \underline{F}$ sollen alle Firmen die neue Technologie übernehmen, und es gilt $C_0(e_0) + \underline{MD}^* e_0 \geq C_I(e_I) + \underline{MD}^* e_I + F$. Für $F \geq \overline{F}$ soll keine Firma die neue Technologie übernehmen, und es gilt $C_0(e_0) + \overline{MD}^* e_0 \leq C_I(e_I) + \overline{MD}^* e_I + F$. Nun betrachte man die Investitionsentscheidung der Firmen bei Fixkosten $F \geq \overline{F}$. Da $\sigma \leq \sigma_\Omega = \overline{MD}^*$ gilt, hat in diesem Fall offensichtlich keine Firma einen Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen. Für Fixkosten $F \leq \underline{F}$ gilt andererseits $\sigma \geq \sigma_0 = \underline{MD}^*$, und alle Firmen haben einen Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen. Schließlich betrachte man Fixkosten $F \in (\underline{F}, \overline{F})$. Es sei daran erinnert, daß jedem F ein $\tilde{\sigma}(F)$ entspricht, für den beide Typen von Technologien die gleichen Vermeidungskosten verursachen. Darüber hinaus steigt $\tilde{\sigma}(F)$ mit F laut Lemma 3.1. Eine teilweise Übernahme der neuen Technologie kann aber nur dann ein Gleichgewicht sein, wenn der Marktpreis für Zertifikate σ dem Zertifikatspreis $\tilde{\sigma}(F)$ entspricht. Für $\sigma = \tilde{\sigma}$ sind die Gesamtemissionen in Periode 3 wegen $D'(L) = \tilde{\sigma}$ gegeben durch $E = L = n_I \tilde{e}_I + (n - n_I) \tilde{e}_0$. Durch Auflösen nach n_I erhält man die gleichgewichtige Anzahl von investierenden Firmen.

In Periode 1 werden schließlich L_0 viele Zertifikate ausgegeben und Optionen versteigert. Die Anzahl an ausgegebenen Zertifikaten L_0 ist bestimmt durch $AMAC_I(L_0) = D'(L_0)$, wobei $AMAC_I$ die aggregierten Vermeidungskosten sind, falls alle Firmen in

die neue Technologie investiert haben. Man bemerke, daß $L_0 = \underline{E}^*$ gilt.

Der Parameter α kann im Beispiel dieses Abschnittes als technologischer Parameter interpretiert werden. Der Zustand $\alpha = 0$ entspricht Fixkosten $F = \underline{F}$. In Periode 3 werden keine Optionen eingelöst und der Zertifikatepreis im Gleichgewicht beträgt $\sigma = \tilde{\sigma}(\underline{F})$. Andererseits entspricht der Zustand $\alpha = \Omega$ Fixkosten $F = \overline{F}$. In Periode 3 werden alle Optionen mit $s_i \leq \tilde{\sigma}(\overline{F})$ eingelöst, und der Zertifikatepreis im Gleichgewicht wird $\sigma = \tilde{\sigma}(\overline{F})$ sein. Schließlich betrachte man Zustandsparameter $\alpha \in (0, \Omega)$ bzw. Fixkosten $F \in (\underline{F}, \overline{F})$. Je höher die realisierten Fixkosten in Periode 2 sind, desto weniger Firmen übernehmen die neue Technologie und desto mehr Optionen werden in Periode 3 eingelöst. Es besteht daher ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Höhe der Fixkosten F und den Gesamtemissionen E_α . Darüber hinaus existiert eine monotone Funktion $h(\cdot)$, die jedem Zustandsparameter $\alpha \in (0, \Omega)$ eindeutig einen Fixkostenparameter $F \in (\underline{F}, \overline{F})$ zuordnet, d.h. $F = h(\alpha)$. Der stochastische Parameter hat dann folgende Verteilung:

$$\mu(\alpha) = \begin{cases} \int_0^{\underline{F}} \rho(F) dF & \text{für } \alpha = 0 \\ \rho(F) = \rho(h(\alpha)) & \text{für } \alpha \in (0, \Omega) \\ \int_{\overline{F}}^{\infty} \rho(F) dF & \text{für } \alpha = \Omega \end{cases} . \quad (5.4.1)$$

Zusammenfassend ergibt sich folgendes Resultat

Proposition 5.2 *Es sei angenommen, daß die Firmen für Periode 2 eine neue Technologie I mit unsicheren Fixkosten $F > 0$ erwarten. Weiterhin sei angenommen, daß der Regulator $L_0 = E_0^*$ viele Zertifikate ausgibt und ein Menu von Optionen mit gemäß Gleichung (5.3.1) zugeordneten Striking Preisen s_i versteigert, bevor die Firmen die Höhe der Fixkosten kennen. In diesem Fall kann der Regulator durch geeignete Wahl von e erreichen, daß die ex-post Allokation für alle $F \geq 0$ in einer beliebigen δ -Umgebung (mit $\delta > 0$) des sozialen Optimums liegen.*

5.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde eine Alternative zu den bisher in der Literatur untersuchten umweltpolitischen Instrumenten vorgestellt. In Abschnitt 4.1 wurde gezeigt, daß eine Verpflichtung des Regulators auf die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes in der

Regel zu einer ex-post ineffizienten Allokation der Emissionen führt, falls neue Vermeidungstechnologien auf den Markt kommen. Während den Firmen durch eine solche Selbstverpflichtung einerseits eine Investitions- und Planungssicherheit gegeben wird, ist der Regulator andererseits mit der ex-post-Allokation unzufrieden. Daher bietet sich für ihn ein Anreiz, die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes nachträglich zu ändern, d.h. seine Selbstverpflichtung zu durchbrechen. In diesem Kapitel wurde ein Instrument vorgestellt, das diesen Widerspruch auflöst. Indem der Regulator Optionen auf Zertifikate versteigert, kann er sowohl den Firmen eine Investitions- und Planungssicherheit geben als auch eine ex-post optimale Allokation gewährleisten. Eine Option beinhaltet das Recht, in einer bestimmten Periode ein Zertifikat zu einem bestimmten Preis kaufen zu können. Der „Trick“ des Regulators ist dabei, die Grenzschadenkurve mittels eines Menues von Optionen zu approximieren.

Ein solcher Mechanismus bietet mehrere Vorteile: Zum einen kann die ex-post Allokation der Emissionen durch eine geeignete Konstruktion des Optionsmenues beliebig nahe an das soziale Optimum approximiert werden. Zum anderen ist der Informationsbedarf, der eine sozial optimale Allokation gewährleistet, sowohl auf Seiten des Regulators als auch auf Seiten der Firmen gering. Der Regulator benötigt weder Informationen über die Vermeidungskosten⁵⁰ noch über die fixen Kosten der neuen Technologie. Daher muß der Regulator sich nicht auf die Auskünfte von Firmen verlassen, die ihre Informationen oft strategisch zurückhalten. Vielmehr muß der Regulator „nur“ die Schadenfunktion kennen. Die Firmen müssen andererseits zum Zeitpunkt der Versteigerung der Optionen nur den Träger der Verteilung der Naturzustände kennen.

⁵⁰Um das maximal zulässige L_0 ermitteln zu können, muß der Regulator die $AMAC_0$ -Kurve kennen. Andererseits kann L_0 jedoch beliebig klein gewählt werden. Hat der Regulator daher keine Information über die $AMAC_0$ -Kurve, dann kann er auf Nummer sicher gehen, indem er $L_0 = 0$ setzt.

Kapitel 6

Innovation von Vermeidungstechnologien unter umweltpolitischen Instrumenten

Economists have devoted little attention to the optimal size and mix of public policies with regard to R&D.

Tirole [1994:409]

Im Literaturüberblick wurde gezeigt, daß ein überwiegender Teil der umweltökonomischen Literatur, die die Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente im Hinblick auf die Entwicklung neuer Technologien untersucht, davon ausgeht, daß der Innovator selbst der verschmutzenden Industrie angehört. DOWNING UND WHITE [1986] betrachten dabei die Innovation eines privaten Gutes durch eine Firma. Die neue Technologie führt zu einer Kosteneinsparung bei der innovierenden Firma. Die Innovation ist dabei spezifisch für die Firma, die sie tätigt, und kann nicht an andere Firmen verkauft oder durch andere Firmen (kostenlos) übernommen werden. MILLIMAN UND PRINCE [1989] betrachten hingegen die Innovation eines öffentlichen Gutes. Eine Innovation senkt in diesem Fall nicht nur die Vermeidungskosten der innovierenden Firma, sondern auch noch anderer Firmen, die die neue Technologie übernehmen. Beispiele für eine solche Erfindung sind Reinigungsprozesse für Abwasser und Abluft wie z.B. Kläranlagen

Branche	Anteil an Patenten (%)	
	angemeldet vom Maschinenbau	eingesetzt im Maschinenbau
Industrielle Emissionen in die Luft	81	5
Abwasser	83	2
Alternative Energien ⁵¹	85	8

Tabelle 6.1: *Die Maschinenbau-Branche als Erfinder und Anwender von Vermeidungstechnologien. Quelle: LANJOUW UND MODY [1995]*

oder Rauchgaswäschen. Aber auch ein umweltfreundlicherer Produktionsprozeß für das Outputgut, bei dem weniger Schadstoffe entstehen, kann darunter fallen. Man denke z.B. an wasserlösliche Lacke in der Automobilindustrie, mittels derer die Emissionen an Lösungsmitteln drastisch gesenkt werden konnten. Bei einem Zertifikateregime ergeben sich für den Innovator zwiespältige Anreize, da er die neue Technologie sowohl selbst einsetzen als auch verkaufen kann. Durch den Verkauf der Innovation kann der Innovator den Marktpreis für Zertifikate beeinflussen. Daher ist der Innovator kein Preisnehmer auf dem Zertifikatemarkt. Das Verhalten des Innovators ist vielmehr von strategischen Anreizen dominiert.⁵²

Es stellt sich jedoch die Frage, ob neue Technologien in der Regel überhaupt von denjenigen Firmen entwickelt werden, die sie dann einsetzen. LANJOUW UND MODY [1996] zeigen, daß in der Tat Zulieferer von Vermeidungstechnologien, und nicht die verschmutzenden Unternehmen selbst, den überwiegenden Anteil der Innovationen tätigen. So kommen 81% der technologischen Patente zur Abluftreinigung aus der Maschinenbaubranche, aber nur 5% aller Patente in diesem Bereich finden Anwendung in derselben Branche (siehe hierzu auch Tabelle 6.1). Ein Beispiel hierfür sind Filter und Rauchgaswaschanlagen von Kraftwerken, die Rußpartikel oder auch Gase wie z.B. SO₂ aus der Abluft entfernen. Ein anderes Beispiel sind Katalysatoren, die Schadstoffe in ungefährliche Gase umwandeln, oder auch Kläranlagen für Abwasser.

Dieser empirischen Beobachtung folgend werden in diesem Kapitel die Anreize eines

⁵¹Man beachte, daß man alternative Energien als CO₂-Vermeidungstechnologie betrachten kann.

⁵²FISCHER ET AL. [1998] betrachten die Möglichkeit, daß die neue Technologie imitiert werden kann. Durch Variieren des Grades der Imitation können sie Mischformen zwischen einem privaten und einem öffentlichen Gut abbilden.

Innovators betrachtet, der Zulieferer einer verschmutzenden Industrie ist. Insbesondere wird auch die Investitionsentscheidung der verschmutzenden Firmen wiederum endogen berücksichtigt. Das Modell umfaßt zwei Perioden. In der ersten setzt ein der verschmutzenden Industrie externer Innovator sein F&E-Niveau. Die Erfolgswahrscheinlichkeit der Entwicklungsaktivität hängt dabei von der Höhe der eingesetzten Ressourcen ab. Falls die Innovation erfolgreich ist, erhält der Innovator ein Patent auf die Entwicklung und kann seine neue Technologie in der zweiten Periode an die verschmutzenden Firmen verkaufen. Dabei werden sowohl die Anreize der verschmutzenden Firmen, die neue Technologie zu übernehmen, als auch die Innovationsanreize des Innovators untersucht. Wie schon im letzten Kapitel werden dabei zwei alternative Regulierungsszenarien angenommen: Zum einen eine Verpflichtung auf die Höhe des Instrumentes, zum anderen die optimale Anpassung der Höhe des Instrumentes an den technologischen Wandel. Abschließend wird der Einfluß der Höhe der Produktionskosten der neuen Technologie auf die Innovationsanreize diskutiert.

6.1 Das erweiterte Modell

Zunächst soll das Modell aus Kapitel 3 erweitert werden, um zusätzlich zur Diffusion einer neuen Technologie den Innovationsprozeß betrachten zu können. Der Vorgang der Innovation wird dabei auf einfache Weise modelliert. Es gibt einen potentiellen Innovator. Mit Wahrscheinlichkeit χ entdeckt er eine exogen gegebene Technologie I . Es sei daran erinnert, daß mit Technologie I Emissionen zu geringeren Grenzkosten vermieden werden können als mit der herkömmlichen Technologie 0, d.h. $-C'_I(e) < -C'_0(e)$ für $e < e_0^{\max}$. Die bei der Entwicklung der neuen Technologie entstehenden Kosten $R(\chi)$ fallen dabei unabhängig davon an, ob die Entwicklung erfolgreich ist oder nicht. Mit anderen Worten sind die F&E-Kosten irreversibel. Die F&E-Kosten haben folgende Eigenschaften:

$$R(0) = 0, \quad R'(0) = 0, \quad R'(1) = +\infty, \quad R' > 0 \quad \text{und} \quad R'' > 0 \quad \text{für} \quad \chi > 0 \quad .$$

Abbildung 6.1 illustriert den Zusammenhang zwischen der Erfolgswahrscheinlichkeit und den F&E-Kosten. Ohne einen Einsatz von Ressourcen, d.h. bei $R(0) = 0$, ist keine Innovation möglich. Die Bedingung $R'(0) = 0$ ist formal nicht notwendig, schließt aber eine Randlösung $R(0) = 0$ aus. Insgesamt steigt der Aufwand überproportional zu der Erfolgswahrscheinlichkeit. Ein sicherer Erfolg, d.h. $\chi = 1$, kann nicht erzwungen

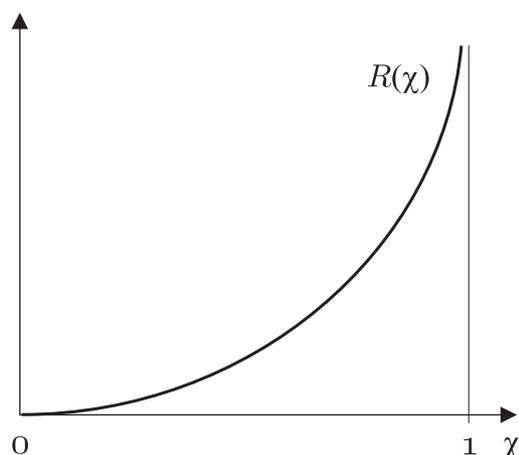


Abbildung 6.1: Abgetragen sind die F&E-Kosten in Abhängigkeit der Erfolgswahrscheinlichkeit der F&E.

werden. Hierfür wäre ein unendlicher F&E-Aufwand erforderlich. Wurde die neue Technologie erfolgreich entwickelt, dann kann sie sowohl kostenlos produziert als auch ohne zusätzliche fixe Kosten installiert werden. Diese Annahme trifft in der Praxis sicherlich selten zu. Ziel dieses Abschnittes ist es jedoch, den Einfluß der Wahl des umweltpolitischen Instrumentes auf den Erlös des Innovators und indirekt die Höhe der F&E-Aktivitäten zu untersuchen. In Abschnitt 6.4 wird untersucht werden, welchen Einfluß positive Produktionskosten auf den F&E-Aufwand des Innovators haben. Der Innovator erhält auf seine Entwicklung ein Patent. Als Monopolist kann er den Preis P , zu dem er die neue Technologie an die Firmen verkauft, selbst bestimmen. Die Anzahl der Lizenzen für die neue Technologie I , die der Innovator bei gegebenem Preis P verkaufen kann, wird im folgenden mit $n_I(P)$ bezeichnet. Insgesamt sind n identische potentielle Käufer auf dem Markt. Man beachte, daß $n_I(P)$ im allgemeinen von der Art der Regulierung, d.h. von dem umweltpolitischen Instrument, abhängt. Der erwartete Gewinn Π des Innovators ist damit gegeben durch

$$\Pi(\chi, P) = \chi n_I(P)P - R(\chi) \quad . \quad (6.1.1)$$

Das Optimierungsproblem (6.1.1) hat folgende Bedingungen erster Ordnung

$$n_I(P)P = R'(\chi) \quad , \quad (6.1.2)$$

$$n'_I(P)P \geq -n_I(P) \quad . \quad (6.1.3)$$

Laut Gleichung (6.1.2) sollte der Erlös aus dem Verkauf der neuen Technologie gleich den Grenzkosten der F&E-Aktivität χ sein. Der Erlös aus dem Verkauf der Lizenzen

sei mit $\Theta(P)$ bezeichnet, d.h. es gilt $\Theta(P) = n_I(P)P$. Weiterhin entspricht die Erfolgswahrscheinlichkeit χ der Umkehrfunktion der F&E-Grenzkosten, d.h. $\chi = \Gamma(\Theta) = R'(\Theta)^{-1}$. Insbesondere ist $\Gamma(\Theta)$ eine monoton steigende Funktion des Erlöses aus dem Verkauf der Erfindung. Damit wird das Aktivitätsniveau der F&E eindeutig durch die Höhe des Erlöses aus dem Verkauf der Erfindung bestimmt. Es sei darauf hingewiesen, daß die Erlösfunktion $\Theta(P)$ von der Art der Regulierung abhängt und im allgemeinen nicht stetig sein muß. Bedingung (6.1.3) besagt, daß der den Erlös maximierende Lizenzpreis P unabhängig vom Aktivitätsniveau χ der F&E ist. Im Fall einer inneren Lösung gilt $n'_I(P)P = -n_I(P)$, im Fall einer Randlösung $n'_I(P)P > -n_I(P)$.

In den folgenden Abschnitten soll nun die Regulierung durch einheitliche Emissionsstandards, Steuern, Subventionen und Zertifikate vorgestellt werden.

6.1.1 Steuern und Subventionen

Zunächst gehe man davon aus, daß der Regulator eine Emissionssteuer τ setzt. Kostenminimierende Firmen setzen ihre Emissionen so, daß gilt

$$-C'_i(e_i) = \tau \quad i = 0, I \quad .$$

Daraus ergeben sich eindeutige Emissionen $e_0 = e_0(\tau)$ bzw. $e_I = e_I(\tau)$ der Firmen ohne bzw. mit der neuen Vermeidungstechnologie. Zu gegebenem Steuersatz τ ist die Kostendifferenz ΔC zwischen den beiden Technologien gegeben durch

$$\Delta C(\tau) = [C_0(e_0) + \tau e_0] - [C_I(e_I) + \tau e_I] \quad . \quad (6.1.4)$$

Differenzieren von (6.1.4) nach τ ergibt mittels des Umhüllenden Satzes, daß die Kostendifferenz $\Delta C(\tau)$ mit dem Steuersatz steigt, d.h. $d\Delta C(\tau)/d\tau > 0$. Die Firmen haben genau dann einen Anreiz, in die neue Technologie zu investieren, wenn der Preis für die neue Technologie P geringer als die Ersparnis an Vermeidungskosten $\Delta C(\tau)$ ist. Die Kostendifferenz entspricht also der Zahlungsbereitschaft für die neue Technologie. Damit ist die Nachfragefunktion $n_I(P)$ für die neue Technologie gegeben durch

$$n_I(P) = \begin{cases} n & \text{für } P < \Delta C(\tau) \\ 0 & \text{für } P > \Delta C(\tau) \end{cases} \quad .$$

Man beachte, daß die Nachfragefunktion unstetig in P ist. Für $P = \Delta C(\tau)$ sind die Firmen indifferent zwischen den beiden Technologien. Da jedoch für ein beliebig kleines ε und einen Preis $P = \Delta C(\tau) - \varepsilon$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen,

kann man ohne Einschränkung der Allgemeinheit annehmen, daß die Firmen die neue Technologie auch bei einem Preis $P = \Delta C(\tau)$ kaufen. Nun kann man zu jedem Steuersatz den maximalen Erlös des Innovators berechnen. Es bezeichne $\Theta_t(\tau)$ die reduzierte Erlösfunktion des Innovators. Dann ist der maximale Erlös des Innovators $\Theta_t(\tau)$ als Funktion des Steuersatz τ gegeben durch

$$\Theta_t(\tau) = n \cdot \Delta C(\tau) \quad . \quad (6.1.5)$$

Nun betrachte man den Fall einer Subvention auf die Vermeidung von Emissionen. Hierzu sei unterstellt, daß der Regulator für jede Einheit an vermiedenen Emissionen eine Subvention ξ an die Firmen zahlt. Anstelle von Gleichung (6.1.4) erhält man nun

$$\Delta C(\xi) = [C_0(e_0) - \xi(e_0^{\max} - e_0)] - [C_I(e_I) - \xi(e_0^{\max} - e_I)] \quad . \quad (6.1.6)$$

Da sich $-\xi \cdot e_0^{\max}$ offensichtlich herauskürzt, ist die Kostenersparnis (6.1.6) äquivalent zu (6.1.4). Daraus ergibt sich folgendes Zwischenergebnis:

Lemma 6.1 (Steuern und Subventionen) *Die Industrie sei mittels einer Steuer τ oder einer Subvention ξ gleicher Höhe reguliert. In diesem Fall setzt der Innovator den Lizenzpreis nach einer erfolgreichen Innovation so, daß alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Die Erlösfunktion des Innovators ist gegeben durch $\Theta_t(\tau) = n \cdot \Delta C(\tau)$.*

6.1.2 Emissionsstandard

Nun sei eine Regulierung durch einen einheitlichen Emissionsstandard betrachtet. Bei gegebenem Standard s ist – bei leichtem Mißbrauch der Notation⁵³ – die Kostendifferenz zwischen den beiden Technologien gegeben durch

$$\Delta C(s) = C_0(s) - C_I(s) \quad . \quad (6.1.7)$$

Wiederum haben die Firmen genau dann einen Anreiz, bei einem Standard s die neue Technologie zu übernehmen, wenn diese geringere Kosten verursacht, d.h. falls die

⁵³Unter Steuern und Zertifikaten hängt die Kostendifferenz $\Delta C(\tau)$, bzw. $\Delta C(\sigma)$ vom Marktpreis für Emissionen, d.h. dem Steuersatz oder Zertifikatepreis ab. Unter Standards hingegen direkt vom Emissionsstandard s , d.h. $\Delta C(s)$.

Kostendifferenz (6.1.7) positiv ist. Damit sieht sich der Innovator folgender Nachfragefunktion gegenüber

$$n_I(P) = \begin{cases} n & \text{für } P < \Delta C(s) \\ 0 & \text{für } P > \Delta C(s) \end{cases} . \quad (6.1.8)$$

Wie auch bei Steuern ist die Nachfrage unstetig. Für $P = \Delta C(s)$ sind die Firmen indifferent zwischen den beiden Technologien. Da jedoch für ein beliebig kleines ε und einen Preis $P = \Delta C(s) - \varepsilon$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen, kann man auch hier ohne Einschränkung der Allgemeinheit annehmen, daß die Firmen die neue Technologie auch bei einem Preis $P = \Delta C(s)$ kaufen. Nun kann man zu jedem Standard den maximalen Erlös des Innovators berechnen. Es bezeichne $\Theta_s(s)$ die reduzierte Erlösfunktion des Innovators. Der maximale Erlös des Innovators in Abhängigkeit des Standards ist gegeben durch

$$\Theta_s(s) = n \cdot \Delta C(s) . \quad (6.1.9)$$

Man erhält folgendes Zwischenergebnis:

Lemma 6.2 (Emissionsstandards) *Die Industrie sei mittels eines Emissionsstandards s reguliert. In diesem Fall setzt der Innovator nach einer erfolgreichen Innovation den Lizenzpreis so, daß alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Die Erlösfunktion des Innovators ist gegeben durch $\Theta_s(s) = n \cdot \Delta C(s)$.*

6.1.3 Auktionierte und kostenlos ausgegebene Zertifikate

Abschließend sei angenommen, daß der Regulator L viele Zertifikate entweder versteigert oder kostenlos ausgibt. Kostenminimierende Firmen setzen

$$-C'_0(e_0) = \sigma \quad i = 0, I , \quad (6.1.10)$$

d.h. die Grenzvermeidungskosten müssen dem Marktpreis für Zertifikate σ entsprechen. Daraus ergeben sich eindeutige Emissionen $e_0 = e_0(\sigma)$ bzw. $e_I = e_I(\sigma)$ der Firmen ohne bzw. mit der neuen Vermeidungstechnologie. Die Kostenersparnis zwischen den beiden Technologien ist gegeben durch

$$\Delta C(\sigma) = [C_0(e_0) + \sigma e_0] - [C_I(e_I) + \sigma e_I] . \quad (6.1.11)$$

Differenzieren von Gleichung (6.1.11) nach σ ergibt – analog zu einem Steuerregime –, daß die Kostendifferenz mit dem Marktpreis σ fällt. Der Marktpreis für Zertifikate σ ist jedoch keine exogene Größe, sondern durch das Gleichgewicht auf dem Zertifikatemarkt

$$L = [n - n_I]e_0(\sigma) + n_I e_I(\sigma) \quad (6.1.12)$$

bestimmt. Es sei unterstellt, daß n_I viele Firmen die neue Technologie übernommen haben, und der markträumende Preis für Zertifikate gleich σ ist. Die Firmen mit herkömmlicher Technologie haben genau dann noch einen Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen, wenn $\Delta C(\sigma) > P$ gilt, d.h. falls die Kostenersparnis größer ist als der Preis für die neue Technologie. Andererseits bereuen⁵⁴ es die Firmen nicht, die neue Technologie übernommen zu haben, falls $\Delta C(\sigma) \leq P$ gilt. Unter der Annahme⁵⁵, daß die Anzahl der Firmen n hinreichend groß ist, so daß die Übernahme der neuen Technologie durch eine einzelne Firma (fast) keinen Einfluß auf den Marktpreis für Zertifikate hat, kann man folgende Definition treffen:

Definition 2 *Zu gegebenem Lizenzpreis P für die neue Technologie und gegebener Menge an Zertifikaten L wird ein Investitionsgleichgewicht auf dem Zertifikatemarkt durch ein Tupel (σ, n_I) charakterisiert, das folgende Gleichungen löst:*

i.) Im Fall $0 < n_I < n$

$$P = [C_0(e_0) + \sigma e_0(\sigma)] - [C_I(e_I) + \sigma e_I(\sigma)] \quad , \quad (6.1.13)$$

$$L = [n - n_I]e_0(\sigma) + n_I e_I(\sigma) \quad . \quad (6.1.14)$$

ii.) Im Fall $n_I = 0$:

$$P > [C_0(e_0) + \sigma e_0(\sigma)] - [C_I(e_I) + \sigma e_I(\sigma)] \quad ,$$

$$L = n e_0(\sigma) \quad .$$

⁵⁴Der Kauf der neuen Technologie verursacht irreversible Anschaffungskosten P hat. Deshalb würde eine Firma, die die neue Technologie bereits übernommen hat, auch im Fall $\Delta C(\sigma) < P$ nicht zur herkömmlichen Technologien zurückwechseln. Sie würde jedoch ihre zuvor getroffene Entscheidung, die neue Technologie zu übernehmen, „bereuen“.

⁵⁵Es sei daran erinnert, daß eine analoge Annahme bereits in Kapitel 3 getroffen wurde.

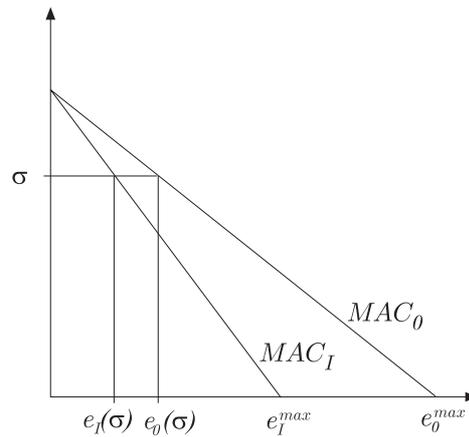


Abbildung 6.2:

iii.) Im Fall $n_I = n$:

$$P < [C_0(e_0) + \sigma e_0(\sigma)] - [C_I(e_I) + \sigma e_I(\sigma)] \quad ,$$

$$L = n e_I(\sigma) \quad .$$

Je mehr Firmen in die neue Technologie investieren, desto geringer ist zunächst die aggregierte Nachfrage nach Zertifikaten, d.h. die rechte Seite von Gleichung (6.1.14). Um den Zertifikatemarkt zu räumen, muß daher der Zertifikatepreis fallen. Ein fallender Zertifikatepreis verringert aber auch die Kostendifferenz zwischen den beiden Technologien. Im Anhang (Beweis zu Lemma 6.3) wird gezeigt, daß daher zu gegebener Anzahl an Zertifikaten die Nachfragefunktion $n_I(P)$ fallend ist. Der Innovator wird nach erfolgreicher Innovation einen den Erlös maximierenden Lizenzpreis setzen. Dieser sei mit P^{\max} bezeichnet. Die reduzierte Erlösfunktion ist dann gegeben durch $\Theta_p(L) = n_I(L, P^{\max}(L)) \cdot P^{\max}(L)$. Sowohl der den Erlös maximierende Lizenzpreis als auch die Nachfragefunktion hängen von der Anzahl an ausgegebenen Zertifikaten ab. Eine komparative Statik des Preissetzungsverhaltens des Innovators und der Nachfrage nach der neuen Technologie bezüglich der Anzahl an ausgegebenen Zertifikaten zeigt, daß die Steigung der Erlösfunktion unter folgender Annahme ein eindeutiges Vorzeichen hat:

Annahme 1 Die Grenzvermeidungskostenfunktionen $-C'_0(e)$ und $-C'_I(e)$ seien derart, daß die Emissionen der Firmen für jedes $\sigma > 0$ folgende Gleichung erfüllen:

$$e'_0(\sigma) - e'_I(\sigma) \leq 0 \quad .$$

Bei beliebigen konvexen Grenzvermeidungskostenfunktionen ist sowohl $[e'_0(\sigma) - e'_I(\sigma)] \leq 0$ als auch $[e'_0(\sigma) - e'_I(\sigma)] > 0$ möglich. Für $e'_0(\sigma) - e'_I(\sigma) \leq 0$ fallen die individuellen Emissionen unter der alten Technologie schneller als die individuellen Emissionen unter der neuen Technologie. Die neue, bessere Vermeidungstechnologie I verringert also die Grenzvermeidungskosten gegenüber der herkömmlichen Technologie 0 um so weniger, je mehr Emissionen vermieden werden. Aus technisch-physikalischer Sicht ist die Annahme $e'_0(\sigma) - e'_I(\sigma) \leq 0$ daher gut zu rechtfertigen. Man betrachte hierzu den Fall eines Kohlekraftwerkes. Der Aufwand, der erforderlich ist, um Schadstoffe wie SO_2 aus der Abluft eines solchen Kraftwerkes zu entfernen, ist um so größer, je geringer die Konzentration des Schadstoffes in der Abluft ist. Möchte man daher nur einen geringen Anteil des Schadstoffes aus der Abluft entfernen, so kann es verschiedene Technologien geben, die dies mit unterschiedlich hohem Aufwand bewerkstelligen. Soll hingegen ein sehr großer Teil des Schadstoffes aus der Abluft entfernt werden, dann wird der Aufwand für alle Technologien sehr hoch. Die Technologien unterscheiden sich wenig in ihrer Effektivität. In Abbildung 6.2 wird ein Beispiel linearer Grenzvermeidungskosten gegeben, die der Annahme 1 genügen.

Unter Ausnutzung der Annahme 1 ergibt sich schließlich folgendes Zwischenergebnis:

Lemma 6.3 (Zertifikate) *Es sei angenommen, daß der Regulator $L < E^{\max}$ viele Zertifikate entweder versteigert oder kostenlos ausgegeben hat. In diesem Fall existiert ein eindeutiges Investitionsgleichgewicht. Die reduzierte Erlösfunktion des Innovator ist gegeben durch*

$$\Theta_p(L) = n_I(L, P^{\max}(L)) \cdot P^{\max}(L) \quad .$$

Je weniger Zertifikate der Regulator ausgegeben hat, desto höher ist der Lizenzpreis $P^{\max}(L)$ für die neue Technologie. Insbesondere existiert ein $\hat{L} < E^{\max}$, so daß

- i.) für $L \leq \hat{L}$ die neue Technologie von allen Firmen übernommen wird, d.h. $n_I = n$,*
- ii.) für $L > \hat{L}$ die neue Technologie nur teilweise übernommen wird, d.h. $n_I < n$. Je weniger Zertifikate der Regulator ausgegebenen hat, desto mehr Firmen übernehmen die neue Technologie.*

Der Beweis findet sich im Anhang.

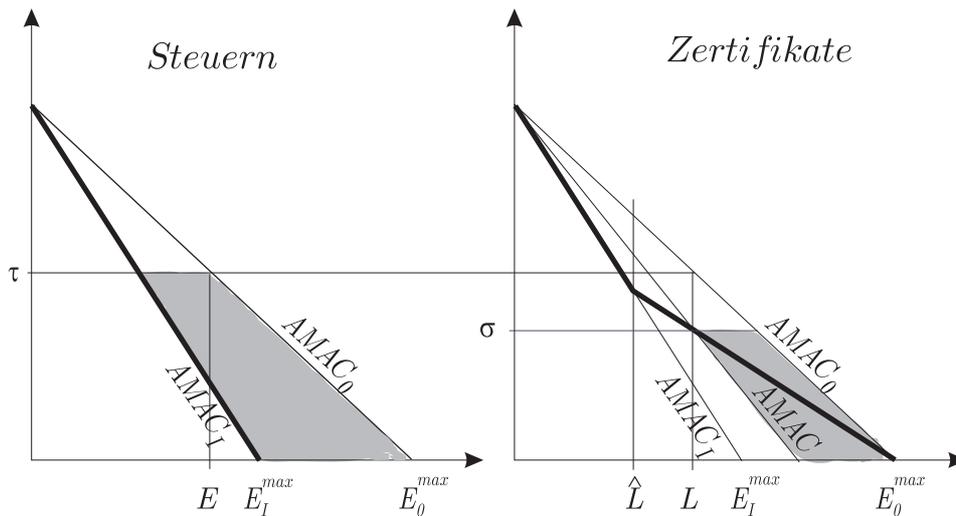


Abbildung 6.3: Dargestellt ist die Allokation bei Steuern, bzw. Zertifikaten, falls der Regulator sich auf ein aggregiertes Emissionsziel $E > \hat{L}$ verpflichtet hat.

Ein Zertifikateregime unterscheidet sich also insofern von einem Steuerregime, als daß im allgemeinen die neue Technologie nur von einem Teil der Firmen übernommen wird. Es sei daran erinnert, daß bei Steuern die Nachfragefunktion vollkommen elastisch ist und der Innovator daher den Lizenzpreis P immer so setzt, daß alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Bei Zertifikaten fällt hingegen der Preis für Zertifikate bei Übernahme der neuen Technologie. Da die Zahlungsbereitschaft für die neue Technologie um so geringer ist, je mehr Firmen die neue Technologie übernehmen, ist zu erwarten, daß der Innovator bei Zertifikaten einen geringeren Erlös erzielen wird als bei Steuern und Standards. Man betrachte hierzu Abbildung 6.3. Dargestellt sind die aggregierten Grenzvermeidungskostenkurven im Fall, daß alle Firmen die neue Technologie übernehmen ($AMAC_I$), im Fall daß keine Firma die neue Technologie übernimmt ($AMAC_0$) und im Fall einer partiellen Diffusion ($AMAC$). Die dicke schwarze Kurve beschreibt die Allokationen in Abhängigkeit von der Höhe des umweltpolitischen Instrumentes. Bei *Steuern* der Höhe $\tau > 0$ übernehmen alle Firmen die neue Technologie. Die Gesamtemissionen sind gegeben durch $E(\tau) = ne_I(\tau)$. Bei *Zertifikaten* kann es hingegen zu einer teilweisen Diffusion der neuen Technologie kommen. Je kleiner das aggregierte Emissionsziel, desto mehr Firmen übernehmen die neue Technologie. Bildlich gesprochen dreht sich die $AMAC$ -Kurve weg von der $AMAC_0$ und hin zur $AMAC_I$ -Kurve. Die Allokation ist durch den Schnittpunkt aus dem aggregierten

Emissionsziel $E = L$ mit der korrespondierenden *AMAC*-Kurve bestimmt. Für ein Emissionsziel $E \leq \hat{L}$ liegt der Schnittpunkt auf der *AMAC_I*-Kurve, d.h. alle Firmen übernehmen die neue Technologie.

Bevor im folgenden auf diesen Zusammenhang im Rahmen mehrerer Szenarien näher eingegangen wird, soll zunächst die sozial optimale Allokation hergeleitet werden.

6.2 Das soziale Optimum

Im folgenden betrachte man das Optimierungsproblem eines sozialen Planers. Abhängig davon, ob die Entwicklung erfolgreich war oder nicht, würde er die aggregierten Emissionen E in jeder Periode effizient setzen. War die Innovation nicht erfolgreich, dann ergeben sich in Periode 2 die sozialen Kosten zu

$$SC_0(e_0) = nC_0(e_0) + D(ne_0) \quad .$$

Die Optimalitätsbedingung lautet $-C'_0(e_0) = D'(ne_0)$. Es sei \bar{e}^* die Lösung dieser Gleichung. In diesem Fall sind die optimalen aggregierten Emissionen durch $\bar{E}^* = n\bar{e}^*$ gegeben. Der optimale Grenzscha-den sei durch $\overline{MD}^* = D'(\bar{E}^*)$ bezeichnet. Da bei der Übernahme der neuen Technologie keine Fixkosten anfallen, ist es andererseits offensichtlich sozial optimal, daß alle Firmen mit der neuen Technologie vermeiden, falls die Innovation erfolgreich war,⁵⁶ d.h.

$$SC_I(e_I) = nC_I(e_I) + D(ne_I) \quad .$$

Die Optimalitätsbedingung lautet nun $-C'_I(e_I) = D'(ne_I)$. Es sei \underline{e}^* die Lösung dieser Gleichung. In diesem Fall sind die optimalen aggregierten Emissionen durch $\underline{E}^* = n\underline{e}^*$ gegeben. Der optimale Grenzscha-den sei in diesem Fall mit $\underline{MD}^* = D'(\underline{E}^*)$ bezeichnet.

Der *soziale Wert* der Innovation kann als die Differenz zwischen den optimalen totalen sozialen Kosten mit bzw. ohne erfolgreiche Entwicklung der neuen Technologie definiert werden, d.h.

$$\Delta SC := [nC_0(\bar{e}^*) + D(n\bar{e}^*)] - [nC_I(\underline{e}^*) + D(n\underline{e}^*)] \quad .$$

⁵⁶Im letzten Kapitel wurden die Fixkosten als Installationskosten interpretiert und gingen daher in die sozialen Kosten ein. Man erinnere sich, daß in diesem Fall im allgemeinen eine partielle Übernahme der neuen Technologie sozial optimal ist.

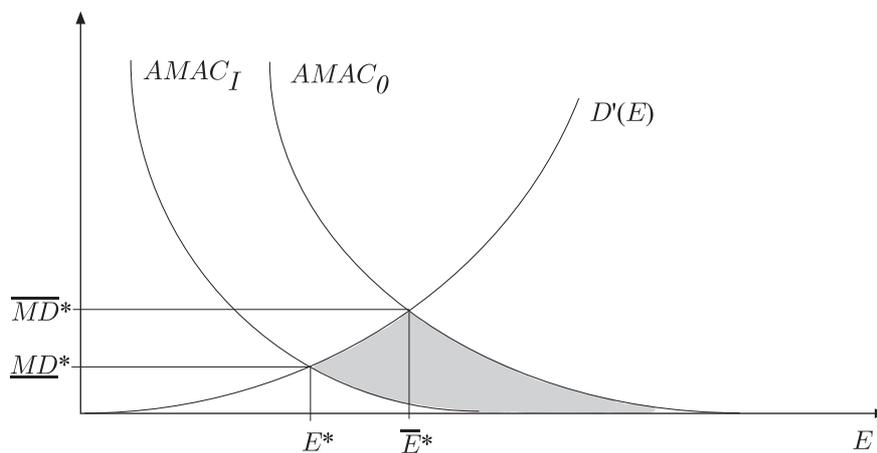


Abbildung 6.4:

Bezüglich des sozial optimalen F&E-Niveaus ergibt sich für einen sozialen Planer folgendes Optimierungsproblem

$$\min_{\chi} \{ \chi SC_I(\underline{e}^*) + (1 - \chi) SC_0(\bar{e}^*) + R(\chi) \} \quad .$$

Eine optimale Lösung erfordert $R'(\chi) = \Delta SC$, d.h. das F&E-Niveau χ^* sollte optimalerweise so gewählt werden, daß die Grenzkosten der F&E gleich dem sozialen Wert der Innovation sind. Es läßt sich also folgendes Resultat zusammenfassen:

Proposition 6.1 (Soziales Optimum) *Das optimale F&E-Niveau ist gegeben durch $R'(\chi^*) = \Delta SC$. Im Falle erfolgreicher Innovation sollten alle Firmen die neue Technologie übernehmen.*

Abbildung 6.4 zeigt die aggregierten Grenzvermeidungskosten, falls keine Firma investiert ($AMAC_0$) und falls alle Firmen investieren ($AMAC_I$). Die sozial optimalen Emissionen sind \bar{E}^* im Falle ohne und \underline{E}^* mit neuer Technologie. Die graue Fläche entspricht dem sozialen Wert der Innovation.

6.3 Umweltpolitische Instrumente

Nun soll die Anreizwirkung der umweltpolitischen Instrumente in F&E untersucht und die resultierenden Allokationen mit dem sozialen Optimum verglichen werden. Dabei sei angenommen, daß der Regulator an seinem einmal gewählten umweltpolitischen

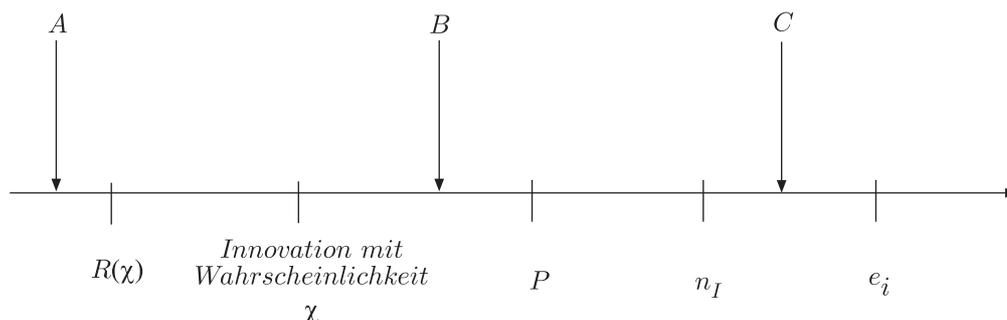


Abbildung 6.5: Dargestellt ist die zeitliche Struktur des Spiels. Unter Szenario A legt sich der Regulator auf die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes fest, bevor der Innovator über sein R&D Niveau entscheidet. In Szenario B reagiert der Regulator unmittelbar auf die Innovation, in Szenario C paßt er die Höhe des Instrumentes nach erfolgter Diffusion der neuen Technologie an.

Instrument festhält. Prinzipiell stehen dem Regulator zwei mögliche Vorgehensweisen zu Verfügung. Er kann sich verpflichten, die einmal festgesetzte Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes nicht mehr zu ändern *oder* die Höhe seines Instrumentes an den technischen Fortschritt anzupassen. Im nächsten Abschnitt soll zunächst auf eine Selbstverpflichtung des Regulators hinsichtlich der Höhe des umweltpolitischen Instrumentes eingegangen werden. Dieser Fall wird im folgenden als Szenario A beschrieben. Abschnitt 6.3.2 untersucht dagegen, wie sich die Anreize in F&E ändern, falls der Regulator ankündigt, die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes anzupassen, *nachdem* er die Innovation beobachtet hat (Szenario B) bzw. *nachdem* die Firmen die neue Technologie übernommen haben (Szenario C). Abbildung 6.5 illustriert den zeitlichen Ablauf der verschiedenen Szenarien.

6.3.1 Szenario A

Zunächst stelle man sich ein Szenario vor, in dem der Regulator ein aggregiertes Emissionsziel \hat{E} durchsetzen will, indem er entweder eine Steuer oder einen Emissionsstandard setzt oder indem er Zertifikate ausgibt. Dabei sei unterstellt, daß der Regulator den Zusammenhang zwischen den Kosten der Innovation und der Erfolgswahrschein-

lichkeit von F&E nicht kennt, d.h. dem Regulator ist $R(\chi)$ nicht bekannt.⁵⁷ Im folgenden werden die umweltpolitischen Instrumente daher anhand eines – aus der Politik vorgegebenen – Emissionszieles verglichen..

6.3.1.1 Aggregiertes Emissionsziel

Es sei angenommen, daß sich der Regulator, analog zu Abschnitt 4.1 des letzten Kapitels, über einen hinreichend langen Zeitraum auf die bezüglich der herkömmlichen Technologie optimalen Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes verpflichtet hat. Ohne regulierende Eingriffe werden die Firmen insgesamt $E^{\max} = ne^{\max}$ viele Emissionen ausstoßen. Um ein aggregiertes Emissionsziel $\hat{E} < E^{\max}$ zu erreichen, wird der Regulator folglich einen Steuersatz $\tau = AMAC_0(\hat{E})$ oder einen einheitlichen Emissionsstandard $s = \hat{E}/n$ setzen bzw. $L = \hat{E}$ viele Zertifikate ausgeben.

Mittels Lemmata 6.1 und 6.2 ergibt ein Vergleich der umweltpolitischen Instrumente bezüglich ihrer Anreizwirkung auf F&E folgendes Ergebnis:

Proposition 6.2 (Aggregiertes Emissionsziel) *Es sei angenommen, daß die Industrie einen aggregierten Emissionsstandard \hat{E} mit $0 < \hat{E} < E^{\max}$ einhalten muß. Darüber hinaus hat der Regulator sich für einen hinreichend langen Zeitraum auf die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes verpflichtet. In diesem Fall können die umweltpolitischen Instrumente bezüglich ihrer Anreizwirkung in F&E folgendermaßen eingereicht werden:*

$$\text{Steuern} > \text{Standards} > \text{Zertifikate}$$

Bei Steuern und Standards kommt es im Fall erfolgreicher F&E zu vollständiger Übernahme, während bei Zertifikaten im allgemeinen nur ein Teil der Firmen die neue Technologie übernehmen wird. Im Fall von Steuern sinken die aggregierten Emissionen E mit Übernahme der neuen Technologie und sind folglich geringer als das ursprüngliche Emissionsziel \hat{E} .

⁵⁷Im Falle vollkommener Information würde ein wohlwollender Regulator die Höhe des Emissionszieles so setzen, daß die erwarteten sozialen Kosten minimiert würden. Dieses optimale Emissionsniveau würde sich im allgemeinen von Instrument zu Instrument unterscheiden. Die Annahme vollkommener Information ist jedoch wenig realistisch. Meist kennt der Regulator nicht einmal die Eigenschaften einer potentiellen Technologie. Die Kosten der Entwicklung dieser Technologie sind für ihn noch schwieriger zu erfassen.

Der Beweis findet sich im Anhang. Die Intuition ist folgende: Sowohl Zertifikate, als auch Emissionsstandards sind aggregierte Mengenmechanismen. Bei Zertifikaten profitieren Firmen jedoch von der Übernahme der neuen Technologie durch andere Firmen, da die Emissionen zwischen den Firmen gehandelt werden können. Je mehr Firmen die neue Technologie übernehmen, desto geringer sind die aggregierten Grenzvermeidungskosten und damit auch die Zahlungsbereitschaft aller Firmen. Dieser externe Effekt der Investition einer Firma auf die Zahlungsbereitschaft aller Firmen schmälert den Erlös und damit die Anreize in F&E des Innovators im Vergleich zu Emissionsstandards. Da die Höhe der Steuern bzw. Subventionen und damit auch die Grenzvermeidungskosten der Firmen nach Übernahme der neuen Vermeidungstechnologie unverändert bleiben, sinken die aggregierten Emissionen auf $E_I = ne_I < \hat{E}$.

Aus den bisherigen Resultaten allein, nämlich daß eine Steuer höhere Anreize bietet als Zertifikate oder Standards kann man jedoch nicht schließen, daß eine Steuer das bessere Instrument aus Sicht eines sozialen Planers ist. Man beachte, daß für ein sozial optimales F&E-Niveau χ^* der Erlös des Innovators dem sozialen Wert der Innovation entsprechen muß. Der Erlös des Innovators hängt jedoch von dem gewählten Instrument und von der Höhe dieses umweltpolitischen Instrumentes ab. Um die umweltpolitischen Instrumente daher mit dem sozialen Optimum vergleichen zu können, muß man sich auf ein bestimmtes aggregiertes Emissionsziel festlegen.

6.3.1.2 Ursprünglich optimales Emissionsziel

Eine naheliegende Möglichkeit des Regulators ist, die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes bezüglich der herkömmlichen Technologie optimal zu setzen und sich auf diese Höhe für eine hinreichend lange Zeit selbstzuverpflichten.⁵⁸ Im folgenden bezeichne χ_t , χ_p bzw. χ_s die gleichgewichtige Erfolgswahrscheinlichkeit im Fall von Steuern, Zertifikaten bzw. Standards. Dann erhält man folgendes Resultat:

Proposition 6.3 (Szenario A) *Es sei angenommen, daß der Regulator das Emissionsziel in Bezug auf die herkömmliche Technologie optimal gesetzt hat, d.h. es gilt $\hat{E} = \bar{E}^*$. Darüber hinaus hat er sich für einen hinreichend langen Zeitraum auf die Höhe des Instrumentes selbstverpflichtet. In diesem Fall*

⁵⁸Man erinnere sich an die Erläuterungen aus Abschnitt 4.1. Eine mögliche Erklärung dafür, daß der Regulator sich bezüglich der alten Technologie verpflichtet, ist, daß er mittelfristig keine neue Technologie erwartet.

- i.) kommt es bei Steuern und Subventionen zu Überinvestitionen in F&E, d.h. $\chi_t > \chi^*$. Im Fall erfolgreicher Innovation wird die neue Technologie vollständig übernommen, d.h. $n_I = n$. Die aggregierten Emissionen sind niedriger als sozial optimal, d.h. $E < \underline{E}^*$.
- ii.) Bei Zertifikaten kommt es zu Unterinvestitionen in F&E, d.h. $\chi_p < \chi^*$. Im Fall erfolgreicher Innovation wird die neue Technologie
- a.) nur von einem Teil der Firmen übernommen, falls $\bar{E}^* > \hat{L}$,
 - b.) von allen Firmen übernommen, falls $\bar{E}^* \leq \hat{L}$.
- iii.) Bei Standards kommt es zu Unterinvestitionen in F&E, d.h. $\chi_s < \chi^*$. Im Fall erfolgreicher Innovation wird die neue Technologie jedoch vollständig übernommen, d.h. $n_I = n$.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Der Vergleich der relativen Anreizwirkung von Steuern, Standards und Zertifikaten aus Proposition 6.2 gilt auch im speziellen Fall, der in Proposition 6.3 charakterisiert wird. Der ursprünglich gesetzte *Steuersatz* ist nach erfolgreicher Innovation höher als der sozial optimale Preis für Emissionen. Dies hat zur Folge, daß die Zahlungsbereitschaft und damit der Erlös des Innovators höher ist als sozial optimal. Bei *Zertifikaten* ist hingegen die ursprünglich ausgegebene Menge an Zertifikaten nach erfolgreicher Entwicklung der neuen Technologie höher als die sozial optimale Menge an Emissionen. Zusätzlich senkt der in Abschnitt 6.1.3 erläuterte Trittbrettfahereffekt die Zahlungsbereitschaft der Firmen. Daher ist der Erlös des Innovators suboptimal. Bei *Standards* ist die ursprüngliche Emissionsobergrenze ebenfalls zu hoch (d.h. die Regulierung zu „lasch“), sobald die neue Technologie existiert. Als Folge ist die Zahlungsbereitschaft bzw. der Erlös des Innovators ebenfalls suboptimal.

Szenario A ist nicht ex-post effizient. Laut Abschnitt 6.2 sind die effizienten aggregierten Emissionen bei vollständiger Übernahme der neuen Technologie gleich \underline{E}^* . Das ursprüngliche Emissionsziel nach erfolgreicher Einführung der neuen Technologie ist daher nicht mehr länger optimal. Bei Steuern sind die aggregierten Emissionen zu niedrig und die Grenzvermeidungskosten zu hoch verglichen mit dem sozialen Optimum. Bei Standards und Zertifikaten sind hingegen die aggregierten Emissionen zu

hoch. Im Falle von Steuern würde der Regulator daher nachträglich gerne den Steuersatz senken, im Falle von Zertifikaten und Emissionsstandards hingegen das aggregierte Emissionsniveau.

Besitzt der Regulator vollkommene Informationen, insbesondere auch über die neue Technologie, sobald sie entwickelt ist, dann könnte er die Höhe des Instrumentes *nachträglich* optimal an die neue Technologie anpassen. Es sei daran erinnert, daß bei *Steuern* und *Standards* bereits alle Firmen investiert haben. Der Regulator muß nachträglich also „nur“ für eine effiziente Allokation der aggregierten Emissionen sorgen, um das soziale Optimum zu erreichen. Bei *Zertifikaten* hatten im allgemeinen jedoch nicht alle Firmen die neue Technologie übernommen. Verringert der Regulator die Anzahl an Zertifikaten, dann wird zunächst der Marktpreis für Zertifikate steigen. Dadurch werden weitere Firmen einen Anreiz erhalten, die neue Technologie zu übernehmen. Da der Regulator jedoch nur ein Instrument zur Hand hat, kann er in der Regel nicht beides, sowohl eine vollständige Übernahme der neuen Technologie als auch eine effiziente Allokation der Emissionen sicherstellen. Dieses Problem wird im nächsten Abschnitt aufgegriffen werden. Man beachte jedoch, daß der Regulator offensichtlich bei keinem Instrument die Möglichkeit hat, nachträglich die Höhe der F&E-Aufwendungen zu korrigieren. Schließlich ist die Innovationsentscheidung zum Zeitpunkt der (nicht-antizipierten) Anpassung durch den Regulator schon gefallen.

6.3.2 Anpassung der Höhe des Instrumentes

Im folgenden werden zwei alternative Szenarien betrachtet, in denen die Firmen antizipieren, daß der Regulator auf die Innovation bzw. Diffusion der neuen Technologie reagiert. Eine Möglichkeit ist, daß sich der Regulator verpflichtet, die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes anzupassen, unmittelbar nachdem die Innovation beobachtbar ist, d.h. *bevor* sie auf den Markt kommt. Alternativ dazu kann er sich aber auch verpflichten, die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes an die Diffusion, d.h. *nach* Übernahme der neuen Technologie durch die Firmen, anzupassen. Für beide Alternativen gilt, daß die Firmen – im Gegensatz zu Szenario A – eine Reaktion des Regulators antizipieren. Die zwei genannten Alternativen sind in Abbildung 6.3 illustriert. Das erste Szenario ist mit B, das zweite mit C gekennzeichnet. Welches Szenario realistischer ist, hängt sowohl von den Vorteilen ab, die sich die Spieler ausrechnen, falls sie zuerst ziehen, als auch von der Möglichkeit, als erster ziehen zu können. Im

allgemeinen können sich Firmen schneller an eine neue Situation anpassen als eine Regierungsbehörde, die unter Umständen auf parlamentarische Zustimmung angewiesen ist. Auf der anderen Seite werden Firmen ihre Investition zurückstellen, falls es zu ihrem Vorteil ist, und ihrerseits eine Aktion des Regulators abwarten. Im nächsten Abschnitt soll zunächst Szenario B und daraufhin, in Abschnitt 6.3.2.2, Szenario C erörtert werden.

6.3.2.1 Szenario B: Anpassung nach erfolgreicher Innovation

Zunächst soll davon ausgegangen werden, daß der Regulator sich verpflichtet, die Höhe des Instrumentes anzupassen, *nachdem* die Innovation erfolgreich war, doch *bevor* die Firmen sie möglicherweise übernehmen. Ein solches Szenario (im folgenden Spiel B genannt) hat die folgenden, aufeinander abfolgenden Schritte:

1. Der Innovator setzt sein F&E-Niveau.
2. Der Regulator paßt die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes an, falls der Innovator erfolgreich war. Darüber hinaus verpflichtet sich der Regulator, dieses Niveau des umweltpolitischen Instrumentes für einen hinreichend langen Zeitraum nicht mehr zu verändern.
3. Der Innovator legt den Lizenzpreis P für die neue Technologie fest.
4. Die Firmen entscheiden sich, welche Technologie sie einsetzen werden und legen ihr Emissionsniveau fest.

Im folgenden soll das teilspielperfekte Gleichgewicht dieses Spiels charakterisiert werden.

Standards

Zunächst betrachte man den Fall, daß die Industrie durch einen einheitlichen Emissionsstandard reguliert ist. Es ist bereits bekannt, daß der Innovator im Fall erfolgreicher Innovation aufgrund der vollkommen elastischen Nachfragefunktion (6.1.8) seinen Lizenzpreis so setzen wird, daß alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Damit sind die sozialen Kosten durch die Summe aus Schaden und den aggregierten Vermeidungskosten der neuen Technologie gegeben, d.h.

$$SC(s) = nC_I(s) + D(ns) \quad .$$

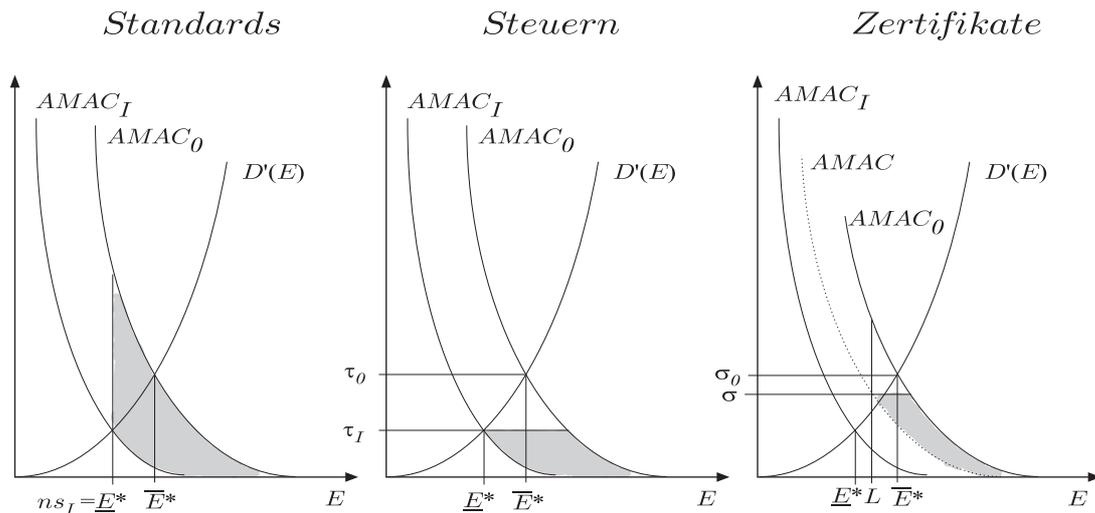


Abbildung 6.6: Die grauen Flächen entsprechen den Erlösen des Innovators in Szenario B.

Die Optimalitätsbedingung erfordert $C'_I(s) = D'(ns)$. Der optimale Emissionsstandard entspricht also $s = \underline{e}^*$. Man erhält folgendes Resultat:

Proposition 6.4 (Standards) *Es sei angenommen, daß die Industrie mittels eines einheitlichen Emissionsstandards reguliert ist. In diesem Fall ist das teilspielperfekte Gleichgewicht des Spiels B charakterisiert durch Überinvestition in F&E, d.h. $\chi_s > \chi^*$, und*

- i) $s = \underline{e}^*$, $n_I = n$ im Fall erfolgreicher Innovation,
- ii.) $s = \bar{e}^*$, $n_I = 0$ im Fall nicht erfolgreicher Innovation.

Der Beweis findet sich im Anhang. Hinter dem Resultat steckt folgende Intuition: Im Falle erfolgreicher Innovation wird der Regulator den Standard verringern. Dies erhöht die Zahlungsbereitschaft der verschmutzenden Firmen für die neue Technologie. Dabei übersteigt die aggregierte Zahlungsbereitschaft der verschmutzenden Firmen den sozialen Wert der neuen Technologie (siehe auch Abb. 6.6).

Steuern

Nun sei unterstellt, daß die Industrie mittels Steuern reguliert ist. Wiederum ist bereits bekannt, daß der Innovator im Fall erfolgreicher Innovation den Lizenzpreis P so setzen

wird, daß alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Die sozialen Kosten sind dann gegeben durch

$$SC(\tau) = nC_I(e_I(\tau)) + D(ne_I(\tau)) \quad .$$

Optimalität erfordert $-C'_I(e_I) = D'(ne_I)$. Dies entspricht einem optimalen Steuersatz $\tau = D'(\underline{E}^*)$. Man erhält folgendes Ergebnis:

Proposition 6.5 (Steuern) *Es sei angenommen, daß die Industrie mittels Steuern reguliert ist. Dann ist das teilspielperfekte Nash-Gleichgewicht des Spiels B charakterisiert durch Unterinvestition in F&E, d.h. $\chi_t < \chi^*$, und*

$$i.) \quad \tau = D'(\underline{E}^*), \quad e = \underline{e}^*, \quad n_I = n \text{ im Fall erfolgreicher Innovation,}$$

$$ii.) \quad \tau = D'(\overline{E}^*), \quad e = \overline{e}^*, \quad n_I = 0 \text{ im Fall nicht erfolgreicher Innovation.}$$

Der Beweis findet sich im Anhang. Die Intuition für das suboptimale F&E-Niveau ist die folgende. Im Falle erfolgreicher Innovation wird der Regulator den Steuersatz senken. Dies verringert die Zahlungsbereitschaft der verschmutzenden Firmen für die neue Technologie. Der Erlös des Innovators sinkt dabei unter den sozialen Wert der neuen Technologie (siehe wiederum Abb. 6.6).

Zertifikate

Zuletzt betrachte man eine Industrie, welche mittels Zertifikate reguliert ist. Im Fall erfolgreicher Innovation wird der Innovator wiederum einen den Erlös maximierenden Lizenzpreis P^{\max} setzen. Daraufhin werden $n_I(P^{\max})$ viele Firmen die neue Technologie übernehmen. Man erinnere sich, daß sowohl $P^{\max}(L)$ als auch $n_I(P^{\max}(L), L)$ von der Anzahl an Zertifikaten abhängen, die der Regulator ausgibt. Insbesondere existiert laut Lemma 6.3 ein \widehat{L} , so daß nur ein Teil der Firmen die neue Technologie übernimmt, falls der Regulator mehr als \widehat{L} viele Zertifikate ausgibt. Im Gegensatz zu einer Regulierung mittels Steuern oder Standards ist nun also im allgemeinen keine vollständige Diffusion der neuen Technologie zu erwarten.

In Stufe 2 des Spiels minimiert der Regulator die sozialen Kosten

$$SC(L) = n_I(P^{\max}, L)C_I(e_I(\sigma)) + (n - n_I(P^{\max}, L))C_0(e_0(\sigma)) + D(L) \quad ,$$

Optimalität erfordert also

$$D'(L) = \frac{dn_I(P^{\max}, L)}{dL} \underbrace{[C_0(e_0) - C_I(e_I)]}_{>0} - \underbrace{\left[n_I(P^{\max}, L) \frac{dC_I(e_I)}{dL} + (n - n_I(P^{\max}, L(F))) \frac{dC_0(e_0)}{dL} \right]}_{>0}. \quad (6.3.1)$$

Der Grenzschaten ist gleich der Summe aus zwei Komponenten. Der erste Term auf der rechten Seite von Gleichung (6.3.1) stellt die Veränderung der aggregierten Vermeidungskosten dar, die sich ergibt, wenn eine weitere Firma die neue Technologie übernimmt. Man beachte, daß das totale Differential von n_I zwei Terme enthält:

$$\frac{dn_I(P^{\max}, L)}{dL} = \underbrace{\frac{\partial n_I(P^{\max}, L)}{\partial L}}_{<0} + \underbrace{\frac{\partial n_I(P^{\max}, L)}{\partial P^{\max}} P^{\max \prime}(L)}_{>0}.$$

Bei einer Variation von L spielt also sowohl ein direkter (durch Veränderung der Anzahl an Zertifikaten) als auch ein indirekter (durch eine Veränderung der Lizenzgebühr) Effekt eine Rolle. Aus Lemma 6.3ii) ist aber bereits bekannt, daß unter Ausnutzung von Annahme 1 der direkte Effekt den indirekten dominiert. Der zweite Term auf der rechten Seite von Gleichung (6.3.1) entspricht schließlich der Veränderung der Vermeidungskosten aller Firmen durch eine Verringerung der Menge ausgegebener Zertifikate.⁵⁹ Man erhält somit folgendes Resultat:

Proposition 6.6 (Zertifikate) *Es sei angenommen, daß die Industrie mittels eines Zertifikateregimes reguliert ist. In diesem Fall ist das teilspielperfekte Nash-Gleichgewicht des Spiels B folgendermaßen charakterisiert:*

i) *Im Fall erfolgreicher Innovation gilt*

a.) $D'(L) = \sigma, \quad L = \underline{E}^* \text{ und } n_I = n, \text{ falls } \underline{E}^* \leq \hat{L}.$

b.) $D'(L) < \sigma, \quad L > \hat{L} \text{ und } 0 < n_I < n, \text{ falls } \underline{E}^* > \hat{L}.$

ii.) *Im Fall nicht erfolgreicher Innovation gilt* $L = \overline{E}^* \text{ und } n_I = 0.$

⁵⁹Wendet man im 2. Term in Gleichung (6.3.1) die Kettenregel an, ergibt sich $\frac{dC_i(e_i)}{dL} = C'_i(e_i)\sigma'(L)$ mit $i = 0, I$.

Im Fall $\underline{E}^* \leq \hat{L}$ sind die F&E-Anreize suboptimal, im Fall $\underline{E}^* > \hat{L}$ ergibt sich kein eindeutiges Resultat.

Der Beweis folgt unmittelbar aus Lemma 6.3 und Gleichung (6.3.1).

Bei Zertifikaten kann der Regulator im Fall $\underline{E}^* > \hat{L}$ nicht beides, zum einen vollständige Diffusion der neuen Technologie, zum anderen eine optimale Allokation der Emissionen, gleichzeitig steuern. Aufgrund der fallenden Nachfragefunktion $n_I(P)$ ist der Innovator in der Regel nicht an einer vollständigen Diffusion interessiert. Die Optimierung seines Erlöses erfordert vielmehr einen Lizenzpreis, zu dem nur ein Teil der Firmen die neue Technologie übernimmt. Man betrachte hierzu noch einmal Abbildung 6.3. $AMAC_0$ und $AMAC_I$ bezeichnen die aggregierten Grenzvermeidungskosten, falls keine bzw. alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Es seien $AMAC$ die aggregierten Grenzvermeidungskosten, falls es nur zu teilweiser Übernahme der neuen Technologie kommt. Diese sind um so geringer, je mehr Firmen die neue Technologie übernehmen. Insbesondere gilt $AMAC_I(E) < AMAC(E) < AMAC_0(E)$ für $E < E^{\max}$. Der Marktpreis für Zertifikate im Investitionsleichgewicht sei σ . Dann entspricht die grau schraffierte Fläche dem Erlös des Innovators. Man beachte, daß der Regulator ex-post einen Anreiz hat, zusätzliche Zertifikate auszuteilen, wenn der Grenzschaten niedriger als die aggregierten Grenzvermeidungskosten ist. Eine Steigerung der Anzahl der Zertifikate erhöht den Grenzschaten und senkt die aggregierten Grenzvermeidungskosten. Der Regulator kann also nachträglich zumindest ein effizientes Emissionsniveau, d.h. $D'(L) = AMAC(L)$, herstellen. Die Selbstverpflichtung des Regulators, die Menge an Zertifikaten nach erfolgter Diffusion nicht mehr zu verändern, ist daher nicht zeitkonsistent. Man beachte, daß die Zahlungsbereitschaft der Firmen für die neue Technologie in Erwartung weiterer Zertifikate, und daher eines fallenden Zertifikatepreises, in diesem Fall sinkt.

6.3.2.2 Szenario C: Anpassung nach erfolgter Diffusion

Nicht in allen Fällen kann der Regulator den Erfolg einer Innovation beobachten. Abschließend sei daher eine Situation betrachtet, in der der Regulator ankündigt, sein umweltpolitisches Instrument anzupassen, *nachdem* die Firmen die neue Technologie übernommen haben. Dieses Szenario (im folgenden Spiel C genannt) hat folgende Schritte:

1. Der Innovator setzt sein F&E-Niveau. Bei Erfolg legt er den Lizenzpreis P fest.
2. Die Firmen entscheiden über den Technologiewechsel.
3. Der Regulator paßt die Höhe des Instrumentes optimal an die Diffusion der neuen Technologie an.
4. Die Firmen passen ihre Emissionen an.

Im folgenden soll wiederum das teilspielperfekte Gleichgewicht dieses Spiels charakterisiert werden.

Standards

Zunächst betrachte man wiederum den Fall, daß die Industrie mittels eines einheitlichen Emissionsstandards reguliert ist. Die Firmen werden also $e_i = s$ viele Emissionen ausstoßen. Der Regulator wird den Emissionsstandard in der 3. Stufe so setzen, daß die sozialen Kosten minimiert werden. Haben n_I viele Firmen die neue Technologie übernommen, dann ergibt sich daher folgendes Optimierungsproblem

$$\min_s \{n_I C_I(s) + (n - n_I) C_0(s) + D(ns)\} \quad .$$

Laut der Bedingung erster Ordnung,

$$-\frac{1}{n} [n_I C'_I(s) + (n - n_I) C'_0(s)] = D'(ns) \quad , \quad (6.3.2)$$

wird der Regulator den Standard so setzen, daß die *durchschnittlichen* Grenzvermeidungskosten dem aggregierten Grenzscha-den entsprechen. Im Fall einer vollständigen Diffusion, d.h. $n_I = n$, wird der Regulator $s = \underline{e}^*$ setzen. Hat keine Firma die neue Technologie übernommen, d.h. $n_I = 0$, entspricht der optimale Standard $s = \bar{e}^*$. Für den Fall einer teilweisen Übernahme der neuen Technologie, d.h. $0 < n_I < n$, ergibt eine komparative Statik von Gleichung (6.3.2) bezüglich n_I

$$s'(n_I) = \frac{C'_0(s) - C'_I(s)}{[n_I C''_I(s) + (n - n_I) C''_0(s) + n^2 D''(ns)]} < 0 \quad . \quad (6.3.3)$$

Der Regulator wird den Standard $s(n_I)$ also um so niedriger (schärfer) setzen, je mehr Firmen die neue Technologie übernommen haben. Andererseits ist die Kostenersparnis $\Delta C(s)$ um so höher, je niedriger (schärfer) der Standard ist. Daher ist die Kostenersparnis – ex-post – um so höher, je mehr Firmen investiert haben. Emissionsstandards verursachen also eine negative Externalität zwischen den Firmen.

Auf der 2. Stufe entscheiden die Firmen, ob sie die neue Technologie übernehmen. Man erinnere sich, daß in einem Investitionsgleichgewicht, in dem beide Typen von Firmen aktiv sind, $\Delta C(s) = P$ gilt, d.h. die Firmen sind indifferent zwischen der herkömmlichen und der neuen Technologie. Dies wiederum definiert einen Standard $\tilde{s}(P)$, bei dem die Firmen zu gegebenem Lizenzpreis P indifferent zwischen beiden Technologien sind. Dieser ist um so niedriger, je höher die Lizenzgebühr P ausfällt. Man beachte, daß eine teilweise Übernahme der neuen Technologie nur dann in einem teilspielperfekten Gleichgewicht möglich ist, falls $\tilde{s}(P) = s(n_I)$ gilt. Daher erhält man folgendes Resultat:

Lemma 6.4 (Teilspiel Stufe 2 - 4) *Es sei angenommen, daß der Regulator einen Standard gesetzt und sich darüber hinaus verpflichtet hat, die Höhe des Standards optimal an die erfolgte Übernahme der neuen Technologie anzupassen. In diesem Fall existieren Lizenzpreise \tilde{P} und \hat{P} mit $\hat{P} < \tilde{P}$, so daß*

- i.) für $P < \hat{P}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen, d.h. $n_I = n$, und der Regulator $s = \underline{e}^*$ setzt,
- ii.) für $P > \tilde{P}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt, d.h. $n_I = 0$, und der Regulator $s = \bar{e}^*$ setzt.
- iii.) für $P \in [\hat{P}, \tilde{P}]$ drei Gleichgewichte existieren:
 - a.) alle Firmen investieren, d.h. $n_I = n$, und $s = \underline{e}^*$,
 - b.) die neue Technologie wird von $n_I(P) = n \frac{D'(ns) + C'_0(s)}{C'_0(s) - C'_I(s)}$ vielen Firmen übernommen und $\underline{e}^* < s(n_I) = \tilde{s}(P) < \bar{e}^*$,
 - c.) keine Firma investiert, d.h. $n_I = 0$, und $s = \bar{e}^*$.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Für Preise $P \in [\hat{P}, \tilde{P}]$ gibt es also mehrere Ausgänge des auf die Preissetzung des Innovators folgenden Teilspiels. Ein analoges Ergebnis ergab sich bereits in Abschnitt 4.2 des letzten Kapitels.⁶⁰ Wiederum wird angenommen, daß das Gleichgewicht gespielt wird, in dem die Firmen die geringsten totalen Vermeidungskosten haben. Dies ist der

⁶⁰Man beachte insbesondere, daß das Gleichgewicht *iii.b.* nicht robust im Sinne von „trembling-hand-perfekt“ ist. Man vergleiche hierzu auch die Erläuterung zu Proposition 4.8.

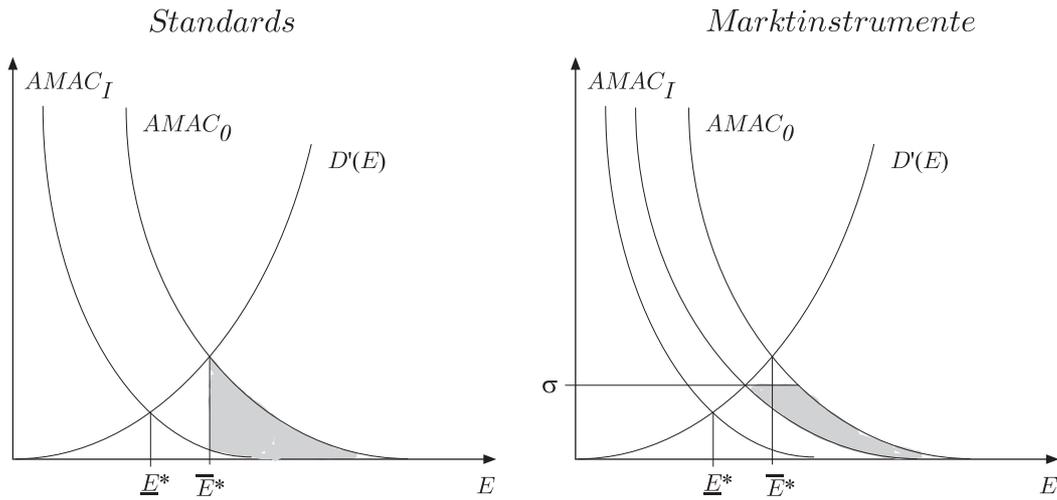


Abbildung 6.7: Die grauen Flächen entsprechen den Erlösen des Innovators in Szenario C.

Fall bei iii.c) in Lemma 6.4. Im folgenden sei also angenommen, daß für $P > \hat{P}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt. Folglich wird der Innovator den Lizenzpreis auf $P = \hat{P}$ setzen. Damit ergibt sich folgendes Ergebnis:

Proposition 6.7 (Standards) *Es sei angenommen, daß die Industrie mittels eines Standards reguliert wird. Darüber hinaus sei vorausgesetzt, daß im Fall $P > \hat{P}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt, d.h. das Gleichgewicht iii.c. aus Lemma 6.4 gespielt wird. In diesem Fall ist das teilspielperfekte Nash-Gleichgewicht charakterisiert durch Unterinvestition in F&E, d.h. $\chi_s < \chi^*$, und*

- i) $s = \underline{e}^*$, $n_I = n$ im Fall erfolgreicher Innovation,
- ii.) $s = \bar{e}^*$, $n_I = 0$ im Fall nicht erfolgreicher Innovation.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß dies nicht der einzig mögliche Ausgang des Spiels C ist. Falls alternativ zur obigen Annahme für $P > \hat{P}$ Gleichgewicht iii.a. gespielt wird, erhält man dasselbe Resultat wie in Spiel B. Da in diesem Fall für $P < \tilde{P}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen, wäre der Erlös des Innovators durch $\Theta_s = n\tilde{P}$ gegeben. Dann wären die Anreize in F&E höher als optimal.

Steuern, Subventionen, Zertifikate

Zuletzt betrachte man den Fall der Marktinstrumente Steuern, Subventionen bzw. Zertifikate. Aus der Literatur ist bekannt, daß bei gegebener Technologie, exogener Firmenzahl und bei kompetitiven Firmen Steuern, Subventionen und Zertifikate äquivalente Instrumente sind. Daher können diese Instrumente im folgenden gemeinsam betrachtet werden. Es sei $x := \tau = \xi = \sigma$ der Steuersatz, die Subvention auf vermiedene Emissionen bzw. der Marktpreis für Zertifikate. In der letzten Stufe setzen die Firmen $-C'_I(e_I) = -C'_0(e_0) = x$. Dies ergibt Emissionen $e_I = e_I(x)$ bzw. $e_0 = e_0(x)$. Haben n_I viele Firmen die neue Technologie übernommen, dann entspricht die aggregierte Nachfrage nach Emissionen $E(x) = n_I e_I(x) + (n - n_I) e_0(x)$. Der Regulator minimiert die gesamten sozialen Kosten

$$\min_x \{n_I C_I(e_I) + (n - n_I) C_0(e_0) + D(E)\} \quad .$$

Mittels Differenzieren nach x erhält man die Bedingungen erster Ordnung

$$n_I e'_I(x) [C'_I(e_I) + D'(E)] + (n - n_I) e'_0(x) [C'_0(e_0) + D'(E)] \stackrel{!}{=} 0 \quad ,$$

Da laut Annahme $e'_0(x) < 0$ und $e'_I(x) < 0$ ist und die Firmen $-C'_I(e_I) = -C'_0(e_0)$ setzen, erhält man, wie intuitiv erwartet, $-C'_I(e_I) = -C'_0(e_0) = D'(E)$. Bei einem Zertifikateregime gibt der Regulator also

$$L(n_I) = n_I e_I(\sigma) + (n - n_I) e_0(\sigma)$$

viele Zertifikate aus, so daß der Zertifikatepreis $\sigma = x = D'(L)$ entspricht. Bei Steuern und Subventionen setzt der Regulator eine Steuer bzw. Subvention $\tau(n_I) = \xi(n_I) = x = D'(E)$. Zunächst betrachte man den Fall, daß keine Firma die neue Technologie übernommen hat, d.h. $n_I = 0$. Der Regulator wird dann den Preis für Emissionen auf $\bar{x} = \overline{MD}^*$ setzen. Die ex-post Kostenersparnis ist damit gegeben durch $\Delta C(\bar{x})$. Der zu erzielende Lizenzpreis \bar{P} ist somit

$$\bar{P} = \Delta C(\bar{x}).$$

Man beachte, daß die Steuer oder der Marktpreis für Zertifikate um so geringer ausfällt, je mehr Firmen die neue Technologie übernommen haben. Ein niedrigerer Preis für Emissionen x hat aber eine geringere ex-post Kostenersparnis $\Delta C(x)$ zur Folge. Daher ist die Zahlungsbereitschaft – und der Lizenzpreis im Gleichgewicht – um so geringer, je mehr Firmen die neue Technologie übernehmen. Es kommt also zu einer positiven

Externalität zwischen den Firmen bei Marktinstrumenten.⁶¹ Für den Fall, daß alle Firmen die neue Technologie übernommen haben, d.h. $n_I = n$, wird der Regulator den Preis für Emissionen auf $\underline{x} = \underline{MD}^*$ setzen. Die ex-post Kostenersparnis ist dann gegeben durch $\Delta C(\underline{x})$. Wiederum definiere man einen Lizenzpreis \underline{P} , so daß gilt

$$\underline{P} = \Delta C(\underline{x}) \quad .$$

Daraus ergibt sich unmittelbar folgendes Zwischenergebnis:

Lemma 6.5 (Teilspiel Stufe 2 - 4) *Es sei angenommen, daß die Industrie mittels Steuern, Subventionen oder Zertifikate reguliert ist. In diesem Fall existieren Lizenzpreise \underline{P} und \overline{P} mit $\underline{P} < \overline{P}$, so daß die Stufen 2 - 4 des Spiels C folgendermaßen charakterisiert werden können:*

- i.) *Für $P \geq \overline{P}$ übernimmt keine Firma die neue Technologie, und es gilt $x(\overline{P}) = \overline{MD}^*$.*
- ii.) *Für $P \in [\underline{P}, \overline{P}]$ ist die Nachfragefunktion $n_I(P)$ fallend in P . Je niedriger P , desto niedriger ist der optimale Preis für Emissionen.*
- iii.) *Für $P \leq \underline{P}$ übernehmen alle Firmen die neue Technologie, und es gilt $x(\underline{P}) = \underline{MD}^*$.*

Der Beweis findet sich im Anhang. Für einen hinreichend hohen Lizenzpreis übernimmt also keine Firma und für einen hinreichend niedrigen Lizenzpreis alle Firmen die neue Technologie. Die fallende Nachfragefunktion im mittleren Preisbereich führt zu folgender Charakterisierung des Spiels C bezüglich marktorientierter Instrumente:

Proposition 6.8 *Wiederum sei angenommen, daß die Industrie mittels Steuern, Subventionen oder Zertifikate reguliert ist. Dann ist das teilspielperfekte Nash-Gleichgewicht des Spiels C charakterisiert durch Unterinvestition in F&E, d.h. $\chi_x < \chi^*$ und*

- i) $\underline{MD}^* \leq x < \overline{MD}^*$, $\underline{E}^* \leq E < \overline{E}^*$, $0 < n_I \leq n$ *im Fall erfolgreicher Innovation.*

⁶¹Ein analoges Ergebnis ergab sich bereits bei Zertifikaten im Fall, daß sich der Regulator auf die Anzahl der auszugebenen Zertifikate verpflichtet hat, bevor die neue Technologie auf dem Markt war.

Anpassung des umweltpolitischen Instrumentes						
	nach der Innovation				nach der Diffusion	
	Standards	Steuern	Zertifikate ⁶³		Standards	Steuern & Zertifikate
			$\underline{E}^* \leq \hat{L}$	$\underline{E}^* > \hat{L}$		
n_I	n	n	n	$< n$	n	$\leq n$
E	\underline{E}^*	\underline{E}^*	\underline{E}^*	$> \hat{L}$	\underline{E}^*	$\geq \underline{E}^*$
χ	$> \chi^*$	$< \chi^*$	$< \chi^*$	$\geq \chi^*$	$< \chi^*$	$< \chi^*$

Tabelle 6.2: Vergleich von Steuern, Standards und Zertifikaten bezüglich zweier alternativer Szenarien der Anpassung der Höhe des umweltpolitischen Instrumentes an die neue Technologie.

ii.) $x = \overline{MD}^*$, $E = \overline{E}^*$, $n_I = 0$ im Fall nicht erfolgreicher Innovation.

Der Beweis findet sich im Anhang.⁶²

6.4 Produktionskosten

Die bisher getroffene Annahme, daß nur die Entwicklung, nicht jedoch die Herstellung bzw. Installation der neuen Technologie Kosten verursacht, kommt sicher in der Realität selten vor. In diesem Abschnitt soll aus diesem Grund der Einfluß von Produktionskosten auf die Gleichgewichte und Allokationen untersucht werden. Dabei werden im folgenden *konstante Grenzkosten* der Produktion der neuen Technologie der

⁶²Man beachte aber, daß bei einer teilweisen Übernahme der neuen Technologie der Innovator ex post einen Anreiz hat, weitere Lizenzen zu verkaufen, indem er die Lizenzgebühr nachträglich senkt. Antizipieren die Firmen dieses Verhalten, dann verringert sich der Erlös des Innovators. In Erwartung zukünftiger, niedrigerer Preise, werden sie unter Umständen ihre Investition hinauszögern. Aus der Theorie der dauerhaften Güter ist dieses Problem wohlbekannt (COASE [1972], GUL ET AL. [1986]). Ein Monopolist, der sich einer sinkenden Nachfragefunktion gegenüber sieht, wird eine Strategie der intertemporalen Preisdiskriminierung einschlagen (TIROLE [1994]). Er wird den Preis für die neue Technologie sukzessive senken, um sie auf diese Art und Weise auch noch an Firmen mit niedrigerer Zahlungsbereitschaft verkaufen zu können. Ein fallender Erlös würde in dem hier untersuchten Modell jedoch auch die F&E-Aktivität – die ohnehin schon suboptimal ist – noch weiter verringern. Insofern ändert sich qualitativ nichts.

⁶³ \hat{L} bezeichnet die charakteristische Anzahl an Zertifikaten, so daß für $L < \hat{L}$ im Gleichgewicht alle Firmen die neue Technologie übernehmen und für $L > \hat{L}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt.

Höhe F unterstellt. Man beachte, daß man die in Kapitel 4 eingeführten fixen Installationskosten F genauso gut als Produktionskosten interpretieren könnte. Daher lassen sich einige Resultate aus Kapitel 4 direkt übernehmen. Sind die Grenzkosten der Produktion – wie im folgenden angenommen – konstant, dann entsprechen die Grenzkosten der Produktion den Stückkosten. Des kürzeren Ausdrucks wegen soll daher im folgenden von Stückkosten F der neuen Technologie gesprochen werden. Ein Innovator wird die neue Technologie jedoch in der Regel nicht zu einem Preis verkaufen, der den Stückkosten entspricht, da er ein Monopol auf die Innovation besitzt. Es wurde bereits an anderer Stelle erwähnt, daß vielmehr der erwartete Erlös aus dem Verkauf der neuen Technologie die treibende Kraft für die Entwicklung der neuen Technologie ist.

Zunächst soll der Einfluß der Höhe der Stückkosten auf den Erlös aus dem Verkauf der neuen Technologie – und damit die Innovationsanreize des Innovators – untersucht werden. Der erwartete Gewinn des Innovators setzt sich aus dem Erlös⁶⁴ $\Theta(P) = n_I(P) [P - F]$ abzüglich der Entwicklungskosten $R(\chi)$ zusammen. Er ist gegeben durch

$$\Pi(P, \chi) = \chi n_I(P) P - [\chi n_I(P) F + R(\chi)] = \chi n_I(P) [P - F] - R(\chi) \quad .$$

Die Bedingung erster Ordnung bezüglich des Preises für die neue Technologie lautet demnach nun

$$n'_I(P) [P - F] \geq -n_I(P) \quad . \quad (6.4.1)$$

Die Lösung dieser Gleichung sei im folgenden mit P^{\max} bezeichnet. Zuerst sei davon ausgegangen, daß die Industrie entweder mittels einer *Steuer* oder mittels eines *Standards* reguliert ist. Man erinnere sich, daß in diesem Fall die Nachfragefunktion $n_I(P)$ vollkommen elastisch ist. Da die Technologie von allen Firmen übernommen wird, ergibt sich für die reduzierte Erlösfunktion des Innovators $\Theta_t(\tau) = n [\Delta C(\tau) - F]$ im Fall einer Steuer und $\Theta_s(s) = n [\Delta C(s) - F]$ im Fall eines Standards. Offensichtlich sinkt der Erlös des Innovators bei steigenden Stückkosten F . Schließlich betrachte man den Fall eines *Zertifikateregimes*. Die reduzierte Erlösfunktion ergibt sich nun zu

$$\Theta_p(L) = n_I(P^{\max}(L, F), L) [P^{\max}(L, F) - F] \quad . \quad (6.4.2)$$

⁶⁴Mit dem Erlös sind im folgenden immer die Einnahmen aus dem Verkauf der neuen Technologie abzüglich der Produktionskosten gemeint. Als Gewinn des Innovators wird hingegen der Erlös abzüglich der Entwicklungskosten bezeichnet.

Man beachte, daß der optimale Preis $P^{\max}(L, F)$ nun auch von der Höhe der Stückkosten abhängt. Komparative Statik der Gleichung (6.4.2) bezüglich F ergibt nach Anwendung des Umhüllenden Satzes und unter Ausnutzung (6.4.1) im Falle von Gleichheit

$$\frac{d\Theta_p(L)}{dF} = -n_I(P^{\max}) < 0 \quad .$$

Es kann also folgendes Ergebnis zusammengefaßt werden:

Lemma 6.6 *Der Erlös des Innovators fällt mit den Produktionskosten F bei allen Instrumenten.*

Je höher die Stückkosten, desto geringer ist der Erlös und, da $\chi = \Gamma(\Theta)$, damit auch die Innovationsanreize des Innovators. Andererseits ist aber zu erwarten, daß auch der soziale Wert der Innovation mit der Höhe der Stückkosten abnimmt. Insbesondere ist aus Abschnitt 3.2 bereits bekannt, daß bei hinreichend hohen Stückkosten⁶⁵ eine Übernahme der neuen Technologie nicht sozial optimal ist. Für nicht zu hohe Stückkosten ist eine partielle Übernahme hingegen sozial optimal. Um die einzelnen Instrumente aus Sicht des sozialen Planers analysieren zu können, soll daher zunächst der Einfluß der Stückkosten auf das soziale Optimum hergeleitet werden.

6.4.1 Das soziale Optimum

Es sei an das Ergebnis aus Abschnitt 6.2 erinnert. Ein sozialer Planer sieht sich innerhalb des Modellrahmens somit zwei Zielen gegenüber. Zum einen gilt es, das optimale F&E-Niveau festzulegen, zum anderen, die Emissionen abhängig von den zur Verfügung stehenden Technologien zu wählen. Zunächst sollen die Emissionsniveaus hergeleitet werden. War die Innovation nicht erfolgreich, so erhält man unmittelbar folgende soziale Kosten

$$SC_0 = nC_0(e_0) + D(ne_0) \quad .$$

Die optimalen aggregierten Emissionen werden wiederum⁶⁶ durch $\bar{E}^* = n\bar{e}^*$ bezeichnet. War die Innovation hingegen erfolgreich, dann sollte im allgemeinen die neue

⁶⁵Bezüglich der Interpretation beachte man nochmals, daß die Stückkosten F den fixen Installationskosten F aus Kapitel 4 entsprechen.

⁶⁶Dies entspricht der Bezeichnung im Fall $F = 0$.

Technologie eingesetzt werden. Kann die neue Technologie – wie bisher angenommen – kostenlos produziert werden, d.h. $F = 0$, dann sollten alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Existieren jedoch positive Stückkosten $F > 0$, so ist aus Abschnitt 3.2 bekannt, daß eine partielle Übernahme der neuen Technologie sozial optimal sein kann. Weiterhin wurde in Proposition 3.1 die Existenz von Stückkosten \underline{F} und \overline{F} aufgezeigt, so daß für Stückkosten F im Intervall $F \in (\underline{F}, \overline{F})$ nur ein Teil der Firmen die neue Technologie übernehmen sollte. Für $F \geq \overline{F}$ soll hingegen keine Firma die neue Technologie übernehmen. Für beliebiges F sind die sozialen Kosten daher gegeben durch

$$SC_I(F) = n_I[C_I(e_I) + F] + (n - n_I)C_0(e_0) + D(n_I e_I + (n - n_I)e_0) \quad .$$

Das Optimierungsproblem wurde bereits in Kapitel 4 gelöst (siehe Proposition 3.1). Der *soziale Wert der Innovation* sei wiederum definiert als die Differenz zwischen den optimalen sozialen Kosten ohne bzw. mit der neuen Technologie, d.h.

$$\Delta SC(F) = SC_0^* - SC_I^*(F) \quad ,$$

wobei $SC_I^*(F)$ die über e_0 , e_I und n_I minimierten sozialen Kosten bezeichnet. Aus Proposition 3.1 folgt unmittelbar, daß $\Delta SC(F) > 0$ für Stückkosten $F < \overline{F}$ und $\Delta SC(F) < 0$ falls $F > \overline{F}$. Mit anderen Worten ist der soziale Wert der Innovation genau dann positiv, wenn die fixen Kosten kleiner als \overline{F} sind.

Zuletzt sei das sozial optimale F&E-Niveau analysiert. Offensichtlich sollte nur dann F&E angestrebt werden, d.h. $\chi > 0$, wenn der erwartete soziale Wert der Innovation positiv ist. Das Optimierungsproblem des sozialen Planers lautet damit

$$\min_{\chi} \{ \chi SC_I^*(F) + (1 - \chi) SC_0^* + R(\chi) \} \quad .$$

Man kann folgende Charakterisierung des sozialen Optimums zusammenfassen:

Proposition 6.9 (Soziales Optimum) *Es existieren Stückkosten \underline{F} und \overline{F} , so daß*

i.) für $F \geq \overline{F}$ keine F&E getätigt werden sollte, d.h. $\chi^ = 0$,*

ii.) für $F < \overline{F}$ ist $\chi^ > 0$ und $\chi^*(F)$ um so größer, je kleiner F . Das optimale F&E-Niveau ist gegeben durch den sozialen Wert der Innovation, d.h. $R'(\chi^*) = \Delta SC(F)$.*

a.) Im Falle nicht-erfolgreicher Innovation beträgt der sozial optimale Grenzscha-den \overline{MD}^ .*

b.) Im Falle erfolgreicher Innovation sollten

α.) alle Firmen die neue Technologie übernehmen, falls $F \leq \underline{F}$. Der sozial optimale Grenzscha- den ist \underline{MD}^* .

β.) Für $F \in (\underline{F}, \bar{F})$ ist partielle Übernahme optimal. Je höher F , desto we- niger Firmen sollten die neue Technologie übernehmen. Für den sozial optimalen Grenzscha- den gilt $\underline{MD}^* < MD^* < \overline{MD}^*$.

In den nächsten Abschnitten soll die sozial optimale Allokation mit der Allokation unter umweltpolitischen Instrumenten verglichen werden. Dazu ist es nötig, die Zahlungsbe- reitschaft einer Firma für die neue Technologie mit dem sozialen Nutzen zu vergleichen, der sich aus der Übernahme der neuen Technologie durch diese Firma ergibt. Daher ist es hilfreich, nicht allein den sozialen Wert der Innovation zu betrachten, sondern vielmehr den sozialen Grenznutzen, den die Übernahme der neuen Technologie durch die marginale Firma bewirkt. Dabei sei wiederum angenommen, daß die Übernahme der neuen Technologie durch eine Firma (fast) keinen Einfluß auf den optimalen Grenz- schaden hat. Weiterhin bezeichne $E(n_I) = (n - n_I)e_0 + n_I e_I$ die optimalen Emissionen und $D'(E(n_I))$ den optimalen Grenzscha- den für den Fall, daß n_I viele Firmen die neue Technologie übernommen haben. Haben bereits n_I viele Firmen die neue Technolo- gie übernommen, dann ist der soziale Grenznutzen $SMB(n_I)$, der bei Übernahme der neuen Technologie durch eine weitere Firma entsteht, gegeben als

$$SMB(n_I) = C_0(e_0) + D'(E)(e_0 - e_I) - C_I(e_I) - F \quad .$$

Man beachte, daß die optimalen Emissionen $E(n_I)$ um so kleiner sind, je mehr Fir- men die neue Technologie bereits übernommen haben. Daher ist der soziale Nutzen bei Übernahme der neuen Technologie durch die marginale Firma um so geringer, je größer n_I . Für n_I^* gilt $SMB(n_I^*) = 0$.

6.4.2 Szenario A

In den folgenden Abschnitten soll betrachtet werden, inwiefern sich die bisherigen Er- gebnisse dieses Kapitels ändern, falls man positive Stückkosten innerhalb des Modells zulässt. Zunächst stelle man sich wiederum eine Situation vor, in der sich der Regula- tor auf die Höhe seines umweltpolitischen Instrumentes für eine hinreichend lange Zeit selbstverpflichtet hat. Insbesondere sei dabei wiederum angenommen, daß die Höhe des Instrumentes bezüglich der konventionellen Technologie optimal gesetzt wurde.

6.4.2.1 Steuern

Zunächst soll der Fall einer Steuer der Höhe $\tau_0 = \overline{MD}^*$ untersucht werden. Bei der Produktion der neuen Technologie fallen nun Kosten der Höhe F an. Der Erlös des Innovators ist daher gegeben durch $\Theta_I(\tau_0) = n[\Delta C(\tau_0) - F]$. Der Innovator wird genau dann einen Anreiz haben, in F&E zu investieren, wenn er einen positiven Erlös erwartet. Es sei daran erinnert, daß \overline{F} in Proposition 3.1 definiert wurde als

$$C_0(e_0) - C_I(e_I) + (e_0 - e_I)\overline{MD}^* - \overline{F} = 0 \quad . \quad (6.4.3)$$

Einsetzen von $\tau_0 = \overline{MD}^*$ in Gleichung (6.4.3) und Auflösen nach F ergibt somit $\Delta C(\tau_0) = \overline{F}$. Im Fall $F = \overline{F}$ ist der Erlös also gerade Null, d.h. $n[\Delta C(\tau_0) - \overline{F}] = 0$. Man erhält folgendes Ergebnis:

Proposition 6.10 (Steuern) *Es sei angenommen, daß die Industrie mittels eines Steuersatzes $\tau_0 = \overline{MD}^*$ reguliert ist. In diesem Fall ist das teilspielperfekte Gleichgewicht des Spiels A folgendermaßen charakterisiert:*

- i.) Für $F \geq \overline{F}$ findet kein F&E statt, d.h. $\chi_t = 0$. Die aggregierten Emissionen entsprechen $E = \overline{E}^*$.
- ii.) Für $F < \overline{F}$ kommt es zu Überinvestition in F&E, d.h. $\chi_t > \chi^*$.
 - a.) Im Fall nicht erfolgreicher Innovation entsprechen die aggregierten Emissionen $E = \overline{E}^*$,
 - b.) im Fall erfolgreicher Innovation wird die neue Technologie von allen Firmen übernommen, d.h. $n_I = n$. Die aggregierten Emissionen sind niedriger als sozial optimal, d.h. $E < \underline{E}^*$.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Man beachte, daß im Intervall $(\underline{F}, \overline{F})$ bei Steuern *zu viele* Firmen die neue Technologie übernehmen.

6.4.2.2 Zertifikate

Nun sei unterstellt, daß der Regulator $L = \overline{E}^*$ viele Zertifikate ausgegeben hat. Betreiben alle Firmen die alte Technologie, dann entspricht der Zertifikatpreis $\sigma_0 = \overline{MD}^*$.

Der Erlös lautet bei Zertifikaten nun

$$\Theta_p(\bar{E}^*) = n_I(P^{\max}(\bar{E}^*, F), \bar{E}^*) \left[P^{\max}(\bar{E}^*, F) - F \right] .$$

Wiederum wird der Innovator genau dann einen Anreiz haben, die neue Technologie zu entwickeln, falls der erwartete Erlös positiv ist. Analog zum Fall einer Steuer kann man leicht zeigen, daß $\Delta C(\sigma_0) = \bar{F}$ gilt.

Es sei daran erinnert, daß für Stückkosten $F = 0$ ein \hat{L} existiert, so daß für $L > \hat{L}$ nur ein Teil der Firmen die neue Technologie übernimmt, während für $L \leq \hat{L}$ die neue Technologie von allen Firmen übernommen wird. Man beachte jedoch, daß diese kritische Anzahl an Zertifikaten $\hat{L}(F)$ von der Höhe der Stückkosten abhängt. Hierzu unterstelle man zunächst Stückkosten F und eine Anzahl an Zertifikaten L mit $L < \hat{L}(F)$, aber nahe bei $\hat{L}(F)$. Dann werden laut Konstruktion von $\hat{L}(F)$ für L fast alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Komparative Statik der Bedingung erster Ordnung (6.4.1) im Falle von Gleichheit bezüglich F ergibt

$$P'(F) = \frac{n'_I(P)}{n''_I(P)[P(F) - F]} > 0 .$$

Wie erwartet wird der Innovator den Preis $P^{\max}(F)$ für die neue Technologie also um so höher setzen, je höher die Stückkosten sind. Andererseits erinnere man sich, daß die Nachfragefunktion fallend ist, d.h. $n'_I(P) < 0$. Läßt man demnach L konstant und erhöht die Stückkosten F , dann verringert sich die Anzahl an Firmen, die die neue Technologie übernimmt. Da dies für jedes L in der Umgebung von $\hat{L}(F)$ gilt, muß $\hat{L}'(F) < 0$ gelten. Je höher die Stückkosten, desto kleiner wird die kritische Anzahl an Zertifikaten $\hat{L}(F)$. Das Gleichgewicht hängt nun davon ab, ob $\hat{L}(F)$ größer oder kleiner als das aggregierte Emissionsziel \bar{E}^* ist. Es ergibt sich folgendes Resultat:

Proposition 6.11 (Zertifikate) *Es sei angenommen, daß der Regulator $L = \bar{E}^*$ viele Zertifikate ausgegeben hat. In diesem Fall ist das teilspielperfekte Gleichgewicht des Spiels A folgendermaßen charakterisiert:*

- i.) Für $F \geq \bar{F}$ findet kein $F\&E$ statt, d.h. $\chi_p = 0$.
- ii.) Für $F < \bar{F}$ kommt es zu Unterinvestition in $F\&E$, d.h. $\chi_p < \chi^*$. Im Fall erfolgreicher Innovation wird die neue Technologie für $\hat{L}(0) < \bar{E}^*$ nur teilweise übernommen. Im Fall $\hat{L}(0) \geq \bar{E}^*$ existiert ein $F_{\hat{L}} < \bar{F}$, so daß die neue Technologie

- a.) für $F \leq F_{\hat{L}}$ von allen Firmen übernommen wird, d.h. $n_I = n$,
 b.) für $F > F_{\hat{L}}$ nur von einem Teil der Firmen übernommen wird, d.h. $n_I < n$.

Der Beweis findet sich im Anhang.

6.4.2.3 Standards

Schließlich sei davon ausgegangen, daß sich der Regulator auf einen Standard der Höhe $s = \bar{e}^* = \bar{E}^*/n$ verpflichtet hat. Der Erlös ist nun gegeben als $\Theta_s(\bar{e}^*) = n[\Delta C(\bar{e}^*) - F]$. Es sei daran erinnert, daß in Abschnitt 4.1 ein \hat{F} mit $\hat{F} < \bar{F}$ folgendermaßen definiert wurde:

$$\hat{F} = C_0(\bar{e}^*) - C_I(\bar{e}^*) \quad .$$

Offensichtlich übersteigen für $F > \hat{F}$ die Stückkosten den Preis für die neue Technologie. Man erhält folgendes Ergebnis:

Proposition 6.12 (Standards) *Es sei angenommen, daß der Regulator einen Standard $s = \bar{E}^*/n$ festgelegt hat. In diesem Fall ist das teilspielperfekte Gleichgewicht des Spiels A folgendermaßen charakterisiert:*

- i.) Für $F \geq \hat{F}$ findet kein F&E statt, d.h. $\chi_s = 0$.
 ii.) Für $F < \hat{F}$ kommt es zu Unterinvestition in F&E, d.h. $\chi_s < \chi^*$. Im Fall erfolgreicher Innovation wird die neue Technologie von allen Firmen übernommen, d.h. $n_I = n$.

Ob für $F < \hat{F}$ Standards höhere oder niedrigere Anreize in F&E bieten als Zertifikate, ist nicht eindeutig.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Es sei darauf hingewiesen, daß es auch für Stückkosten $F \in [\hat{F}, \bar{F}]$ zu Unterinvestition in F&E kommt, da $\hat{F} < \bar{F}$ gilt.

6.4.3 Szenario B

Nun betrachte man Szenario B. Der Regulator verpflichtet sich, die Höhe seines Instrumentes unmittelbar *nach erfolgreicher Innovation*, aber *vor Übernahme* der neuen Technologie optimal anzupassen.

6.4.3.1 Steuern

Als erstes gehe man von einer Situation aus, in der die Emissionen der Industrie einer *Steuer* unterliegen. Zunächst betrachte man Stückkosten $F \geq \bar{F}$. Es sei daran erinnert, daß τ_0 den bezüglich der alten Technologie optimalen Steuersatz bezeichnet, d.h. $\tau_0 = \overline{MD}^*$. Darüber hinaus wurde für Szenario A bereits gezeigt, daß $P = \Delta C(\tau_0) < F$ gilt, d.h. die Stückkosten sind höher als die Zahlungsbereitschaft der Firmen. Daher entspricht die dezentrale Lösung für $\tau = \tau_0$ offensichtlich dem sozialen Optimum. Der Innovator hat keinen Anreiz, die neue Technologie zu entwickeln. Nun seinen Stückkosten $F < \underline{F}$ unterstellt. Es bezeichne τ_I den sozial optimalen Steuersatz, d.h. $\tau_I = \underline{MD}^*$. In Proposition 3.1 wurde \underline{F} definiert als

$$C_0(e_0) - C_I(e_I) + (e_0 - e_I)\underline{MD}^* + \underline{F} = 0 \quad . \quad (6.4.4)$$

Indem man $\tau_I = \underline{MD}^*$ in Gleichung (6.4.4) einsetzt und anschließend nach \underline{F} auflöst, erhält man $\Delta C(\tau_I) = \underline{F}$. Damit ist für $F < \underline{F}$ die Zahlungsbereitschaft der Firmen offensichtlich größer als die Stückkosten, d.h. $\Delta C(\tau_I) > F$. Der Innovator hat also einen Anreiz, die neue Technologie zu entwickeln. Ist die Innovation wiederum erfolgreich, dann werden alle Firmen die neue Technologie übernehmen.

Zuletzt betrachte man Stückkosten $F \in (\underline{F}, \bar{F})$. Es sei in Erinnerung gerufen, daß in diesem Fall eine partielle Diffusion der neuen Technologie sozial optimal ist. Andererseits ist bereits bekannt, daß die Nachfragefunktion bei Steuern vollkommen elastisch ist. Der Regulator kann eine teilweise Übernahme der neuen Technologie also nicht umsetzen. Ist es dann aber „besser“ für ihn, wenn alle oder wenn keine Firma die neue Technologie übernimmt? Wenn F hinreichend nahe an \underline{F} ist, ist es aus der Sicht des Regulators sicherlich besser, wenn alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Es sei daran erinnert, daß $\tilde{\tau}(F)$ den Steuersatz bezeichnet, für den die Firmen indifferent zwischen den beiden Technologien sind, d.h. es gilt $\Delta C(\tilde{\tau}) = F$. Man beachte, daß für ein beliebig kleines ε mit $\varepsilon > 0$ und einen Steuersatz $\tau = \tilde{\tau}(F) + \varepsilon$ die Zahlungsbereitschaft der Firmen positiv ist. Setzt der Regulator den Steuersatz daher auf $\tau = \tilde{\tau}(F) + \varepsilon$, dann wird die neue Technologie von allen Firmen übernommen. Bei einer vollständigen Diffusion ist wiederum ein Steuersatz τ_I mit $\tau_I < \tilde{\tau}(F) < \tilde{\tau}(F) + \varepsilon$ optimal. Daher wird der Regulator das ε so klein wie möglich wählen. Schließlich betrachte man den Erlös des Innovators. Offensichtlich strebt der Erlös des Innovators $\Theta(\tilde{\tau}(F) + \varepsilon)$ für $\varepsilon \rightarrow 0$ ebenfalls gegen Null. Wegen $R'(\chi) = \Theta(\tilde{\tau}(F) + \varepsilon) \rightarrow 0$ für $\varepsilon \rightarrow 0$ hat der Innovator keinen Anreiz, in die neue Technologie zu investieren.

Man kann dieses vielleicht überraschende Ergebnis folgendermaßen erklären. Zu dem Zeitpunkt, an dem der Regulator die Höhe des Steuersatzes festsetzt, ist die Innovationsentscheidung längst gefallen. War die Innovation erfolgreich, dann wird der Regulator den Preis für die neue Technologie auf Null drücken wollen. Der Innovator wiederum antizipiert dies und wird die neue Technologie daher gar nicht erst entwickeln. Man kann folgendes Resultat festhalten:

Proposition 6.13 (Steuern) *Es sei angenommen, daß der Regulator einen Steuersatz festsetzt. Dann kann das teilspielperfekte Gleichgewicht des Spiels B charakterisiert werden durch*

i.) keine Investitionen in $F&E$ für $F \geq \underline{F}$, d.h. $\chi_t = 0$. Der Steuersatz entspricht $\tau = \overline{MD}^$, und die aggregierten Emissionen betragen $E = \overline{E}^*$.*

ii.) Unterinvestition in $F&E$ für $F < \underline{F}$, d.h. $\chi_t < \chi^(F)$.*

Im Fall nicht erfolgreicher Innovation entspricht der Steuersatz $\tau = \overline{MD}^$ und die aggregierten Emissionen $E = \overline{E}^*$.*

Im Fall erfolgreicher Innovation gilt $n_I = n$. Der Steuersatz entspricht $\tau(F) = \underline{MD}^$, und die aggregierten Emissionen sind $E = \underline{E}^*$.*

Der Beweis findet sich im Anhang.

6.4.3.2 Zertifikate

Nun gehe man davon aus, daß der Regulator *Zertifikate* ausgibt. Zunächst seien Stückkosten $F \geq \overline{F}$ unterstellt. In diesem Fall sollte die neue Technologie laut Proposition 3.1 nicht übernommen werden. Gibt der Regulator $L = \overline{E}^*$ viele Zertifikate aus, dann entspricht der Marktpreis für Zertifikate $\overline{\sigma} = \sigma(\overline{F})$, falls alle Firmen die herkömmliche Technologie einsetzen. Damit deckt aber für $\sigma \leq \overline{\sigma}$ der Preis $P = \Delta C(\sigma)$ nicht die Stückkosten F , so daß der Innovator auch keinen Anreiz hat, in die Entwicklung der neuen Technologie zu investieren. Nun betrachte man Stückkosten $F \in (\underline{F}, \overline{F})$. Dann sollte laut Proposition 3.1 die neue Technologie von einem Teil der Firmen übernommen werden. Aus Bedingung (6.3.1) wird bei Berücksichtigung posi-

tiver Stückkosten F nun

$$\begin{aligned}
 D'(L) &= \underbrace{\frac{dn_I(P^{\max}(F, L), L(F))}{dL}}_A \underbrace{[C_0(e_0) - C_I(e_I) - F]}_B \\
 &- \underbrace{\left[n_I(P^{\max}(F, L), L(F)) \frac{\partial C_I(e_I)}{\partial L} + (n - n_I(P^{\max}(F, L), L(F))) \frac{\partial C_0(e_0)}{\partial L} \right]}_C.
 \end{aligned} \tag{6.4.5}$$

Sowohl $L = L(F)$ als auch $P^{\max} = P^{\max}(F, L)$ hängen von den Stückkosten ab. Komparative Statik der Bedingung (6.4.5) bezüglich F ergibt im allgemeinen keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Höhe der Stückkosten F und der Höhe des umweltpolitischen Instrumentes L . Nimmt man jedoch an, daß der direkte Effekt einer Veränderung von F auf die Kostendifferenz zwischen den beiden Technologien (Ausdruck B) die indirekten Effekte⁶⁷ (Ausdruck A und C) dominiert, dann ist der erste Term auf der rechten Seite von (6.4.5) um so kleiner, je höher die Stückkosten sind. Damit ist aber auch die Differenz zwischen den aggregierten Grenzvermeidungskosten (dem 2. Term auf der rechten Seite) und dem Grenzschaten um so geringer, je höher die Stückkosten. Weiter oben wurde bereits gezeigt, daß für $F = \bar{F}$ der Grenzschaten den Grenzvermeidungskosten entspricht. Man erhält also folgendes Ergebnis:

Proposition 6.14 (Zertifikate) *Im Fall eines Zertifikateregimes ist das teilspielperfekte Gleichgewicht des Spiels B charakterisiert durch*

i.) keine Investitionen in F&E für $F \geq \bar{F}$, d.h. $\chi_p = 0$. Die aggregierten Emissionen betragen $L = \bar{E}^$.*

ii.) Für $F < \bar{F}$ gilt $\chi_p > 0$. Ob das F&E-Niveau größer oder kleiner als sozial optimal ist, ist nicht eindeutig.

Im Fall nicht erfolgreicher Innovation gilt $L = \bar{E}^$.*

Im Fall erfolgreicher Innovation existiert ein $\hat{F}_{\hat{L}} < \underline{E}$, so daß gilt

a.) $L = \underline{E}^$, $\underline{MD}^* = \sigma$ und $n_I = n$, falls $F \leq \hat{F}_{\hat{L}}$.*

b.) $L > \hat{L}$, $D'(L) < \sigma$ und $0 < n_I < n$, falls $F > \hat{F}_{\hat{L}}$.

⁶⁷Mit den indirekten Effekten sind die Auswirkungen einer Veränderung der Höhe der Stückkosten F auf die optimalen Emissionen $E = L(F)$ und den Erlös-maximierenden Preis für die neue Technologie $P^{\max}(F)$ gemeint.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Aus einem Vergleich von Propositionen 6.13 und 6.14 kann man folgenden Schluß ziehen:

Folgerung 6.1 Für Stückkosten $F \in (\underline{F}, \overline{F})$ sind die Innovationsanreize bei Zertifikaten höher als bei Steuern, d.h. $\chi_p > \chi_t = 0$.

6.4.3.3 Standards

Schließlich soll eine Regulierung mittels eines *Standards* untersucht werden. Es sei daran erinnert, daß die Nachfrage nach der neuen Technologie bei einem Standard vollkommen elastisch ist. Es übernehmen also entweder alle oder keine Firma die neue Technologie. Andererseits sollte für Stückkosten $F \in (\underline{F}, \overline{F})$ laut Proposition 3.1 nur ein Teil der Firmen die neue Technologie übernehmen. Da der Regulator eine teilweise Diffusion der neuen Technologie mittels eines Standards offensichtlich nicht durchsetzen kann, muß er in der Regel auf eine zweit-beste Lösung zurückgreifen.

Zunächst gehe man jedoch von Stückkosten $F \geq \overline{F}$ aus. Es sei daran erinnert, daß $\widehat{\widehat{F}} = C_0(\overline{e}^*) - C_I(\overline{e}^*)$ gilt. Damit folgt aus $\widehat{\widehat{F}} < \overline{F}$ unmittelbar $\Delta C(\overline{e}^*) < F$. Die dezentrale Allokation entspricht offensichtlich dem sozialen Optimum, d.h. $\chi = 0$, $n_I = 0$ und $E = \overline{E}^*$. Nun sei angenommen, daß $F \leq \underline{F}$ gilt. In Abschnitt 4.2 wurde \widetilde{F} folgendermaßen definiert:

$$\widetilde{F} = C_0(\underline{e}^*) - C_I(\underline{e}^*) \quad .$$

Darüber hinaus gilt $\widetilde{F} > \overline{F}$. Daher kann der Regulator im Falle einer erfolgreichen Innovation mit einem Standard der Höhe $s = \underline{e}^*$ eine vollständige Übernahme der neuen Technologie erreichen. Zuletzt unterstelle man Stückkosten $F \in (\underline{F}, \overline{F})$. Für Stückkosten F größer als, aber hinreichend nahe an \underline{F} sollten in einer zweitbesten Lösung alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Der Regulator wird einen Standard der Höhe $s = \underline{e}^*$ festlegen. Andererseits sollte für Stückkosten F kleiner als, aber hinreichend nahe an \overline{F} in einer zweitbesten Lösung keine Firma die neue Technologie übernehmen. Daher muß es Stückkosten F_s mit $\underline{F} < F_s < \overline{F}$ geben, so daß der Regulator für $F \leq F_s$ einen Standard der Höhe $s = \underline{e}^*$ festlegt und für Stückkosten $F > F_s$ entsprechend einen Standard $s = \overline{e}^*$ festsetzt. Man kann folgendes Ergebnis zusammenfassen:

Proposition 6.15 (Standards) *Es sei angenommen, daß der Regulator einen Standard festsetzt. In diesem Fall ist das teilspielperfekte Gleichgewicht des Spiels B charakterisiert durch Stückkosten F_s mit $\underline{F} < F_s < \overline{F}$, so daß*

i.) für $F > F_s$ keine Investitionen in F&E getätigt werden. Der Standard beträgt $s = \bar{e}^$.*

ii.) Für $F \leq F_s$ kommt es zu Investitionen in F&E. Ob das F&E-Niveau höher oder niedriger als sozial optimal ist, ist nicht eindeutig.

Im Fall nicht erfolgreicher Innovation gilt $s = \bar{e}^$.*

Im Fall erfolgreicher Innovation übernehmen alle Firmen die neue Technologie, d.h. $n_I = n$. Der Standard beträgt $s = \underline{e}^$.*

6.4.4 Szenario C

Zuletzt soll Szenario C untersucht werden. In diesem Fall verpflichtet sich der Regulator, die Höhe seines Instrumentes erst anzupassen, *nachdem* die Firmen die neue Technologie übernommen haben.

6.4.4.1 Steuern und Zertifikate

Man erinnere sich, daß in Spiel C Steuern und Zertifikate äquivalente Instrumente darstellen. Im folgenden sollen die beiden alternativen Instrumente daher wieder zusammen betrachtet werden. Dabei bezeichne x den Preis für Emissionen, d.h. wahlweise den Marktpreis für Zertifikate bzw. den Steuersatz, d.h. $x = \sigma = \tau$. Nachdem n_I viele Firmen die neue Technologie übernommen haben, wird der Regulator den Preis für Emissionen $x(n_I)$ so setzen, daß die Grenzvermeidungskosten der Firmen dem aggregierten Grenzscha-den entsprechen. Es bezeichne x_0 den optimalen Preis für Emissionen, falls keine Firma die neue Technologie übernommen hat. Man beachte, daß $x_0 = \overline{MD}^*$ gilt. Andererseits ist der Preis für Emissionen $x(n_I)$ um so niedriger, je mehr Firmen die neue Technologie übernommen haben. Es bezeichne x_I den optimalen Preis für Emissionen, falls alle Firmen die neue Technologie übernommen haben. Man beachte wiederum, daß $x_I = \underline{MD}^*$ gilt. Der optimale Preis für Emissionen liegt daher im Intervall $[x_I, x_0]$.

Nun unterstelle man zunächst Stückkosten $F \geq \bar{F}$. Offensichtlich gilt für den Preis für die Innovation $P = \Delta C(x) \leq F$ für alle $x \in [x_I, x_0]$. Daher erwartet der Innovator keinen positiven Erlös aus der Innovation und hat keinen Anreiz, die neue Technologie zu entwickeln. Als nächstes betrachte man Stückkosten $F \in (\underline{F}, \bar{F})$. Es sei daran erinnert, daß in einem Investitionsleichgewicht $\Delta C(x) = P$ erfüllt sein muß. Man beachte, daß der Preis für Emissionen $x(n_I)$ um so geringer ausfällt, je mehr Firmen die neue Technologie übernommen haben. Ferner sei daran erinnert, daß die sozial optimale Anzahl an Firmen n_I^* , die die neue Technologie übernehmen sollten, die Gleichung $\Delta C(x(n_I^*)) = F$ erfüllt. Andererseits wird der Innovator offensichtlich $P > F$ setzen. Dann kann $\Delta C(x) = P$ jedoch nur für ein $n_I < n_I^*$ erfüllt sein. Zuletzt gehe man davon aus, daß $F \leq \underline{F}$ gilt. An anderer Stelle wurde bereits gezeigt, daß $\Delta C(x_I) = \underline{F}$ gilt. Daher kann der Innovator einen Preis $P = \Delta C(x) > F$ setzen. Man erhält folgendes Resultat:

Proposition 6.16 (Marktinstrumente) *Es sei angenommen, daß die Industrie mittels Steuern oder Zertifikate reguliert ist. In diesem Fall kann das teilspielperfekte Gleichgewicht von Spiel C durch ein F_x mit $F_x < \underline{F}$ charakterisiert werden, so daß*

- i.) für $F \geq \bar{F}$ keine Investitionen in $F\mathcal{E}E$ getätigt werden. Der Preis für Emissionen beträgt $x = \overline{MD}^*$ und die aggregierten Emissionen sind $E = \bar{E}^*$.
- ii.) für $F < \bar{F}$ es zu Unterinvestition in $F\mathcal{E}E$ kommt.

Im Fall nicht erfolgreicher Innovation beträgt der Preis für Emissionen $x = \overline{MD}^$, und die aggregierten Emissionen sind $E = \bar{E}^*$.*

Im Fall erfolgreicher Innovation wird die neue Technologie

- a.) für $F > F_x$ von zu wenigen Firmen übernommen, d.h. $n_I < n_I^*$. Der Preis für Emissionen und die aggregierten Emissionen sind höher als sozial optimal, d.h. $x > MD^*$ und $E > E^*$.
- b.) für $F \leq F_x$ von allen Firmen übernommen, d.h. $n_I = n$. Der Preis für Emissionen entspricht $x = \underline{MD}^*$ und die aggregierten Emissionen sind $E = \underline{E}^*$. Die Allokation ist also sozial optimal.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Man beachte, daß dieses Resultat im Gegensatz zu FEES [1998] steht. Denn selbst, wenn der Regulator sich optimal an die Diffusion einer neuen Technologie anpaßt, kann er bei Marktinstrumenten wegen der Monopolstellung des Innovators in der Regel die sozial optimale Allokation nicht umsetzen.

6.4.4.2 Standards

Zuletzt soll nochmals das Spiel C untersucht werden, wenn der Regulator einen *Standard* festsetzt. In Abschnitt 4.1 wurde gezeigt, daß bei Standards das teilspielperfekte Gleichgewicht unter Umständen nicht eindeutig ist. In der Folge wurde die Analyse auf das Gleichgewicht beschränkt, in dem die Firmen die neue Technologie für $F < \widehat{F}$ übernehmen, und entsprechend für $F \geq \widehat{F}$ nicht übernehmen. In diesem Fall wird der Innovator einen Preis $P = \Delta C(\bar{e}^*)$ setzen. Zusammenfassend erhält man als Ergebnis:

Proposition 6.17 (Standards) *Es sei angenommen, daß die Industrie mittels eines Standards reguliert ist. Dann kann das teilspielperfekte Gleichgewicht von Spiel C folgendermaßen charakterisiert werden:*

- i.) Für $F \geq \widehat{F}$ findet kein F&E statt. Der Standard entspricht $s = \bar{e}^*$.
- ii.) Für $F < \widehat{F}$ kommt es zu F&E. Ob das F&E-Niveau größer oder kleiner als sozial optimal ist, ist nicht eindeutig.

Im Fall nicht erfolgreicher Innovation entspricht der Standard $s = \bar{e}^$.*

Im Falle erfolgreicher Innovation übernehmen alle Firmen die neue Technologie, d.h. $n_I = n$ und der Standard entspricht $s = \underline{e}^$.*

Man beachte, daß für Stückkosten $F \in [\widehat{F}, \bar{F}]$ die Innovationsanreize suboptimal sind.

6.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Anreize eines Innovators untersucht, eine neue Vermeidungstechnologie zu entwickeln. Die Entwicklung einer neuen Technologie erfordert den Einsatz von Ressourcen. Der Erfolg von F&E ist nicht sicher, aber um so wahrscheinlicher, je höher der Aufwand an Ressourcen ist. Nach erfolgreicher Entwicklung

der neuen Technologie kann der Innovator diese als Monopolist an verschmutzende Firmen verkaufen. Der Innovator wird um so mehr Ressourcen in die Entwicklung der neuen Technologie stecken, je höher der erwartete Erlös aus dem Verkauf der neuen Technologie ist. Entscheidend für den Erlös wiederum ist die Nachfragefunktion nach der neuen Technologie sowie die Höhe der Stückkosten für die neue Technologie. In Kapitel 3 wurde bereits gezeigt, daß die Eigenschaft der Nachfragefunktion durch das umweltpolitische Instrument bestimmt wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere Szenarien betrachtet und die teilspielperfekten Gleichgewichte der korrespondierenden Spiele charakterisiert. Zum einen verpflichtet sich der Regulator auf die ursprünglich, d.h. vor einer Innovation, gesetzte Höhe des umweltpolitischen Instrumentes. Zum anderen verpflichtet er sich, die Höhe des Instrumentes optimal an die Innovation bzw. Diffusion der neuen Technologie anzupassen.

In Szenario A verpflichtet sich der Regulator auf die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes, bevor die neue Technologie entwickelt wird. Es zeigt sich, daß in diesem Fall Steuern und Subventionen die höchsten Anreize in F&E aller untersuchten Instrumente bieten. Ob die Anreize in F&E bei Standards oder bei Zertifikaten höher sind, ist im allgemeinen nicht eindeutig, sondern wird vielmehr durch die Höhe der Stückkosten für die neue Technologie bestimmt. Handelbare und auktionierte Zertifikate bieten – analog zu den Resultaten bezüglich der Diffusion in Kapitel 4 – gleich hohe Anreize in F&E. Hat der Regulator die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes bezüglich der herkömmlichen Technologie optimal gesetzt, dann sind die Anreize in F&E bei Steuern und bei Subventionen zu hoch, während sie bei Zertifikaten und bei Standards zu niedrig sind. Bei Steuern, Subventionen und Standards kann es – in Übereinstimmung mit den Resultaten aus Kapitel 4 – zu Überinvestition in die neue Technologie kommen. Bei Zertifikaten übernehmen in der Regel nicht alle Firmen die neue Technologie. In diesem Fall kommt es – analog zu dem Ergebnis in Abschnitt 4.1 – zu suboptimaler Diffusion. Die Strategie des Regulators in Szenario A, sich auf die bezüglich der konventionellen Technologie optimale Höhe des Instrumentes zu verpflichten, ist jedoch nicht ex-post effizient. Nach Übernahme der neuen Technologie sind die aggregierten Emissionen bei Steuern und Subventionen zu niedrig und bei einem Standard und bei Zertifikaten zu hoch.

In Szenario B verpflichtet sich der Regulator, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes optimal an die neue Technologie anzupassen. In diesem Fall bieten Standards

die höchsten Anreize in F&E. Mit der neuen Technologie auf dem Markt setzt der Regulator einen strengeren Standard. Ein Herabsetzen des Standards erhöht wiederum die Zahlungsbereitschaft der Firmen – und damit den Erlös des Innovators. Bei Zertifikaten und Steuern wird der Regulator den Preis für Emissionen hingegen nach erfolgreicher Innovation senken. Dadurch verringert sich die Zahlungsbereitschaft der Firmen. Bei Zertifikaten muß der Regulator zwischen der effizienten Menge an Emissionen und der optimalen Diffusion der neuen Technologie abwägen. Bei Steuern kann der Regulator nur eine vollständige Diffusion der neuen Technologie durchsetzen. Sowohl bei Steuern (Subventionen) als auch bei Zertifikaten entspricht der Grenzschaten daher im allgemeinen nicht den Grenzvermeidungskosten. Damit ist die Strategie des Regulators in Szenario B bei einer Regulierung mittels Marktinstrumenten nicht zeitkonsistent. Bei Zertifikaten sowie bei Steuern hat der Regulator vielmehr einen Anreiz die Menge an Zertifikaten bzw. den Steuersatz nachträglich zu ändern, um eine effiziente Allokation der Emissionen zu erreichen.

In Szenario C verpflichtet der Regulator sich schließlich, die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes optimal an die Diffusion der neuen Technologie anzupassen. In diesem Fall sind die Anreize in F&E bei allen betrachteten Instrumenten suboptimal. Darüber hinaus ist – im Gegensatz zu FEES [1998] – bei Marktinstrumenten auch die Diffusion der neuen Technologie suboptimal, da der Innovator zusätzlich zu den Stückkosten der neuen Technologie noch eine Lizenzgebühr verlangt.

Kapitel 7

Diskussion und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, die dynamische Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente in die Entwicklung und den Einsatz neuer Vermeidungstechnologien zu untersuchen. Hierzu wurde ein Modell entwickelt, anhand dessen der Einfluß umweltpolitischer Instrumente sowohl auf die Höhe der Entwicklungsanstrengungen in eine umweltfreundlichere Technologie als auch auf die Nachfrage nach einer solchen Technologie bestimmt werden kann.

Die traditionelle umweltökonomische Literatur, die sich mit der dynamischen Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente beschäftigt (MILLIMAN UND PRINCE [1989], JUNG ET AL. [1996], MONTERO [1998]), unterstellen zum einen eine vollständige Diffusion einer neuen Vermeidungstechnologie. Zum anderen wird das Preissetzungsverhalten des Innovators als Monopolist nicht berücksichtigt. Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Modell konnte hingegen sowohl das Investitionsverhalten der verschmutzenden Firmen als auch das des Innovators analysiert werden. Hierzu wurde die Nachfragefunktion nach der neuen Technologie explizit hergeleitet und die Allokation im teilspielperfekten Nash-Gleichgewicht der betrachteten Szenarien charakterisiert.

Mit dem in dieser Arbeit vorgestellte Modell wurde die graphische Analyse der traditionellen Literatur formalisiert. Betrachtet wurde eine aus n symmetrischen Firmen bestehende, kompetitive⁶⁸ Industrie. Als unerwünschtes Nebenprodukt emittieren die Firmen einen homogenen Schadstoff, der zunächst mit einer konventionellen Technolo-

⁶⁸„Kompetitiv“ ist hier in doppeltem Sinne gemeint. Zum einen verhalten sich die Firmen als Preisnehmer auf dem Zertifikatemarkt. Zum anderen können sie das aggregierte Emissionsniveau durch Übernahme der neuen Technologie nicht beeinflussen.

gie vermieden werden kann. Dabei wurde der Outputmarkt nicht berücksichtigt, sondern nur der Vermeidungssektor betrachtet. Es handelt sich also gewissermaßen um ein Partial-Partial-Modell. Eine Firma, die nicht Teil der verschmutzenden Industrie ist, kann eine neue Vermeidungstechnologie entwickeln. Bei der Innovation handelt es sich dabei um ein öffentliches Gut, dessen kostenlose Nachahmung durch ein Patent geschützt ist. Der Innovator kann die neue Technologie daher zum Monopolpreis an die Firmen der verschmutzenden Industrie verkaufen. Der Monopolpreis für die neue Technologie hängt zum einen von der Nachfragefunktion, zum anderen von der Produktionsfunktion ab. Die Nachfragefunktion wird von der Art der Regulierung bestimmt. Im Gegensatz zur traditionellen Literatur wird nicht ad hoc eine vollständige Diffusion postuliert, sondern die Nachfragefunktion nach der neuen Technologie aus den Annahmen über die Vermeidungstechnologien und die Art der Regulierung hergeleitet. Die Produktionsfunktion hat hingegen eine einfache Form: Die Herstellung der neuen Technologie ist zu konstanten Grenzkosten möglich. Die Höhe des Erlöses aus dem Verkauf der neuen Technologie bestimmt den F&E-Aufwand. Die Wahrscheinlichkeit, mit der die Innovation erfolgreich ist, hängt wiederum von der Höhe der F&E-Ausgaben ab.

Die vorliegende Arbeit nimmt eine normative Sichtweise ein. Im Rahmen des Modells wird sowohl die Lösung eines sozialen Planers, d.h. die sozial optimale Allokation, untersucht, als auch das dezentrale Ergebnis der Industrie unter verschiedenen umweltpolitischen Instrumenten hergeleitet. Betrachtet werden dabei Steuern, Subventionen, kostenlos ausgeteilte und auktionierte Zertifikate sowie einheitliche Emissionsobergrenzen (Standards). Um den Einfluß des Zeitpunktes, zu dem der Regulator die Höhe des Instrumentes festlegt, auf die dynamische Anreizwirkung zu untersuchen, wurden mehrere Szenarien betrachtet: In Szenario A verpflichtet sich der Regulator für einen hinreichend langen Zeitraum auf ein aggregiertes Emissionsziel, bevor die neue Technologie auf dem Markt ist. In Szenario B kündigt der Regulator an, die Höhe des Instrumentes optimal an die Innovation der neuen Technologie anzupassen. In Szenario C verpflichtet sich der Regulator, die Höhe des Instrumentes optimal an die Diffusion der neuen Technologie anzupassen.

Aus den Resultaten der hier vorgestellten Arbeit läßt sich kein für alle betrachteten Szenarien gleichermaßen gültiger Vergleich der Höhe der Anreizwirkung der einzelnen Instrumenten ableiten. Die sozial optimale Allokation des F&E-Einsatzes, der Technologien und der Emissionen kann mit keinem der betrachteten Instrumente umgesetzt werden. Welches der Instrumente die höchsten Anreize in die Entwicklung sowie die

Übernahme der neuen Technologie bietet, wird zum einen vom Zeitpunkt der Regulierung, d.h. vom gewählten Szenario, zum anderen von der Höhe der Produktions- bzw. Fixkosten bestimmt. Die Resultate dieser Arbeit stehen in mehreren Punkten im Gegensatz zur traditionellen umweltökonomischen Literatur, die die dynamische Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente vergleicht: i.) Zertifikate bieten keine höheren Anreize, eine neue Technologie zu übernehmen als Steuern; ii.) Auktionierte und kostenlos ausgegebene Zertifikate sind äquivalente Instrumente bezüglich ihrer dynamischen Anreizwirkung; iii.) Einheitliche Emissionsobergrenzen (Standards) bieten unter Umständen höhere Anreize in F&E als Zertifikate bzw. Steuern. iv.) Unter Berücksichtigung des monopolistischen Preissetzungsverhaltens des Innovators führen Steuern und Zertifikate auch dann nicht zur sozial optimalen Allokation, wenn der Regulator die Höhe des Instrumentes an die Diffusion einer neuen Technologie anpaßt.

Abschließend sollen die Resultate dieser Arbeit im Hinblick auf eine Politikempfehlung diskutiert werden. Dabei erscheint zunächst zweierlei interessant. Zum einen lassen sich – wie dies teilweise schon im direkten Anschluß an die Ergebnisse in den vorhergehenden Kapiteln geschehen ist – die alternativen umweltpolitischen Instrumente bezüglich ihrer Wohlfahrtseffekte bei einem bestimmten Szenario vergleichen. Zum anderen ist es von Interesse herauszufinden, welches der betrachteten Szenarien bei gegebenem umweltpolitischen Instrument zu den geringsten sozialen Kosten führt.⁶⁹ Für eine Politikempfehlung sind diese normative Fragestellungen jedoch nicht ausreichend. Zusätzlich stellt sich die Frage der *Glaubwürdigkeit* des betrachteten Regulierungsmechanismus und die politische *Durchsetzbarkeit* des jeweiligen Instrumentes.

7.1 Umweltpolitische Diskussion

Wie die Theorie der politischen Ökonomie zeigt, wird die Durchsetzbarkeit eines umweltpolitischen Instrumentes maßgeblich von der Einflußnahme verschiedener Lobbygruppen bestimmt. Man betrachte hierzu exemplarisch Szenario B. Es wurde gezeigt, daß der Regulator nach erfolgreicher Innovation den Steuersatz senken bzw. die Menge an ausgegebenen Zertifikaten verringern wird. Im Fall von Steuern würden die aggregierten Emissionen durch diesen Eingriff ansteigen, während sie bei Zertifikaten fallen

⁶⁹Dieser Aspekt läßt sich anhand der analytischen Ergebnisse dieser Arbeit nicht allgemein beantworten. Siehe hierzu auch Abschnitt 7.2.

würden. MARIN [1991] betont jedoch, daß es a priori nicht klar ist, welche Lobbygruppe im politischen Prozeß erfolgreicher ist: Die Umweltschützer, die bei Steuern versuchen werden, eine Erhöhung der aggregierten Emissionen zu verhindern, oder die Industrie bzw. die Gewerkschaften, die eine Verringerung der Menge an Zertifikaten bekämpfen werden.

Ein weiterer Aspekt der Durchsetzbarkeit eines umweltpolitischen Instrumentes ist die bei verschiedenen Instrumenten unterschiedliche gesamte Kostenbelastung für die Firmen. Die Höhe der Gesamtkosten der Firmen wird maßgeblich durch den Grad der Besitzrechte der Firmen an den Emissionen beeinflusst. Man vergleiche hierzu auch Tabelle 7.1. Bei Subventionen erhalten die Firmen für vermiedene Emissionen eine Transferzahlung.⁷⁰ Bei Emissionsobergrenzen müssen die Firmen hingegen für ihre Vermeidungskosten aufkommen. Bei Steuern und versteigerten Zertifikaten fallen zusätzlich zu den Vermeidungskosten Transferzahlungen für nicht-vermiedene Emissionen an den Regulator an. Vor allem letztere können die Ertragskraft der Unternehmen unter Umständen stark mindern. Aufgrund dieser unterschiedlichen Kostenbelastungen betonen SPULBER [1985] sowie PEZZEY [1992],⁷¹ daß nur solche Preis- und Mengeninstrumente direkt vergleichbar sind, denen dieselbe Verteilung der Besitzrechte zu Grunde liegt. Die Bedeutung der Besitzrechte spielen auch bei GERSBACH UND GLAZER [1999] eine Rolle. Sie zeigen, daß die Ankündigung einer Steuer zu einem Hold-up-Problem führen kann. Verhalten sich die Firmen nämlich strategisch und investieren nicht – wie vom Regulator vorgesehen – in eine Vermeidungstechnologie, dann kann die Einführung einer Steuer zu einer unverhältnismäßig hohen Kostenbelastung für die Firmen führen. Diese schreckt den Regulator davor ab, die Steuer – wie angekündigt – einzuführen. GERSBACH UND GLAZER zeigen, daß ein Regime kostenlos ausgegebener Zertifikate hingegen durchsetzbar ist. Die Firmen haben keine strategischen Anreize, nicht zu investieren. Der Grund dafür liegt in der Tatsache, daß bei kostenlos ausgeteilten Zertifikaten die Besitzrechte an den Emissionen bei den Firmen liegen. Firmen, die investiert haben, können Zertifikate an nicht-investierende Firmen

⁷⁰Dies entspricht bei handelbaren Zertifikaten dem Fall, daß der Regulator zunächst die Menge an Zertifikaten kostenlos ausgibt, die dem Emissionsniveau im unregulierten Fall entspricht. Anschließend kauft er so viele Zertifikate von den Firmen zurück, bis die in der Industrie verbleibende Menge an Zertifikaten dem angestrebten aggregierten Emissionsziel entspricht.

⁷¹Diese Autoren betrachten die statische Effizienz und das langfristige Verhalten von Firmen, den Markt zu verlassen bzw. in den Markt einzutreten.

Art der Regulierung	Grad der Besitzrechte der Firmen an Emissionen		
	Null	anteilig	vollständig
Preis	Steuer	Steuer kombiniert mit Subvention	Subvention
Menge	auktionierte Zertifikate	kostenlos ausgeteilte Zertifikate, Emissionsobergrenze	kostenlos ausgeteilte und anschließend vom Regulator zurückgekaufte Zertifikate

Tabelle 7.1: *Kategorisierung der Verteilung der Besitzrechte zwischen Regulator und Firmen nach PEZZEY [1992].*

verkaufen und so ihre Investition teilweise refinanzieren. FARROW [1995] entwickelt einen Mechanismus, bei dem kostenlos ausgeteilte Zertifikate bezüglich der politischen Ökonomie gleich der einer Steuer sind. Sie können dies erreichen, indem sie die Steuern mit einer Pauschalsubvention kombinieren.⁷²

Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt bezüglich der Umsetzung eines umweltpolitischen Instrumentes ist die Glaubwürdigkeit bzw. die *Zeitkonsistenz* des Regulierungsmechanismus. Szenario A beschreibt die Selbstverpflichtung des Regulators auf die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes. Nach einer Innovation hat der Regulator jedoch – wie gezeigt wurde – in der Regel einen Anreiz, die Höhe des Instrumentes trotzdem anzupassen. In der Praxis müßte sich eine Regierung daher Vertrauen erworben haben, dieser Versuchung des Bruchs der Selbstverpflichtung zu widerstehen. Szenario B beschreibt hingegen eine Situation, in der der Regulator die neue Technologie zunächst beobachtet. Daraufhin kann er die Höhe seines Instrumentes an die neue Technologie anpassen, bevor die Firmen die neue Technologie übernehmen. Auch in diesem Szenario ergab sich, daß der Regulator einen Anreiz hat, die Höhe des Instrumentes nochmals anzupassen, nachdem die Firmen die neue Technologie übernommen haben. Szenario B stellt daher kein zeitkonsistentes Verhalten des Regulators dar. In Szenario C verhält sich der Regulator dagegen laut Konstruktion zeitkonsistent: Er handelt zuletzt und paßt die Höhe des umweltpolitischen Instrumentes optimal an die Diffusion der neuen Technologie an.

Bevor in Abschnitt 7.2 ein Ausblick auf mögliche, zukünftige Forschungsprojekte gegeben wird, sollen die mit dieser Arbeit gewonnenen Resultate im Hinblick auf ihre

⁷²Man vergleiche hierzu auch Spalte „anteilig“ in Tabelle 7.1.

praktische Relevanz abschließend diskutiert werden.

7.1.1 Steuern und Subventionen

Man betrachte zunächst den Fall einer *Ökosteuer*. Politiker und Umweltschützer propagieren eine Ökosteuer oft damit, daß durch sie die Entwicklung umweltfreundlicher Technologien forciert werde. Ein oft wenig beachteter Effekt einer „erfolgreichen“ Ökosteuer ist jedoch, daß – zumindest wenn man ein Wirtschaftswachstum außer Acht läßt – der Steuersatz gesenkt werden sollte, da die aggregierten Grenzvermeidungskosten sinken (vergleiche Szenarien B und C). MILLIMAN UND PRINCE [1989] betonen, daß eine Anpassung des Steuersatzes in der Praxis aus zwei Gründen in der Regel nicht zu erwarten ist. Zum einen erhöht eine Verringerung des Steuersatzes die aggregierten Emissionen. Daher wird es Widerstand von Seiten der Umweltverbände geben. Zum anderen – wahrscheinlich wichtiger – würden damit die Einnahmen einer Ökosteuer weiter sinken. Es sei daran erinnert, daß die Einnahmen durch die Übernahme der neuen Technologie ohnehin schon gesunken sind. Allerdings wurde die Verwendung der Steuereinnahmen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.⁷³ In der Praxis ist dieser Aspekt jedoch vor allem im Hinblick auf eine ökologische Steuerreform wichtig. Eine Diskussion der ökologischen Steuerreform würde den Rahmen dieser Arbeit jedoch sprengen.⁷⁴

Insofern erscheint Szenario A, bei dem sich der Regulator verpflichtet hat, die einmal gewählte Höhe des Instrumentes nicht zu verändern, der Praxis am nächsten. In diesem Fall bieten Steuern die höchsten dynamischen Anreize aller untersuchten Instrumente. Insbesondere sind in der Regel die Anreize in F&E sowie in die Übernahme der neuen Technologie höher als sozial optimal, wenn der Regulator die Höhe des Steuersatzes bezüglich der herkömmlichen Technologie optimal gesetzt hat.

Daher stellt sich die Frage, ob der Regulator aus wohlfahrtstheoretischer Sicht besser beraten wäre, die Höhe des Steuersatzes an die Innovation bzw. Diffusion der neu-

⁷³Mit den Annahmen dieser Arbeit ist eine pauschale Rückerstattung der Steuereinnahmen an die Firmen konsistent.

⁷⁴Das in dieser Arbeit betrachtete Partialmodell ist hierfür ohnehin nicht geeignet. Für einen Überblick über die wissenschaftliche Diskussion einer doppelten Dividende bei einer ökologischen Steuerreform sei unter anderen auf BOVENBERG UND DE MOOIJ [1994] und GOULDER [1995] verwiesen.

en Technologie anzupassen. Sowohl in Szenario B als auch in Szenario C kommt es jedoch zu suboptimalen Innovationsanreizen. Für hinreichend hohe Stückkosten der neuen Technologie ist das F&E-Niveau bei Szenario B Null, obwohl der soziale Wert der neuen Technologie positiv ist. In diesem Fall ist Szenario C vorzuziehen. Während das Verhalten des Regulators in Szenario B eine vollständige Diffusion der neuen Technologie induziert, übernehmen in Szenario C in der Regel zu wenige Firmen die neue Technologie.

Wie bereits mehrfach erwähnt, sind unter den in dieser Arbeit getroffenen Annahmen Emissionssteuern und Subventionen auf vermiedene Emissionen äquivalente Instrumente bezüglich ihrer Anreizwirkung sowohl in die Entwicklung als auch die Übernahme einer neuen Technologie. *Subventionen* auf die Vermeidung von Schadstoffen werden dennoch von Ökonomen sowie von Politikern meist abgelehnt. Zum einen führen sie über lange Sicht dazu, daß zu viele Firmen in den Markt eintreten (SPULBER [1985], BAUMOL UND OATES [1988]). Zum anderen liegen bei Subventionen die Besitzrechte an den Emissionen bei den Verschmutzern. Letzteres erscheint in der Öffentlichkeit als ungerecht. Vielmehr sollten nach landläufiger Meinung die Besitzrechte an der Umwelt grundsätzlich bei der Gesellschaft liegen (SPULBER [1985]).⁷⁵ Eine Subventionierung der Vermeidung bietet jedoch auch gegenüber einer noch unregulierten Industrie falsche Anreize. Die Firmen einer noch unregulierten Industrie haben nämlich bei Erwartung einer Subvention einen Anreiz, das Emissionsniveau vor einer Regulierung möglichst hoch zu wählen, um dann im Falle einer Regulierung möglichst hohe Subventionen einstreichen zu können. FREDERIKSSON [1997] zeigt anhand eines polit-ökonomischen Modells, daß Subventionen auf die Vermeidung von Emissionen jedoch einen Mechanismus bilden können, Ökosteuererinnahmen (teilweise) an die Firmen zurückzuteilen, um auf diese Weise die Akzeptanz in der Industrie gegenüber einer Regulierung zu erhöhen.

7.1.2 Zertifikate und Optionen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, daß kostenlos ausgeteilte sowie auktionierte Zertifikate äquivalente Instrumente im Hinblick auf ihre Anreizwirkung in die Ent-

⁷⁵Dies entspricht dem „Verursacherprinzip“, wonach der Verursacher die Kosten des Schadens zu tragen hat. Subventionen entsprechen demnach dem „Gemeinlastprinzip“, wonach die Gesellschaft die Kosten des Schadens zu übernehmen hat.

wicklung und den Einsatz einer neuen Technologie sind. Analog zu Subventionen und Steuern unterscheiden sie sich jedoch in der Verteilung der Besitzrechte an den Emissionen. Während die Rechte im Fall von auktionierten Zertifikaten zunächst bei der Gesellschaft bzw. beim Regulator liegen, werden sie bei kostenlos ausgegebenen Zertifikaten in der Höhe der verteilten Menge den verschmutzenden Firmen zugebilligt.⁷⁶ Mit anderen Worten ist die kostenlose Vergabe von Zertifikaten äquivalent zu einer Pauschalsubventionierung der Firmen.⁷⁷ Kostenlos ausgegebene Zertifikate haben daher den Vorteil, auf verhältnismäßig wenig Widerstand innerhalb der betroffenen Industrie zu stoßen, da sie eine geringe gesamte Kostenbelastung der Firmen verursachen. Interessanterweise scheint diese Art der „indirekten“ Subventionierung, wie PEZZEY [1992] bemerkt, in der öffentlichen Diskussion jedoch nicht in gleichem Maße Widerstand zu wecken wie im Fall einer direkten Subventionierung der Vermeidung von Emissionen.

Ein in dieser Arbeit nicht berücksichtigter Gesichtspunkt bei kostenlos ausgeteilten Zertifikaten ist, daß die Kosteneffizienz im Fall von marktmächtigen Firmen entscheidend davon abhängt, wie die Zertifikate verteilt werden (HAHN [1984]). Nur falls die Anfangsausstattung der Firmen mit Zertifikaten der effizienten Allokation der Emissionen entspricht, kommt es zu einer Vermeidung zu geringsten Kosten. BIGLAISER ET AL. [1995] zeigen darüber hinaus, daß ein Zertifikateregime nicht zeitkonsistent ist, wenn die Firmen durch ihre Investition das Anpassungsverhalten des Regulators beeinflussen können.

In Kapitel 5 wurde bereits erwähnt, daß es von Vorteil sein kann, wenn sich der Regulator langfristig auf ein aggregiertes Emissionsziel verpflichtet (vgl. Szenario A). Eine solche Selbstverpflichtung gibt den Firmen Planungs- und Investitionssicherheit. Zertifikate haben in diesem Fall gegenüber den anderen umweltökonomischen Instrumenten eine Reihe weiterer Vorteile: Zum einen sind Zertifikate zielsicher bezüglich der angestrebten aggregierten Emissionen. Zum anderen sind sie „inflationinvariant“, d.h. im Gegensatz zu einem pretialen Instrument wie Steuern oder Subventionen müssen sie nicht an die Inflation angeglichen werden. Andererseits wurde gezeigt, daß sowohl die Innovations- als auch die Diffusionsanreize suboptimal sind, falls sich der Regulator auf das bezüglich der konventionellen Technologie optimale Emissionsniveau verpflichtet.

⁷⁶Siehe hierzu auch Fußnote 70.

⁷⁷Aus diesem Grund sind kostenlos ausgegebene Zertifikate in der EU-Kommission nicht unumstritten. Eine Subventionierung von Firmen (mittels Zertifikaten) kann eine Verletzung des Binnenmarktes zur Folge haben (COM [1998]).

Dies hat zwei Ursachen: Zum einen nimmt die aggregierte Nachfrage nach Emissionen um so mehr ab, je mehr Firmen in die neue Technologie investieren. Dies hat einen externen Effekt zur Folge, der sich in einer fallenden Nachfragefunktion für die neue Technologie widerspiegelt. Zum anderen ist durch den Monopolaufschlag des Innovators der Preis für die neue Technologie höher als die Produktionskosten und damit die sozialen Grenzkosten der Bereitstellung der neuen Technologie. Daher stellt sich die Frage, ob der Regulator sich verpflichten sollte, die Zertifikatmenge an die neue Technologie anzupassen.

Doch auch bei den Szenarien B und C sind sowohl die *Innovationsanreize* als auch die *Diffusionsanreize*⁷⁸ eines Zertifikateregimes in der Regel suboptimal. Im Vergleich zu Szenario A ist die Menge an ausgegebenen Zertifikaten bei diesen beiden Szenarien jedoch geringer. Da der Erlös des Innovators sowie die Diffusion der neuen Technologie um so größer ist, je weniger Zertifikate ausgeteilt werden, ist zu erwarten, daß die erwarteten sozialen Kosten in Szenario B bzw. C geringer und damit näher am sozialen Optimum sind als bei Szenario A. Aus dieser Sicht erscheint es vorteilhaft für den Regulator, sich nicht auf die ursprünglich optimale Höhe an Zertifikaten festzulegen.

7.1.3 Einheitliche Emissionsobergrenzen

Es wurde bereits mehrfach erwähnt, daß einheitliche Emissionsobergrenzen von Ökonomen wegen ihrer statischen Ineffizienz im Fall asymmetrischer Firmen abgelehnt werden.⁷⁹ In der umweltökonomischen Diskussion wird oft behauptet, daß Emissionsobergrenzen auch in Bezug auf die dynamische Anreizwirkung Zertifikaten unterlegen seien. Die statische Ineffizienz von Emissionsobergrenzen impliziert jedoch, wie MONTERO [1998] feststellt, hohe Investitionsanreize. Die Anreize, eine neue Technologie zu entwickeln, können dabei *höher* sein als bei Zertifikaten. In dieser Arbeit wird dieses, der landläufigen Meinung widersprechende Resultat bestätigt.

⁷⁸In Kapitel 5.3 wird mit Optionen auf Zertifikate eine Alternative zu einem traditionellen Zertifikateregime vorgestellt. Dabei wird gezeigt, daß im Fall einer Versteigerung eines Optionsmenues eine optimale Diffusion der neuen Technologie erreicht werden kann. Im Hinblick auf eine Realisierung eines solchen Regulierungsmechanismus ist dabei besonders interessant, daß der Informationsbedarf des Regulators sich auf den Schaden der Emissionen beschränkt und der Regulator sich ex-ante auf den Mechanismus verpflichten kann.

⁷⁹Ein weiterer Grund wird von SPULBER [1985] vorgebracht. Er zeigt, daß Standards langfristig zu einer zu großen Anzahl an Firmen und zu zu hoher Verschmutzung führen.

Man betrachte hierzu zunächst Szenario A. Die Tatsache, daß die Firmen bei Zertifikaten Emissionsrechte untereinander handeln können, führt nicht nur dazu, daß sich die Grenzvermeidungskosten der Firmen bei partieller Diffusion aneinander anpassen werden, sondern auch dazu, daß nicht-investierende Firmen wegen des sinkenden Zertifikatpreises von den Investitionen der anderen Firmen profitieren. Wie bereits mehrfach diskutiert, verringert dieser Effekt die Zahlungsbereitschaft für die neue Technologie. Bei Emissionsobergrenzen ist die Nachfragefunktion hingegen vollkommen elastisch. Daher wird der Innovator in diesem Fall einen höheren Erlös erwirtschaften können.

Ein ähnlicher Vergleich ergibt sich in Szenario B. In diesem Fall paßt der Regulator die Höhe des Standards an die neue Technologie an. Dieses Szenario entspricht der Rechtspraxis vieler Länder. In Deutschland wird beispielsweise im Fall von Auflagen oft der sogenannte „Stand der Technik“⁸⁰ vorgeschrieben. Es sei daran erinnert, daß ein Standard in diesem Fall (Szenario B) die höchsten F&E-Anreize aller Instrumente ergab. Dieses Resultat stimmt insbesondere mit den Differenzen im Verlauf der Umweltpatente zwischen Deutschland und USA, wie er in Abbildung 2.1 dargestellt ist, überein. In den USA wurde – im Gegensatz zu Deutschland – die Auflagenpolitik schon früh durch Zertifikatemechanismen ersetzt. Dadurch sank der Vermeidungskostenaufwand in den USA nachweisbar gegenüber einer vergleichbaren Auflagenpolitik (ATKINSON UND TIETENBERG [1982,1991], MALONEY UND YANDLE [1984]).

Man könnte nun den Eindruck bekommen, daß Emissionsobergrenzen bezüglich ihrer Innovationsanreize gegenüber den marktorientierten Instrumenten bevorzugt werden sollten. Es sei jedoch daran erinnert, daß diese hohen Innovationsanreize durch eine statische Ineffizienz „erkauft“ werden. ROSE-ACKERMAN [1995] kommt so auch zu dem Schluß, daß Deutschland gegenüber den USA im Umweltschutz führend ist, allerdings zu ineffizient hohen Kosten.

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt im Hinblick auf die Durchsetzbarkeit einer Auflagenpolitik ist, daß Emissionsobergrenzen für die betroffenen Firmen – wie weiter oben bereits erwähnt – ausschließlich Vermeidungskosten induzieren. Zusätzliche

⁸⁰Der Begriff „Stand der Technik“ hat in Deutschland folgende Legaldefinition: » Stand der Technik im Sinne dieses Gesetzes ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme zur Begrenzung von Emissionen gesichert erscheinen läßt. Bei der Bestimmung des Standes der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg im Betrieb erprobt worden sind. « (§ 3 VI BImSchG und § 12 III KrW-/AbfG)

Transferzahlungen – wie bei Steuern bzw. versteigerten Zertifikaten – fallen hingegen nicht an. Nicht zuletzt aus diesem Grund werden Emissionsobergrenzen wahrscheinlich von vielen Unternehmen gegenüber Steuern vorgezogen.

7.2 Ausblick

Die vorgestellte Arbeit konnte nur einen Teil der Aspekte berücksichtigen, die bei einer Betrachtung der Anreizwirkung umweltpolitischer Instrumente in die Entwicklung sowie die Diffusion umweltfreundlicherer Technologien interessant erscheinen.

Es wurde gezeigt, daß der Regulator mit keinem der betrachteten Instrumente das soziale Optimum implementieren kann. Leider ist es anhand der in dieser Arbeit vorgestellten *analytischen* Resultate jedoch nicht allgemein möglich, zu beurteilen, welches der Szenarien bzw. welches umweltpolitische Instrument zu den geringsten erwarteten sozialen Kosten und damit den geringsten Wohlfahrtsverlusten gegenüber der Lösung eines sozialen Planers führt. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang die Frage von Interesse, ob sich der Regulator – gegeben die Wahl des umweltpolitischen Instrumentes – auf die Höhe dieses umweltpolitischen Instrumentes verpflichten sollte oder diese an die Innovation bzw. Diffusion der neuen Technologie anpassen sollte. Um diesbezügliche Aussagen treffen zu können, ist es notwendig, das Modell anhand konkreter Parameterkonstellationen *numerisch* auszuwerten. Dabei ist zu erwarten, daß das relative Abschneiden der Szenarien bzw. der verursachten sozialen Kosten nicht nur von der Höhe der Fixkosten, sondern zusätzlich von weiteren Parametern wie z.B. der Steigung der Schadenfunktion bzw. der Vermeidungskosten der beiden alternativen Technologien abhängen wird.

Darüber hinaus ergeben sich noch eine Reihe von Erweiterungsmöglichkeiten und offener Fragen. Im Einklang mit der Annahme irreversibler F&E-Kosten bei unsicherem Forschungserfolg wurde in dieser Arbeit die „*up-stream*“ *Industrie* (der Innovator) monopolistisch modelliert. Näher an der Praxis ist sicherlich eine kompetitivere Struktur des Marktes für Vermeidungstechnologien. Verschmutzende Firmen können im allgemeinen zwischen verschiedenen Vermeidungstechnologien wählen. Dies könnte mit einem Preiswettbewerb bei horizontaler Produktdifferenzierung abgebildet werden. Ein möglicher Ansatz wäre das Hotelling-Modell (HOTELING [1928]) bzw. das Circular-City-Modell von SALOP [1979]. Darüber hinaus stehen die Zulieferer von Ver-

meidungstechnologien untereinander in der Regel auch im F&E-Wettbewerb. Ansätze der Modellierung dieses Aspektes findet man in REINGARNUM [1989].

Bei der Modellierung der „*down-stream*“ *Industrie* wurden in dieser Arbeit weder die *Outputmärkte* berücksichtigt noch der *Marktzutritt* neuer Firmen zugelassen. Für eine Industrie mit identischen Firmen und exogen vorgegebener Technologie zeigen SPULBER [1985], daß Steuern und Zertifikate äquivalente und langfristig optimale Instrumente sind. REQUATE [1995] kann zeigen, daß diese Äquivalenz aufbricht, wenn man die Entscheidung der Firmen, eine neue Technologie zu übernehmen, endogenisiert. Bei Zertifikaten treten dann im Fall einer vollständigen Übernahme einer neuen Technologie zu viele Firmen in den Markt ein. Im Rahmen einer Erweiterung der hier vorgestellten Arbeit könnte man noch einen Schritt weiter gehen: Welche Auswirkungen haben die Marktform des Outputmarkts und die Möglichkeit des freien Marktzutritts auf die Entscheidung, eine neue Technologie zu entwickeln.

Die modell-theoretischen Resultate dieser Arbeit sollten aber auch durch *empirische Untersuchungen* des Einflusses der Regulierungsintensität und der Wahl des umweltpolitischen Instrumentes auf das Innovations- und Investitionsverhalten überprüft werden. Hier bietet sich der Kraftwerksektor an. Für den amerikanischen Kraftwerksektor wurden schon eine Reihe von Studien über die Vermeidungskosten angefertigt (siehe SMITH ET AL. [1998]). Mit analogen ökonometrischen Schätzungen der SO₂- bzw. NO_x-Vermeidungskosten für den europäischen Kraftwerksektor könnte der Einfluß der Regulierungsintensität auf das Investitionsverhalten ermittelt werden. Dies erscheint besonders interessant, da in den USA der SO₂-Ausstoß von Kraftwerken mittels Zertifikaten reguliert ist, während in den europäischen Ländern überwiegend Emissionsauflagen und Emissionssteuern zum Einsatz kommen. Für eine Untersuchung des Einflusses der Regulierungsintensität auf das Innovationsverhalten könnten international vergleichende Daten über die Patentanmeldungen im Bereich der SO₂-, bzw. NO_x-Vermeidungstechnologien zusammengestellt werden. Ein allgemeinerer Vergleich der Patentanmeldungen im Umweltsektor wurde – wie schon erwähnt – bereits von LANJOUW UND MODY [1995] erstellt.

In der Praxis werden traditionelle Regulierungsmethoden des Ordnungsrechtes zunehmend durch marktorientierte Instrumente ergänzt und ersetzt. Beispiele hierfür sind die Ökosteuern in Europa bzw. das erfolgreiche amerikanische Acid-Rain-Zertifikate-Program zur Begrenzung des SO₂-Ausstoßes. Auf der Konferenz von Kyoto wurde darüber hinaus zum ersten Mal die Begrenzung des CO₂-Ausstosses mittels eines welt-

weiten Zertifikateregimes vorgeschlagen. Die Resultate dieser Arbeit legen jedoch nahe, daß marktorientierte Instrumente keine ausreichenden Anreize bieten, umweltfreundlichere Technologien zu entwickeln. PETRAKIS UND POYAGO-THEOTOKY [1997] zeigen darüber hinaus, daß eine Technologiepolitik, die die Umweltverträglichkeit von potentiellen neuen Technologien unberücksichtigt läßt, zu einer Verschlechterung der Umwelt durch eine kostengünstigere Produktion führen kann. Angesichts dieser Resultate erscheint es wichtig, technologie- und umweltpolitische Instrumente zukünftig verstärkt gemeinsam zu betrachten.

Mathematischer Anhang

Beweise zu Kapitel 3

Beweis Proposition 3.1:

Die Lagrangefunktion des Optimierungsproblems lautet

$$L = n_I[C_I(e_I) + F] + n_0C_0(e_0) + D(n_Ie_I + n_0e_0) \\ - \lambda_0n_0 - \lambda_I n_I - \mu(n_0 + n_I - n) \quad ,$$

wobei λ_i die Kuhn-Tucker-Multiplikatoren der Nichtnegativitätsbedingungen für n_I und $n_0 = n - n_I$ sind. Die Bedingungen erster Ordnung lauten:

$$C'_i(e_i) + D'(E) = 0 \quad , \quad i = 0, I \quad , \quad (\text{A.1})$$

$$C_0(e_0) + e_0D'(E) - \lambda_0 - \mu = 0 \quad , \quad (\text{A.2})$$

$$C_I(e_I) + e_ID'(E) + F - \lambda_I - \mu = 0 \quad . \quad (\text{A.3})$$

Elimination von μ ergibt:

$$C_I(e_I) - C_0(e_0) - (e_0 - e_I)D'(E) + F - \lambda_I + \lambda_0 = 0 \quad . \quad (\text{A.4})$$

Zunächst sei unterstellt, daß es eine innere Lösung gibt, d.h. $\lambda_0 = \lambda_I = 0$. Differenziert man das Gleichungssystem (A.1) - (A.4) bezüglich F , dann erhält man mit Hilfe des Umhüllendensatzes folgendes Gleichungssystem:

$$C''_i(e_i)e'_i(F) + D''(E) \cdot E'(F) = 0 \quad , \quad i = 0, I \quad (\text{A.5})$$

$$D''(E)E'(F)(e_0 - e_I) - 1 = 0 \quad .$$

Dies ergibt

$$E'(F) = \frac{1}{D''(E)(e_0 - e_I)} > 0 \quad , \quad (\text{A.6})$$

d.h. die optimalen aggregierten Emissionen *steigen* in F . Setzt man (A.6) in (A.5) ein, erhält man $e'_i(F) < 0$. Daher *fallen* die optimalen Emissionen jeder Firma in F , falls es optimal ist, daß beide Typen von Technologien betrieben werden. Die gesamten Emissionen können als $E(F) = n_I(F)e_I(F) + n_0(F)e_0(F)$ geschrieben werden. Differenzieren dieser Gleichung nach F und Auflösen nach $n'_I(F)$ ergibt

$$n'_I(F) = \frac{E'(F) - n_I(F)e'_I(F) - (n - n_I(F))e'_0(F)}{(e_I - e_0)} < 0 \quad .$$

Man betrachte nun mögliche Randlösungen. Dazu sei zunächst angenommen, daß F groß ist. Da $C_I(e_I) - C_0(e_0) + (e_I - e_0)D'(E)$ nach oben beschränkt sein muß, muß λ_I für hinreichend großes F positiv sein und daher $n_I = 0$. Die optimalen aggregierten Emissionen \bar{E}^* sind dann gegeben durch $AMAC_0(\bar{E}^*) = D'(\bar{E}^*)$. Nun betrachte man den Fall $F \approx 0$. Man beachte, daß wegen Gleichung (A.1) $C_I(e_I) \leq C_0(e_0) + (e_0 - e_I)D'(E)$ gilt. Daher muß λ_0 positiv sein und folglich $n_0 = 0$ bzw. $n_I = n$. $AMAC_I$ bezeichne die aggregierten Grenzvermeidungskosten, falls alle Firmen die neue Technologie übernommen haben. Dann sind die optimalen aggregierten Emissionen \underline{E}^* gegeben durch $AMAC_I(\underline{E}^*) = D'(\underline{E}^*)$. Da die Funktion der sozialen Kosten SC strikt konvex ist und alle Gleichungen stetig in F sind, sind die Lösungen eindeutig und stetig in F . Also existieren die Werte \underline{E} und \bar{E} . Q.E.D.

Beweis Lemma 3.1:

Es folgt der Beweis für Steuern. Der Beweis für Zertifikate verläuft analog. Aus den Annahmen über die Vermeidungskostenfunktionen, (3.3.1) und (3.3.2) folgt $e_0(\tau) > e_I(\tau)$ für beliebiges τ . Differenzieren der Kostendifferenz, d.h. Gleichung (3.3.3), nach τ ergibt $e_0 - e_I$ mittels des Umhüllenden Satzes. Daher steigt die Kostendifferenz zwischen den zwei Typen von Technologien in τ . Die drei Gleichungen (3.3.1) - (3.3.4) können also höchstens eine Lösung in τ besitzen. Da für $\tau = 0$ die Kostendifferenz gleich $-F$ ist und für x ausreichend groß die Kostendifferenz positiv wird, existiert höchstens ein Triple $(\tilde{\tau}, \tilde{e}_0, \tilde{e}_I)$, welches (3.3.1) - (3.3.4) löst. Differenzieren der Kostendifferenz nach F ergibt $dx/dF = 1/(e_0 - e_I) > 0$ mittels des Umhüllenden Satzes. Q.E.D.

Beweis Lemma 3.2:

Es erfolgt ein indirekter Beweis. Man betrachte zunächst den Fall $L > \bar{E}$ und nehme an, daß $\sigma \geq \tilde{\sigma}$. Dann ist die Kostendifferenz der beiden Technologien positiv,

und alle Firmen würden die neue Technologie übernehmen. Da laut Annahme $\sigma \geq \tilde{\sigma}$ gilt, sind die aggregierten Emissionen kleiner oder gleich \underline{E} , falls alle Firmen die neue Technologie übernommen haben. Die Faktornachfrage wäre also kleiner als \overline{E} . Damit wäre der Zertifikatemarkt für $L > \overline{E}$ nicht im Gleichgewicht. Falls $\sigma = \tilde{\sigma}$ gilt, sind die Firmen indifferent zwischen der neuen und der alten Technologie. Da die Firmen ihre Emissionen gemäß Gleichungen (3.3.1) bzw. (3.3.2) wählen, ist die größtmögliche Faktornachfrage nach Zertifikaten gleich \overline{E} . Damit wäre auch in diesem Fall der Zertifikatemarkt nicht im Gleichgewicht. Daher muß $\sigma < \tilde{\sigma}$ gelten. Man betrachte nun den Fall, daß $L < \underline{E}$ gilt. Mittels derselben Argumentation wie im ersten Fall kann man zeigen, daß $\sigma > \tilde{\sigma}$. Schließlich betrachte man den Fall $\underline{E} \leq L \leq \overline{E}$ und beachte, daß die Argumentation der vorhergehenden Fälle $\sigma = \tilde{\sigma}$ impliziert. Da die Firmen zwischen den beiden Technologien indifferent sind, ist die Faktornachfrage nach Zertifikaten $n_I \tilde{e}_I + (n - n_I) \tilde{e}_0$ und hängt von der Zahl der Firmen n_I ab, die die neue Technologie übernommen haben. Da das Angebot an Zertifikaten eindeutig ist, muß es ein eindeutiges Gleichgewicht geben, so daß $L = n_I \tilde{e}_I + (n - n_I) \tilde{e}_0$ gilt. Auflösen nach n_I ergibt (3.3.10). Q.E.D.

Beweise zu Kapitel 4

Beweis Proposition 4.1:

Falls alle Firmen die alte Technologie betreiben und der Steuersatz $\tau = \tilde{\tau}$ beträgt, werden insgesamt genau $\overline{E} = n \tilde{e}_0$ Einheiten des Schadstoffes emittiert. Da die Faktornachfrage nach Emissionen mit dem Steuersatz τ fällt, erhält man $\tau = AMAC_0(\hat{E}) < \tilde{\tau}$ für $\hat{E} > \overline{E}$. Dann ist jedoch $C_0(e_0(\tau)) + \tau e_0(\tau) < C_I(e_I(\tau)) + \tau e_I(\tau) + F$ wegen Lemma 3.1 und keine Firma investiert. Für $\hat{E} < \overline{E}$ erhält man $\tau = AMAC_0(\hat{E}) > \tilde{\tau}$. Aus Lemma 3.1 folgt, daß $C_0(e_0(\tau)) + \tau e_0(\tau) > C_I(e_I(\tau)) + \tau e_I(\tau) + F$ gilt, d.h. alle Firmen übernehmen die neue Technologie. Für $\hat{E} = \overline{E}$ erhält man schließlich $\tau = AMAC_0(\hat{E}) = \tilde{\tau}$, d.h. die Firmen sind indifferent zwischen den beiden Technologien. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.3:

Laut Lemma 3.1 existiert zu jedem F genau ein Preis für Emissionen \tilde{x} mit korrespondierenden eindeutigen Emissionen \tilde{e}_0 (bzw. \tilde{e}_I) im Fall der herkömmlichen (neuen)

Technologie, so daß beide Typen von Technologien gleichzeitig auf dem Markt sein können, d.h.

$$F = C_0(\tilde{e}_0) + \tilde{x}(\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I)C_I(\tilde{e}_I) \quad .$$

Darüber hinaus sei daran erinnert, daß $\overline{E} = n\tilde{e}_0$ sowie $\underline{E} = n\tilde{e}_I$ gilt. Im Fall eines Emissionsziels $\hat{E} = \overline{E}$ setzt der Regulator daher einen Standard $s = \tilde{e}_0$. Da aus der Konvexität der Vermeidungskosten $C_I(\tilde{e}_0) + \tilde{x}(\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I) - C_I(\tilde{e}_I) > 0$ folgt, erhält man

$$F = C_0(\tilde{e}_0) + \tilde{x}(\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I) - C_I(\tilde{e}_I) > C_0(\tilde{e}_0) - C_I(\tilde{e}_0) \quad .$$

Die Einsparung an variablen Kosten $C_0(\tilde{e}_0) - C_I(\tilde{e}_0)$ ist daher kleiner als die Höhe der Fixkosten. Damit ist der Kostenvorteil der neuen Technologie negativ, d.h. keine Firma ist bereit, die neue Technologie zu übernehmen. Umgekehrt verhält es sich, falls $\hat{E} = \underline{E}$ gilt. Nun ist der Standard durch $s = \tilde{e}_I$ gegeben. Aus der Konvexität der Vermeidungskosten folgt $C_0(\tilde{e}_0) + \tilde{x}(\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I) - C_0(\tilde{e}_I) < 0$, und man erhält

$$F = C_0(\tilde{e}_0) + \tilde{x}(\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I) - C_I(\tilde{e}_I) < C_0(\tilde{e}_I) - C_I(\tilde{e}_I) \quad .$$

Die Einsparung an variablen Kosten $C_0(\tilde{e}_I) - C_I(\tilde{e}_I)$ ist daher größer als die Höhe der Fixkosten, d.h. der Kostenvorteil der neuen Technologie ist positiv. Da die Kostendifferenz der beiden Technologien bei Standards stetig und fallend in s ist, existiert ein aggregierter Emissionsstandard $\hat{\hat{E}}$, so daß alle Firmen für $\hat{E} < \hat{\hat{E}}$ investieren und für $\hat{E} > \hat{\hat{E}}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.4:

Der optimale Steuersatz vor Übernahme der neuen Technologie ist durch den Schnittpunkt der $AMAC_0$ Kurve und der aggregierten Grenzschadenkurve gegeben. Daher gilt $\tau_0 = \overline{MD}^*$ (siehe auch Abbildung 3.2). Laut Proposition 3.1 ist das optimale Emissionsniveau für $F \geq \overline{F}$ gegeben durch \overline{E}^* . Laut Definition von \overline{F} ist daher das Emissionsniveau vor Übernahme der neuen Technologie gleich \overline{E}^* . Man definiere nun einen Steuersatz $\tilde{\tau}(F)$, der für gegebenes F Gleichung (3.3.4) genügt, und beachte, daß $\tau_0 = \tilde{\tau}(\overline{F})$. Dann ist klarerweise für $F > \overline{F}$ die Kostendifferenz $\Delta C(\tau)$ negativ, und keine Firma übernimmt die neue Technologie. Für $F < \overline{F}$ ist die Kostendifferenz positiv, und alle Firmen werden investieren. Für $F = \overline{F}$ sind die Firmen indifferent, es gibt jedoch keinen positiven Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.5:

Es sei angenommen, daß die neue Technologie auf dem Markt ist. Zunächst sei darauf hingewiesen, daß man in diesem Fall die sozial optimale Allokation implementieren kann, indem man die den sozial optimalen aggregierten Emissionen entsprechende Menge an Zertifikaten austeilte, d.h. $L = \overline{E}^*$. Der sozial optimale Grenzscha- den nach Übernahme der neuen Technologie entspricht dem korrespondierenden Marktpreis für Zertifikate, d.h. $MD^* = \sigma^*$. Man gehe zunächst von Fixkosten $F \geq \overline{F}$ aus. Dann sollte keine Firma die neue Technologie übernehmen und es gilt $E = \overline{E}^* = L_0$. Da die sozial optimale Menge an Emissionen zu einem Gleichgewicht auf dem Zertifikatemarkt führt, übernimmt keine Firma die neue Technologie. Nun seien Fixkosten $F \in (\underline{F}, \overline{F})$ betrachtet. In diesem Fall ist eine teilweise Übernahme der neuen Technologie sozial optimal und es gilt $\underline{E}^* < E < \overline{E}^*$. Man beachte, daß laut Gleichung (3.3.10) die Anzahl an Firmen n_I , die die neue Technologie übernimmt, in L fällt. Da $E^* < L_0$ übernehmen also weniger als sozial optimal viele Firmen die neue Technologie. Schließlich sei $F \leq \underline{F}$. In diesem Fall sollten alle Firmen die neue Technologie übernehmen und die optimalen Emissionen sind $E = \underline{E}^*$. Für $F = \underline{F}$ und $L = L_0$ übernehmen $n_I < n$ viele Firmen die neue Technologie. Differenzieren von Gleichung (3.3.10) bezüglich F in der Umgebung von $F = \underline{F}$ ergibt $n'_I(F) = n [\tilde{e}'_0(\sigma)\tilde{e}_I + \tilde{e}'_I(\sigma)\tilde{e}_0] \sigma'(F) / [\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I]^2 < 0$. Da für $F = 0$ offensichtlich alle Firmen die neue Technologie übernehmen, muß ein \hat{F} mit $0 \leq \hat{F} < \underline{F}$ existieren, so daß $n_I < n$ für $F > \hat{F}$ und $n_I = n$ für $F \leq \hat{F}$. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.6:

Es sei daran erinnert, daß das bezüglich der herkömmlichen Technologie sozial optimale Emissionsniveau mit \overline{E}^* bezeichnet ist. Daher gilt für die ursprünglich optimale Menge an Zertifikaten $L_0 = \overline{E}^*$. Der optimale Standard entspricht $s = \overline{E}^*/n$. Es bezeichne σ den Marktpreis für Zertifikate bei Fixkosten F . Man betrachte Fixkosten $F = \overline{F}$. In diesem Fall gilt $\sigma(F) = \overline{MD}^*$, d.h. der Zertifikatepreis entspricht dem sozial optimalen Grenzscha- den für $F = \overline{F}$. Die Firmen sind indifferent zwischen den beiden Technologien, d.h. $C_0(\tilde{e}_0) + \sigma(\overline{F})(\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I) - C_I(\tilde{e}_I) = \overline{F} \hat{=} A + B + C$ (vergleiche Abbildung A.1) und keine Firma übernimmt die neue Technologie. Nun beachte man, daß $e_0(\sigma(\overline{F})) = s$. Daher gilt $C_0(s) - C_I(s) \hat{=} A + B < \overline{F}$. Stetigkeit ergibt daher auch $C_0(s) - C_I(s) < C_0(\tilde{e}_0) + \sigma(F)(\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I) - C_I(\tilde{e}_I)$ für F ein wenig kleiner als \overline{F} . Daher investieren einige Firmen bei Zertifikaten aber keine bei Standards. Für

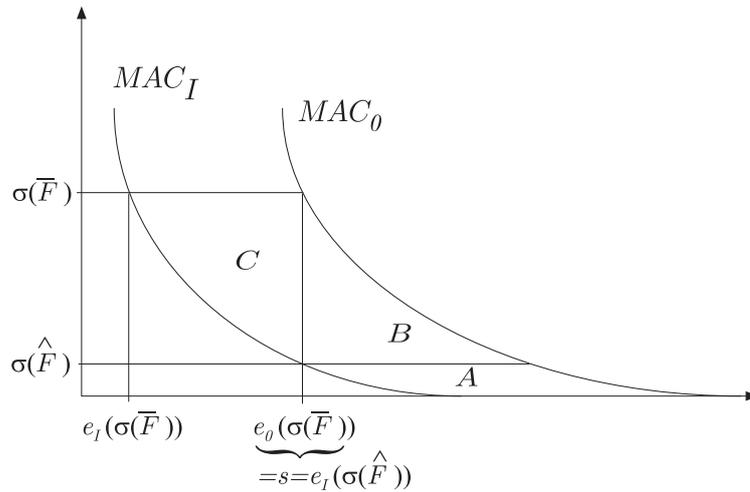


Abbildung A.1:

$F = \hat{F}$ gilt das Umgekehrte. Es kommt zu vollständiger Übernahme bei Zertifikaten und $C_0(\tilde{e}_0) + \sigma(\hat{F})(\tilde{e}_0 - \tilde{e}_I) - C_I(\tilde{e}_I) \hat{=} A = \hat{F}$ (vergleiche Abbildung A.1), aber $C_0(s) - C_I(s) \hat{=} A + B > \hat{F}$. Aus der Stetigkeit folgt daher, daß für F ein weniger großer als \hat{F} alle Firmen bei Standards die neue Technologie übernehmen, aber nur einige bei Zertifikaten. Daher muß ein \hat{F} mit existieren $\hat{F} < \hat{F} < \bar{F}$, so daß bei Standards für $F > \hat{F}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt und für $F < \hat{F}$ alle Firmen. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.8:

Es sei daran erinnert, daß der Regulator den Standard optimalerweise so setzt, daß die durchschnittlichen Grenzkosten dem Grenzschaten entsprechen. Falls alle Firmen die neue Technologie übernommen haben, wird der Regulator einen Standard $s = \underline{e}^* = \underline{E}^*$ setzen. Andererseits, falls keine Firma die neue Technologie übernommen hat, wird der Regulator $s = \bar{e}^* = \bar{E}^*$ setzen. Es sei \tilde{F} definiert als $\tilde{F} = C_0(\underline{e}^*) - C_I(\underline{e}^*)$. Nun sei F hinreichend groß, d.h. $F > \tilde{F}$. Man erinnere sich weiterhin, daß die Kostendifferenz zwischen den beiden Technologien $\Delta C(s)$ mit s fällt. Daher ist es eine dominante Strategie für jede Firma, nicht zu investieren. Denn selbst, falls alle anderen Firmen investieren sollten und der Regulator einen Standard $s = \underline{e}^*$ setzt, sind die Kosten unter der alten Technologie geringer. Andererseits sei \hat{F} definiert als $\hat{F} = C_0(\bar{e}^*) - C_I(\bar{e}^*)$. Nun sei F hinreichend klein, d.h. $F < \hat{F}$, dann ist es eine dominante Strategie für jede Firma, zu investieren. Denn selbst, falls alle anderen Firmen nicht investieren sollten,

und der Regulator $s = \bar{e}^*$ setzt, sind die Kosten unter der neuen Technologie geringer. Schließlich betrachte man den Fall $F \in [\widehat{F}, \widetilde{F}]$. Es ist zu zeigen, daß zu jedem F drei mögliche teilspielperfekte Gleichgewichte existieren. Zunächst soll gezeigt werden, daß ein Gleichgewicht mit partieller Übernahme der neuen Technologie existiert. Komparative Statik von Gleichung (4.2.2) bezüglich n_I ergibt

$$s'(n_I) = \frac{C'_0(s) - C'_I(s)}{[n_I C''_I(s) + (n - n_I) C''_0(s) + n^2 D''(ns)]} < 0 \quad ,$$

d.h. der Regulator setzt den Standard $s(n_I)$ um so strenger, je mehr Firmen investiert haben. Insbesondere muß für $s(n_I)$ gelten $\underline{s}^* < s(n_I) < \bar{s}^*$. Andererseits existiert laut Lemma 4.1 zu jedem F genau ein $\tilde{s}(F)$, so daß die Firmen indifferent zwischen den beiden Technologien sind. Insbesondere ist dieses $\tilde{s}(F)$ um so kleiner, je höher die Fixkosten sind. Man beachte, daß in einem teilspielperfekten Gleichgewicht $s(n_I) = \tilde{s}(F)$ gelten muß. Auflösen von Gleichung (4.2.2) nach n_I ergibt daher die Anzahl der Firmen, die in einem teilspielperfekten Gleichgewicht investieren

$$n_I(F) = n \frac{D'(n\tilde{s}) + C'_0(\tilde{s})}{C'_0(\tilde{s}) - C'_I(\tilde{s})} \quad .$$

Zuletzt soll gezeigt werden, daß im Fall $F \in [\widehat{F}, \widetilde{F}]$ auch vollständige ($n_I = n$) und keine ($n_I = 0$) Übernahme der neuen Technologie teilspielperfekte Gleichgewichte sind. Hierzu betrachte man zunächst den Fall $F < \widetilde{F}$ und $n_I = n$, d.h. alle Firmen haben investiert. Dann wird der Regulator $s = \underline{e}^*$ setzen. Da $F < C_0(\underline{e}^*) - C_I(\underline{e}^*)$ hat keine Firma einen Anreiz, abzuweichen. Umgekehrt betrachte man den Fall $F > \widehat{F}$ und $n_I = 0$, d.h. keine Firma hat investiert. Dann wird der Regulator $s = \bar{e}^*$ setzen. Da $F > C_0(\bar{e}^*) - C_I(\bar{e}^*)$ hat wiederum keine Firma einen Anreiz, zu investieren. Q.E.D.

Beweis Lemma 4.2:

Es sei daran erinnert, daß für alle Firmen $-C_i^0'(e_i^0) = -C_i^I'(e_i^I) = \sigma$ gilt und sich daraus eindeutige Emissionen $e_i^I = e_i^I(\sigma)$ und $e_i^0 = e_i^0(\sigma)$ ergeben. Diese Emissionen sind fallend in σ . Weiterhin folgt aus $\sigma > \tilde{\sigma}_i \implies \Delta C_i(\sigma) > 0$ und daher $\delta_i(\sigma) = 1$ und aus $\sigma < \tilde{\sigma}_i \implies \Delta C_i(\sigma) < 0$ und daher $\delta_i(\sigma) = 0$. Es bezeichne σ_0 den Zertifikatepreis, falls keine Firma die neue Technologie übernommen hat und σ_I den Zertifikatepreis, falls alle Firmen die neue Technologie übernommen haben.

Zunächst betrachte man den Fall $L \geq \bar{E}$. Laut Konstruktion von \bar{E} hat offensichtlich keine Firma einen Anreiz die neue Technologie zu übernehmen, da $\sigma_0 \leq \tilde{\sigma}_1$. Nun

betrachte man den Fall $L \in [\underline{E}, \overline{E}]$. Man beachte, daß für jede Teilmenge an investierenden Firmen $\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n}$ die korrespondierenden aggregierten Emissionen $E(\sigma) = \sum_{i=1}^n e_i^0(\sigma) + \sum_{i=1}^n \delta_i(e_i^I(\sigma) - e_i^0(\sigma))$ in σ fallen. Daher existiert für beliebiges $\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n}$ ein Gleichgewicht auf dem Zertifikatemarkt, d.h. $L = E(\sigma)$. Man beachte, daß der Marktpreis für Zertifikate dabei von $\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n}$ abhängt, d.h. $\sigma = \sigma(\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n})$. Je mehr Firmen die neue Technologie übernommen haben, desto kleiner ist der Marktpreis für Zertifikate σ . Daher läßt sich mindestens eine Teilmenge an investierenden Firmen konstruieren, so daß die korrespondierende Menge $\{\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n}, \sigma(\{\delta_i\}_{i=1,\dots,n})\}$ ein Investitionsleichgewicht charakterisiert, das Definition 1 genügt.

Bleibt zu zeigen, daß dieses eindeutig ist. Es erfolgt ein indirekter Beweis. Es sei angenommen, daß zwei verschiedene Teilmengen von investierenden Firmen existieren, die die Bedingungen für ein Investitionsleichgewicht erfüllen. Der Marktpreis für Zertifikate im ersten Gleichgewicht sei mit σ_A , im zweiten mit σ_B bezeichnet. Ohne Einschränkung der Allgemeinheit gilt $\sigma_A \leq \sigma_B$. Dann muß es aber mindestens eine Firma j geben, die in Gleichgewicht A investiert, aber in Gleichgewicht B nicht investiert hat. Damit muß $\sigma_A > \tilde{\sigma}_j$ und $\sigma_B \leq \tilde{\sigma}_j$ gelten. Dies steht im Widerspruch zur Annahme, daß $\sigma_A \leq \sigma_B$ gilt. Daher gibt es ein eindeutiges $i_0 \in \{1, \dots, n\}$, so daß in einem Investitionsleichgewicht alle Firmen mit $i < i_0$ in die neue Technologie investieren und alle Firmen mit $i \geq i_0$ bei der herkömmlichen Technologie verbleiben.

Zuletzt betrachte man den Fall $L < \underline{E}$. Laut Konstruktion von \underline{L} werden offensichtlich alle Firmen die neue Technologie übernehmen, da $\sigma_I > \tilde{\sigma}_n$. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.9:

Es sei daran erinnert, daß $\tau(E) = AMAC_0(E)$ der zu einem Emissionsziel E korrespondierende Steuersatz ist, falls nur die herkömmliche Technologie betrieben wird. Man definiere \overline{E} implizit durch $\tau(\overline{E}) = \tilde{x}_1$ und \underline{E}_t implizit durch $\tau(\underline{E}_t) = \tilde{x}_n$. Dann ist offensichtlich $\tau(E) \leq \tilde{x}_1$ für $E \geq \overline{E}$, und keine Firma übernimmt die neue Technologie. Darüber hinaus gilt $\tau(E) > \tilde{x}_n$ für $E < \underline{E}_t$, und alle Firmen übernehmen die neue Technologie. Bei allen Emissionszielen $\underline{E}_t \leq E < \overline{E}$ gilt offensichtlich $\tilde{x}_1 < \tau(E) \leq \tilde{x}_n$. Die neue Technologie wird teilweise übernommen. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.10:

Es sei daran erinnert, daß \bar{E} definiert ist als $AMAC_0(\bar{E}) = \tilde{x}_1$. Es bezeichne $\sigma_0(L)$ den Marktpreis für Zertifikate, falls alle Firmen die herkömmliche Technologie betreiben und der Regulator $L = \hat{E}$ viele Zertifikate ausgegeben hat. Man betrachte den Fall $L \geq \bar{E}$. Dann ist $\sigma_0(L) \leq \tilde{x}_1$, da $AMAC_0(E)$ mit den aggregierten Emissionen fällt. Daher übernimmt keine Firma die neue Technologie. Man definiere \underline{E}_p als $AMAC_I(\underline{E}_p) = \tilde{x}_n$, wobei $AMAC_I(E)$ die aggregierten Grenzvermeidungskosten bezeichnet, falls alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Nun betrachte man den Fall $L < \underline{E}_p$. Dann übernehmen alle Firmen die neue Technologie, da $AMAC_I(L) > \tilde{x}_n$ gilt. Für alle aggregierten Emissionsziele $\underline{E}_p \leq \hat{E} < \bar{E}$ erhält man $\tilde{x}_1 < \sigma_0(L) \leq \tilde{x}_n$. Daher haben zunächst Firmen mit $\tilde{x}_i < \sigma_0(L)$ einen Anreiz, die neue Technologie zu übernehmen. Da der Marktpreis für Zertifikate mit der Anzahl an Firmen, die die neue Technologie übernehmen, sinkt, existiert ein Gleichgewicht mit teilweiser Übernahme der neuen Technologie.

Zuletzt vergleiche man \underline{E}_p und \underline{E}_t . Da einerseits $AMAC_0(\underline{E}_t) = \tilde{x}_n = AMAC_I(\underline{E}_p)$, andererseits $AMAC_I(E) < AMAC_0(E)$ gilt, erhält man $\underline{E}_p < \underline{E}_t$. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.11:

Zunächst sollen die Indikatorfunktionen δ_i als im Intervall $[0, 1]$ reellwertig behandelt werden. Die Lagrangefunktion des Optimierungsproblems ist dann gegeben durch

$$L = \left[\sum_i \delta_i [C_i^I(e_i^I) + F_i] + (1 - \delta_i)C_i^0(e_i^0) \right] + D\left(\sum_i \delta_i e_i^I + (1 - \delta_i)e_i^0, s\right) - \lambda_i \delta_i - \mu_i (1 - \delta_i) \quad ,$$

wobei λ_i und μ_i die Kuhn-Tucker-Multiplikatoren der Nichtnegativitätsbedingungen für δ_i und $(1 - \delta_i)$ sind. Die Bedingungen erster Ordnung sind

$$C_i^{0 \prime}(e_i^0) + D_E(E, s) \stackrel{!}{=} 0 \quad , \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{A.7})$$

$$C_i^{I \prime}(e_i^I) + D_E(E, s) \stackrel{!}{=} 0 \quad , \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{A.8})$$

$$C_i^I(e_i^I) + F_i - C_i^0(e_i^0) + (e_i^I - e_i^0)D_E(E, s) - \lambda_i + \mu_i \stackrel{!}{=} 0 \quad , \quad i = 1, \dots, n \quad (\text{A.9})$$

wobei

$$E = \sum_i \delta_i e_i^I + (1 - \delta_i) e_i^0 \quad .$$

Zunächst nehme man an, daß $\lambda_i = 0$ und $\mu_i \geq 0$, d.h. $\delta_i = 1$. Laut Definition gilt

$$\Delta C_i(x) = [C_i^0(e_i^0) + x e_i^0] - [C_i^I(e_i^I) + x e_i^I + F_i] > 0$$

genau dann, falls $x > \tilde{x}_i$. Weiterhin ist $\Delta C_i(x) > 0$ äquivalent zu

$$B_i(x) := \frac{C_i^I(e_i^I(x)) + F_i - C_i^0(e_i^0(x))}{e_i^0(x) - e_i^I(x)} < x \quad .$$

Indem man $x = D_E(E, s)$ setzt, kann man Gleichung (A.9) umschreiben

$$B_i(D_E(E, s)) = D_E(E, s) - \frac{\mu_i}{e_i^0(x) - e_i^I(x)} < D_E(E, s) \quad . \quad (\text{A.10})$$

Daher gilt $\tilde{x}_i < x = D_E(E, s)$ für $\delta_i = 1$. Ist es also sozial optimal, daß Firma i die neue Technologie übernimmt, dann muß ihr „Schwellenpreis“ \tilde{x}_i kleiner sein als der optimale Grenzscha- den. Aus $\lambda_i \geq 0$ und $\mu_i = 0$ folgt dann mittels eines ähnlichen Argumentes $\tilde{x}_i > D_E(E, s)$. Zuletzt betrachte man den Fall, daß eine innere Lösung bezüglich Firma \hat{i}_0 existiert, d.h. $\lambda_{\hat{i}_0} = 0$ und $\mu_{\hat{i}_0} = 0$. Dies würde bedeuten, daß nur „ein Teil $\delta_{\hat{i}}$ von Firma \hat{i} “ die neue Technologie übernehmen sollte. Dies ist natürlich nicht machbar. In diesem Fall müssen daher die zwei möglichen Allokationen

$$\begin{aligned} \delta_1 &= \dots = \delta_{\hat{i}_0-1} = 1, & \delta_{\hat{i}_0} &= \dots = \delta_n = 0 \quad , \\ \delta_1 &= \dots = \delta_{\hat{i}_0} = 1, & \delta_{\hat{i}_0+1} &= \dots = \delta_n = 0 \quad , \end{aligned}$$

verglichen und die ausgesucht werden, welche zu niedrigeren sozialen Kosten führt.

Man beachte, daß \underline{s} so konstruiert wurde, daß für $s \leq \underline{s}$ keine Firma die neue Technologie übernehmen sollte. Die optimalen aggregierten Emissionen entsprechen $\overline{E}^*(s) \geq \overline{E}^*(\underline{s})$, und der optimale Grenzscha- den ist $MD^*(s) \leq \tilde{x}_1$. Umgekehrt wurde \overline{s} so konstruiert, daß für $s \geq \overline{s}$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen sollten. Die optimalen aggregierten Emissionen entsprechen $\underline{E}^*(s) \leq \underline{E}^*(\overline{s})$, und der optimale Grenzscha- den ist $MD^* \geq \tilde{x}_n$. Nun betrachte man den Fall $s \in (\underline{s}, \overline{s})$. Es sei daran erinnert, daß die Grenzscha- denkurve um so steiler ist, je größer der Schadenparameter ist. Man beachte, daß der optimale Grenzscha- den dem Schnittpunkt aus Grenzver- meidungskostenkurve und Grenzscha- denkurve entspricht. Für $s > \underline{s}$ muß daher der

optimale Grenzscha-den größer sein als \underline{MD}^* . Dann ist es optimal, daß Firma 1 die neue Technologie übernimmt. Umgekehrt für $s < \bar{s}$ muß der Grenzscha-den kleiner sein als \overline{MD}^* . Dann ist es optimal, daß Firma n die neue Technologie nicht übernimmt. Für $s \in (\underline{s}, \bar{s})$ ist daher eine teilweise Diffusion optimal. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.12:

Falls nur die herkömmliche Technologie zur Verfügung steht, ist das optimale Emissionsniveau bestimmt durch

$$D_E(E, s) = AMAC_0(E) \quad . \quad (A.11)$$

Die aggregierten Emissionen sind gegeben durch $E_0(\tau) = \sum_{i=1}^n e_i^0(\tau)$. Die Lösung von Gleichung (A.11) sei mit $E_0(s)$ bezeichnet. Um dieses Emissionsniveau umzusetzen, wird der Regulator einen Steuersatz $\tau_0(s) = D_E(E_0(s), s)$ setzen. Differenzieren von Gleichung (A.11) bezüglich s ergibt

$$E_0'(s) = -\frac{D_{Es}}{D_{EE} - \frac{dAMAC_0}{dE_0}} < 0 \quad ,$$

d.h. die optimalen Emissionen sinken mit s . Es sei daran erinnert, daß die aggregierten Grenzvermeidungskosten mit den Emissionen sinken. Komparative Statik von τ_0 bezüglich des Schadenparameters ergibt damit

$$\frac{\partial \tau_0}{\partial s} = D_{Es}(E_0, s) + D_{EE}(E_0, s)E_0'(s) = D_{Es}(E_0, s) \frac{\frac{dAMAC_0}{dE_0}}{\frac{dAMAC_0}{dE_0} - D_{EE}} > 0 \quad .$$

Nun bezeichne $E^*(s)$ die sozial optimalen aggregierten Emissionen. Laut Konstruktion von \underline{s} in Abschnitt 4.3.5 gilt für $s \leq \underline{s}$ bezüglich der optimalen Emissionen $E^*(s) = E_0(s) = \underline{E}^*(s)$. Für $s > \underline{s}$ gilt andererseits $E_0(s) > E^*(s)$. Es sei daran erinnert, daß man die Diffusion der neuen Technologie durch ein $i_0 = i_0(\tau)$ charakterisieren kann, so daß alle Firmen mit $i < i_0$ die neue Technologie übernehmen und alle Firmen mit $i \geq i_0$ bei der alten Technologie bleiben. Darüber hinaus gilt $\tilde{\tau}_1 = \underline{MD}^*$ und $\tilde{\tau}_n = \overline{MD}^*$.

Im Fall von $s \leq \underline{s}$ setzt der Regulator einen Steuersatz $\tau_0(s) \leq \tilde{\tau}_1$. Offensichtlich entspricht das dezentrale Ergebnis dem sozialen Optimum. Andererseits gilt $\tau_0(s) > \tilde{\tau}_1$ für $s > \underline{s}$. Es bezeichne $AMAC_{i_0}$ die aggregierte Grenzvermeidungskostenkurve, falls

alle Firmen mit $i \in \{1, \dots, i_0\}$ die neue Technologie übernommen haben. Damit gilt $AMAC_{i_0}(E) < AMAC_0(E)$ für alle E . Es sei daran erinnert, daß $\{1, \dots, \hat{i}_0(s)\}$ der sozial optimalen Teilmenge an Firmen entspricht, die die neue Technologie bei einem Schadenparameter s übernehmen sollten. Daher gilt insbesondere $AMAC_{i_0}(E^*(s)) < AMAC_0(E_0(s)) = \tau_0(s)$. Somit ist $i_0(\tau_0(s)) > \hat{i}_0(s)$ für $\underline{s} < s < \bar{s}$. Da $\tau_0(s)$ mit s ansteigt, muß ein \bar{s}_t mit $\underline{s} < \bar{s}_t < \bar{s}$ existieren, so daß $\tau_0(\bar{s}_t) = \tilde{\tau}_n$. Daher kommt es zu einer vollständigen Übernahme der neuen Technologie für $s > \bar{s}_t$ und Überinvestition für $s \in [\underline{s}, \bar{s}]$. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.13:

Falls nur die herkömmliche Technologie zur Verfügung steht, wird der Regulator genau so viele Zertifikate austeilten, daß gilt

$$D_E(L, s) = AMAC_0(L) \quad . \quad (A.12)$$

Die Lösung von Gleichung (A.12) sei mit $L_0(s)$ und der Marktpreis für Zertifikate vor Übernahme der neuen Technologie mit $\sigma_0(s)$ bezeichnet. Es gilt offensichtlich $\sigma_0(s) = AMAC_0(L_0(s))$. Differenzieren von Gleichung (A.12) bezüglich L_0 ergibt

$$L'_0(s) = -\frac{D_{Es}}{D_{EE} - \frac{dAMAC_0}{dL}} < 0 \quad ,$$

d.h. die optimale Menge an Zertifikaten sinkt und der korrespondierende Zertifikatspreis $\sigma_0(s)$ steigt mit s . Der Marktpreis für Zertifikate bei teilweiser oder vollständiger Übernahme der neuen Technologie sei mit $\sigma(s)$ bezeichnet. Es sei daran erinnert, daß man die Diffusion der neuen Technologie durch ein i_0 charakterisieren kann, so daß alle Firmen mit $i < i_0$ die neue Technologie übernehmen und alle Firmen mit $i \geq i_0$ bei der alten Technologie bleiben. Darüber hinaus gilt $\tilde{\sigma}_1 = \underline{MD}^*$ und $\tilde{\sigma}_n = \overline{MD}^*$.

Man betrachte zunächst den Fall $s \leq \underline{s}$. Dann gilt offensichtlich $L_0(s) = E^*(s)$ und $\sigma_0(s) = MD^* \leq \underline{MD}^*$. Da $\underline{MD}^* = \tilde{\sigma}_1$ übernimmt keine Firma die neue Technologie. Nun betrachte man den Fall $s > \underline{s}$. Dann gilt $L_0(s) > E^*(s)$. Da sowohl $L_0(s)$ als auch $E^*(s)$ mit s sinken, muß ein Parameter $\bar{s}_p > \bar{s}$ existieren, so daß $L_0(\bar{s}_p) = E^*(\bar{s})$ gilt. Für $s > \underline{s}$ impliziert dies $\sigma(L_0(\bar{s}_p)) = \sigma(E^*(\bar{s})) = \overline{MD}^*$, d.h. $i_0 = n$. Für $s < \bar{s}$ folgt daraus $\sigma(L_0(s)) < \sigma(E^*(s)) = MD^*$ und damit $i_0 < \hat{i}_0$. Daher übernehmen für $s \in [\bar{s}_p, \bar{s}]$ zu wenige Firmen die neue Technologie. Q.E.D.

Beweis Proposition 4.14:

Man betrachte ein Steuerregime. In dem betrachteten Spiel paßt der Regulator die Höhe des Steuersatzes optimal an die Übernahme der neuen Technologie an. Es bezeichne τ den bezüglich der erfolgten Diffusion optimalen Steuersatz. Weiterhin sei die sozial optimale Diffusion durch \hat{i}_0 charakterisiert, und es bezeichne $\hat{\tau}(s) = MD^*(s)$ den korrespondierenden, sozial optimalen Steuersatz. Zunächst sei angenommen, daß in der ersten Stufe des Spiels weniger als optimal viele Firmen investiert haben, so daß der Regulator den Steuersatz höher setzt als den sozial optimalen Steuersatz, d.h. $\tau > \hat{\tau}$. Da $i_0(\tau) > i_0(\hat{\tau})$ gilt, muß mindestens eine Firma mit $i < i_0(\tau)$ existieren, die nicht investiert hat. Sonst wäre der optimale Steuersatz kleiner als $\hat{\tau}$. Eine solche Firma hat aber immer noch einen Anreiz zu investieren.

Nun sei angenommen, daß in der ersten Stufe des Spiels mehr als optimal viele Firmen investiert haben, so daß der Regulator den Steuersatz niedriger setzt als den sozial optimalen Steuersatz, d.h. $\tau < \hat{\tau}$. Da $i_0(\tau) < i_0(\hat{\tau})$ gilt, muß mindestens eine Firma mit $i > i_0(\tau)$ existieren, die investiert hat. Sonst wäre der optimale Steuersatz größer als $\hat{\tau}$. Eine solche Firma bereut aber die Übernahme der neuen Technologie. Q.E.D.

Beweise zu Kapitel 6

Beweis Lemma 6.3:

Zunächst betrachte man die Nachfragefunktion $n_I(P)$. Es bezeichne \hat{P} den Lizenzpreis, für den gilt, daß $n_I(P) = n$ für $P \leq \hat{P}$ und $n_I(P) < n$ für $P > \hat{P}$. Übernehmen alle Firmen die neue Technologie, dann gilt für die Emissionen $e_I = L/n$ und der Marktpreis für Zertifikate ergibt sich zu $\sigma = -C'_I(L/n)$. Daher ist der Lizenzpreis \hat{P} folgendermaßen definiert

$$\hat{P} = C_0(e_0(\sigma)) + \sigma[e_0(\sigma) - L/n] - C_I(L/n) \quad .$$

Man beachte, daß der Innovator seinen Lizenzpreis also auf keinen Fall niedriger als \hat{P} setzen wird. Umgekehrt bezeichne $\bar{\bar{P}}$ den Lizenzpreis, so daß $n_I(P) = 0$ für $P \geq \bar{\bar{P}}$ und $n_I(P) > 0$ für $P < \bar{\bar{P}}$. Übernimmt keine Firma die neue Technologie, dann gilt für die Emissionen $e_0 = L/n$ und der Marktpreis für Zertifikate ergibt sich zu $\sigma = -C'_0(L/n)$. Der Lizenzpreis $\bar{\bar{P}}$ ist daher folgendermaßen definiert

$$\bar{\bar{P}}(L) = C_0(e_0(L/n)) + \sigma[L/n - e_I(\sigma)] - C_I(e_I(\sigma)) \quad .$$

Schließlich betrachte man den Fall $0 < n_I(P) < n$. Es sei daran erinnert, daß in einem Investitionsgleichgewicht mit beiden Typen von Firmen aktiv folgende beiden Gleichungen erfüllt sein müssen

$$P = \Delta C(\sigma) = C_0(e_0(\sigma)) + \sigma e_0(\sigma) - C_I(e_I(\sigma)) - \sigma e_I(\sigma) \quad , \quad (\text{A.13})$$

$$L = n_I e_I + (n - n_I) e_0 \quad . \quad (\text{A.14})$$

Es ist bereits bekannt, daß die rechte Seite von Gleichung (A.13) mit σ steigt. Darüber hinaus gilt offensichtlich $\Delta C(0) = 0$. Zu jedem $P \geq 0$ existiert demnach ein eindeutiges σ , so daß Gleichung (A.13) erfüllt ist. Es sei daran erinnert, daß zu jedem Marktpreis für Zertifikate σ eindeutige Emissionsniveaus $e_0 = e_0(\sigma)$ bzw. $e_I = e_I(\sigma)$ für Firmen mit der herkömmlichen bzw. neuen Technologie gegeben sind. Die Anzahl an Firmen, die die neue Technologie übernimmt, ergibt sich damit unmittelbar aus Gleichung (A.14). Komparative Statik von Gleichung (A.14) bezüglich P ergibt

$$\frac{\partial n_I}{\partial P} = \frac{[n_I e'(\sigma) + (n - n_I) e'_0(\sigma)]}{[e_0 - e_I]^2} < 0 \quad ,$$

d.h. die Nachfragefunktion $n_I(P)$ fällt in P für $P > \hat{P}$. Da für $P > \bar{P}$ keine Firma bereit ist, die neue Technologie zu übernehmen, existiert eine eindeutige Lösung des Maximierungsproblems des Innovators. Diese sei mit P^{\max} bezeichnet. Es gilt offensichtlich $P^{\max} \in [\hat{P}(L), \bar{P}(L)]$.

Man beachte jedoch, daß sowohl die Anzahl an Firmen $n_I(P(L), L)$, die die neue Technologie übernehmen, als auch die den Erlös maximierende Lizenzgebühr $P^{\max}(L)$ von der Anzahl ausgegebener Zertifikate abhängen. Man betrachte daher nun das Preissetzungsverhalten des Innovators $P^{\max}(L)$ in Abhängigkeit von der Menge an ausgegebenen Zertifikaten. Im Fall einer inneren Lösung des Maximierungsproblems des Innovators, d.h. es gilt $0 < n_I < n$, ergibt die komparativ statische Betrachtung der Optimalitätsbedingung (6.1.3) bezüglich L :

$$P^{\max \prime}(L) = - \frac{P^{\max} \frac{\partial^2 n_I(P,L)}{\partial P \partial L} + \frac{\partial n_I(P,L)}{\partial L}}{P^{\max} \frac{\partial^2 n_I(P,L)}{\partial P \partial P} + 2 \frac{\partial n_I(P,L)}{\partial P}} \quad . \quad (\text{A.15})$$

Um das Vorzeichen bestimmen zu können, müssen zunächst die partiellen Ableitungen der Nachfragefunktion n_I bestimmt werden. Auflösen von Gleichung (A.14) nach n_I ergibt $n_I = (L - n e_0) / (e_I - e_0)$. Unter Ausnutzung von Annahme 1 ergeben sich die

partiellen Ableitungen der Nachfragefunktion $n_I(P, L)$ zu

$$\frac{\partial n_I(P, L)}{\partial L} = -\frac{1}{e_0(\sigma) - e_I(\sigma)} < 0 \quad , \quad (\text{A.16})$$

$$\frac{\partial^2 n_I(P, L)}{\partial P \partial L} = \frac{[\partial n_I(P, L)/\partial L] [e'_I(\sigma) - e'_0(\sigma)]}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^2} = -\frac{e'_I(\sigma) - e'_0(\sigma)}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^3} < 0, \quad (\text{A.17})$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 n_I(P, L)}{(\partial P)^2} &= \frac{[n_I(P, L)e''_I(\sigma) + (n - n_I(P, L))e''_0(\sigma)]}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^3} \\ &\quad - \frac{e'_0(\sigma) - e'_I(\sigma)}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^2} \frac{\partial n_I(P, L)}{\partial P} < 0. \end{aligned} \quad (\text{A.18})$$

Man beachte, daß laut Annahme über die Vermeidungskostenfunktionen

$$e''_i(\sigma) = -\frac{C'''_i e'_i}{C''_i} \leq 0$$

mit $i = 0, I$ gilt. Einsetzen von Gleichungen (A.16) - (A.18) in (A.15) ergibt

$$P^{\max \prime}(L) < 0 \quad \text{für} \quad 0 < n_I < n \quad .$$

Zuletzt betrachte man den Fall einer Randlösung, d.h. $n_I(P) = n$ und $P^{\max} = \widehat{P}(L)$. Es sei daran erinnert, daß $\widehat{P}(L)$ definiert war als $\widehat{P}(L) = C_0(e_0) + \sigma(e_0(\sigma) - L/n) - C_I(L/n)$. Man erhält unmittelbar $\widehat{P}'(L) < 0$, d.h. die maximale Lizenzgebühr, zu der alle Firmen die neue Technologie übernehmen, sinkt mit der Anzahl an ausgegebenen Zertifikaten.

Schließlich betrachte man das Investitionsverhalten der Firmen $n_I(P^{\max}(L), L)$ in Abhängigkeit der Menge an ausgegebenen Zertifikaten. Differenzieren von $n_I(P^{\max}(L), L)$ bezüglich L ergibt einen direkten und einen indirekten Term:

$$\frac{dn_I(P^{\max}(L), L)}{dL} = \underbrace{\frac{\partial n_I(P^{\max}, L)}{\partial L}}_{<0} + \underbrace{\frac{\partial n_I(P^{\max}, L)}{\partial P}}_{<0} \underbrace{P^{\max \prime}(L)}_{<0} \quad .$$

Einsetzen von Gleichung (A.15) ergibt

$$\begin{aligned} \frac{dn_I}{dL} &= -\frac{P^{\max} \frac{\frac{\partial n_I(P, L)}{\partial L} [e'_I(\sigma) - e'_0(\sigma)]}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^2} + \frac{\partial n_I(P, L)}{\partial L}}{P^{\max} \left[-\frac{e'_0(\sigma) - e'_I(\sigma)}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^2} \frac{\partial n_I(P, L)}{\partial P} \right] + 2 \frac{\partial n_I(P, L)}{\partial P}} \frac{\partial n_I(P, L)}{\partial P} + \frac{\partial n_I(P, L)}{\partial L} \\ &= \left(1 - \frac{P^{\max} \frac{[e'_I(\sigma) - e'_0(\sigma)]}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^2} + 1}{P^{\max} \frac{e'_I(\sigma) - e'_0(\sigma)}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^2} + 2} \right) \underbrace{\frac{\partial n_I(P, L)}{\partial L}}_{\leq 0} \quad . \end{aligned}$$

Daher dominiert der direkte Effekt den indirekten genau dann, wenn

$$\frac{P^{\max} \frac{[e'_I(\sigma) - e'_0(\sigma)]}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^2} + 1}{P^{\max} \frac{e'_I(\sigma) - e'_0(\sigma)}{(e_0(\sigma) - e_I(\sigma))^2} + 2} < 1 \quad .$$

Da dies offensichtlich für alle σ und $P^{\max} > 0$ zutrifft, gilt $\frac{dn_I(P^{\max}(L), L)}{dL} < 0$. Je weniger Zertifikate der Regulator ausgibt, desto mehr Firmen übernehmen die neue Technologie. Da offensichtlich für $L = E^{\max}$ keine Firma die neue Technologie übernimmt, existiert ein \hat{L} mit $\hat{L} < E^{\max}$, das die behaupteten Eigenschaften hat. Q.E.D.

Beweis Proposition 6.2:

Zunächst sollen *Steuern* mit *Standards* verglichen werden. Um ein Emissionsziel \hat{E} zu erreichen, wird der Regulator entweder eine Steuer $\tau = AMAC_0(\hat{E})$ oder einen Standard $s = \hat{E}/n$ setzen. Dies ergibt bei Steuern eindeutige Emissionen $e_0 = e_0(\tau)$ und $e_I = e_I(\tau)$ für die Firmen mit der herkömmlichen bzw. der neuen Technologie, wobei $e_I < e_0 = s$ gilt. Daraus folgt unmittelbar $\tau = -C'_I(e_I) > -C'_I(s)$. Ein Vergleich von Gleichungen (6.1.5) und (6.1.9) ergibt

$$\begin{aligned} \Theta_i(\tau) &= n[C_0(s) - C_I(e_I) + \tau(s - e_I)] \\ &= n[C_0(s) - C_I(e_I) - C_I(s) + C_I(s) + \tau(s - e_I)] \\ &= n[C_0(s) - C_I(s)] + n[C_I(s) - C_I(e_I) + \tau(s - e_I)] \\ &= \Theta_s(s) + n[\tau(s - e_I) + C_I(s) - C_I(e_I)] > \Theta_s(s) \quad . \end{aligned}$$

Aus der Monotonie von $\chi = \Gamma(\Theta)$ folgt unmittelbar, daß das F&E-Niveau bei Steuern höher ist als bei Standards. Da der Steuersatz auch nach Übernahme der neuen Technologie unverändert bleibt, und die Firmen $-C'_I(e_I) = \tau$ setzen, sinken die aggregierten Emissionen von $\bar{E}^* = n\bar{e}^*$ auf $E = ne_I(\tau)$.

Schließlich sollen *Standards* mit *Zertifikaten* verglichen werden. Es sei σ_0 der Zertifikatepreis, falls keine Firma investiert, und σ der Marktpreis für Zertifikate nach (teilweiser) Übernahme der neuen Technologie. Man beachte, daß $\sigma < \sigma_0$ gilt. Es sei daran erinnert, daß zu jedem σ eindeutige Emissionen $e_0 = e_0(\sigma)$ bzw. $e_I = e_I(\sigma)$ für Firmen mit der herkömmlichen bzw. der neuen Technologie korrespondieren. Im Fall von Zertifikaten ist die reduzierte Erlösfunktion des Innovators gegeben als

$$\Theta_p(L) = n_I \cdot [C_0(e_0) + \sigma(e_0 - e_I) - C_I(e_I)]$$

bzw. nach Einsetzen von $L = n_I e_I + (n - n_I) e_0$

$$\Theta_p(L) = nC_0(e_0) + \sigma(ne_0 - L) - [(n - n_I)C_0(e_0) + n_I C_I(e_I)] \quad .$$

Zunächst betrachte man den Fall, daß alle Firmen die neue Technologie übernommen haben, d.h. es gilt $n_I = n$ und $P = \widehat{P}$. Es bezeichne $\sigma = \sigma_I$ den zugehörigen Zertifikatpreis. Dann gilt offensichtlich $e_I(\sigma_I) = L/n = s$ und man erhält $nC_I(e_I) = nC_I(s)$. Ein Vergleich der reduzierten Erlösfunktionen bei Zertifikaten und Standards ergibt in diesem Fall:

$$\begin{aligned} \Theta_p(L) &= nC_0(e_0) + \sigma(ne_0 - L) - nC_I(e_I) = nC_0(e_0) + \sigma(ne_0 - L) - nC_I(s) \\ &< n[C_0(s) - C_I(s)] = \Theta_s(s) \quad . \end{aligned}$$

Nun betrachte man den Fall, daß nur ein Teil der Firmen die neue Technologie übernimmt, d.h. es gilt $0 < n_I < n$. Dann folgt aus $\sigma > \sigma_I$ unmittelbar $e_0(\sigma) > s = e_I(\sigma_I) > e_I(\sigma)$ und $-C'_0(e_0) = -C'_I(e_I) = \sigma > -C'_I(s)$. Daraus folgt $(n - n_I)C_0(e_0) + n_I C_I(e_I) > nC_I(s)$ (Es sei daran erinnert, daß es sozial optimal ist, daß alle Firmen die neue Technologie übernehmen). Ein Vergleich der reduzierten Erlösfunktionen ergibt in diesem Fall

$$\begin{aligned} \Theta_p(L) &= nC_0(e_0) + \sigma(ne_0 - L) - [(n - n_I)C_0(e_0) + n_I C_I(e_I)] \\ &< nC_0(e_0) + \sigma(ne_0 - L) - nC_I(s) < n[C_0(s) - C_I(s)] = \Theta_s(s) \quad . \end{aligned}$$

Aus der Monotonie von $\chi = \Gamma(\Theta)$ folgt unmittelbar, daß das F&E-Niveau bei Standards höher ist als bei Zertifikaten. Q.E.D.

Beweis Proposition 6.3:

- i.) Zunächst betrachte man *Steuern*. Ursprünglich hat der Regulator den Steuersatz auf $\tau_0 = D'(\overline{E}^*)$ gesetzt. Dies ergibt Emissionen $e_0 = \overline{e}^*$ und $e_I = e_I(\tau_0) < \underline{e}^*$ für die Firmen mit der herkömmlichen bzw. neuen Technologie. Laut Lemma 6.1 ist der Erlös des Innovators gegeben durch

$$\Theta_t(\tau_0) = n \cdot \Delta C(\tau_0) = n [C_0(\overline{e}^*) + \tau_0(\overline{e}^* - e_I) - C_I(e_I)] \quad .$$

Erweitern mit $0 = n\tau_0\underline{e}^* + nC_I(\underline{e}^*) - n\tau_0\underline{e}^* - nC_I(\underline{e}^*)$ ergibt

$$\begin{aligned} \Theta_t(\tau_0) &= [nC_0(\bar{e}^*) + n\tau_0(\bar{e}^* - \underline{e}^*) - nC_I(\underline{e}^*)] \\ &\quad + \underbrace{[nC_I(\underline{e}^*) + n\tau_0(\underline{e}^* - e_I) - nC_I(e_I)]}_{>0} \\ &> [nC_0(\bar{e}^*) + n\tau_0(\bar{e}^* - \underline{e}^*) - nC_I(\underline{e}^*)] \quad . \end{aligned}$$

Da $\tau_0 = D'(\bar{E}^*) > D'(\underline{E}^*)$, erhält man $n\tau_0(\bar{e}^* - \underline{e}^*) > D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*)$. Daraus ergibt sich

$$\Theta_t(\tau_0) > nC_0(\bar{e}^*) - nC_I(\underline{e}^*) + D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*) = R'(\chi^*) \quad .$$

Nach Übernahme der neuen Technologie sinken offensichtlich die aggregierten Grenzvermeidungskosten. Daher muß für den optimalen Steuersatz nach Übernahme der neuen Technologie $\tau < \tau_0$ gelten. Aus $-C'_I(e_I(\tau_0)) = \tau_0 > -C'_I(e_I(\tau))$ folgt unmittelbar $e_I(\tau_0) < e_I(\tau)$, d.h. die Emissionen sind zu niedrig.

ii.) Nun betrachte man *Standards*. Ursprünglich hat der Regulator den Standard auf $s_0 = \bar{e}^* = \bar{E}^*/n$ gesetzt. Es sei daran erinnert, daß \underline{e}^* definiert war als die optimalen Emissionen, falls alle Firmen die neue Technologie übernehmen, d.h. als Lösung von $D'(\underline{E}^*) = -C'_I(\underline{e}^*)$. Damit erhält man $D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*) - n[C_I(\underline{e}^*) - C_I(s_0)] > 0$. Da weiterhin $C_I(s_0) < C_I(\underline{e}^*)$, ist der Erlös des Innovators kleiner als sozial optimal

$$\begin{aligned} \Theta_s(s_0) &= n\Delta C(s_0) = n[C_0(s_0) - C_I(s_0)] = [nC_0(\bar{e}^*) - nC_I(\bar{e}^*)] \\ &< [nC_0(\bar{e}^*) - nC_I(\bar{e}^*)] + \underbrace{[D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*) - n[C_I(\underline{e}^*) - C_I(\bar{e}^*)]]}_{>0} \\ &= R'(\chi^*) \quad . \end{aligned}$$

iii.) Schließlich betrachte man *Zertifikate*. Laut Proposition 6.2 bieten Zertifikate geringere Innovationsanreize als Standards für ein beliebiges Emissionsziel $\hat{E} < E^{\max}$, insbesondere also auch für $\hat{E} = \bar{E}^*$. Q.E.D.

Beweis Proposition 6.4:

Im Fall nicht erfolgreicher Innovation entspricht der optimale Standard offensichtlich $s = \bar{e}^*$. Nun betrachte man den Fall einer erfolgreichen Innovation. Es ist bereits

bekannt, daß der Regulator den Emissionsstandard auf $s = \underline{e}^*$ setzt. Einsetzen in Gleichung (6.1.9), ergibt den Erlös des Innovators, d.h. $\Theta_s(\underline{e}^*) = n \cdot [C_0(\underline{e}^*) - C_I(\underline{e}^*)]$. Man beachte, daß für $e < \bar{e}^*$ die Ungleichung $-C'_0(e) > D'(ne)$ gilt. Daraus folgt unmittelbar $D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*) < nC_0(\underline{e}^*) - nC_0(\bar{e}^*)$, und man erhält

$$\begin{aligned} R'(\chi^*) &= [nC_0(\bar{e}^*) + D(\bar{E}^*)] - [nC_I(\underline{e}^*) + D(\underline{E}^*)] \\ &= nC_0(\bar{e}^*) - nC_I(\underline{e}^*) + D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*) \\ &< nC_0(\bar{e}^*) - nC_I(\underline{e}^*) + nC_0(\underline{e}^*) - nC_0(\bar{e}^*) \\ &= n \cdot [C_0(\underline{e}^*) - C_I(\underline{e}^*)] = R'(\chi_s) = \Theta_s(\underline{e}^*) \quad . \quad \text{Q.E.D.} \end{aligned}$$

Beweis Proposition 6.5:

Im Fall nicht erfolgreicher Innovation entspricht der optimale Steuersatz offensichtlich $\tau = D'(\bar{E}^*)$. Nun sei angenommen, daß die Entwicklung der neuen Technologie erfolgreich war. Optimierung der sozialen Kosten erfordert einen Steuersatz $\tau = D'(\underline{E}^*) < D'(\bar{E}^*)$. Dieser impliziert Emissionen $e_I = e_I(\tau) = \underline{e}^*$ und $e_0 = e_0(\tau)$, bezüglich der neuen bzw. herkömmlichen Technologie. Der maximale Erlös des Innovators ist dann gegeben als

$$\Theta_t(\tau) = n \cdot [C_0(e_0) - C_I(\underline{e}^*) + \tau(e_0 - \underline{e}^*)] \quad . \quad (\text{A.19})$$

Erweitert um $0 = \bar{e}^* - \bar{e}^*$ ergibt sich $\Theta_t(\tau) = nC_0(e_0) - nC_I(\underline{e}^*) + n\tau(e_0(\tau) - \bar{e}^* + \bar{e}^* - \underline{e}^*)$. Nun folgt aus $\tau < \tau_0$ unmittelbar $e_0(\tau) > \bar{e}^*$. Daher gilt $nC_0(e_0(\tau)) + n\tau(e_0(\tau) - \bar{e}^*) < nC_0(\bar{e}^*)$. Da $\tau = D'(\underline{E}^*) < D'(\bar{E}^*)$, gilt darüber hinaus $n\tau(\bar{e}^* - \underline{e}^*) < D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*)$. Schließlich erhält man

$$\begin{aligned} R'(\chi_t) &= \Theta_t(\tau) = nC_0(e_0) - nC_I(\underline{e}^*) + n\tau(e_0(\tau) - \bar{e}^* + \bar{e}^* - \underline{e}^*) \\ &= [nC_0(e_0) + n\tau(e_0(\tau) - \bar{e}^*)] + n\tau(\bar{e}^* - \underline{e}^*) - nC_I(\underline{e}^*) \\ &< nC_0(\bar{e}^*) + [D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*)] - nC_I(\underline{e}^*) = R'(\chi^*) \quad . \quad \text{Q.E.D.} \end{aligned}$$

Beweis Lemma 6.4:

Zunächst definiere man folgenden Lizenzpreis:

$$\widehat{P} := C_0(\bar{e}^*) - C_I(\bar{e}^*) = \Delta C(\bar{e}^*) \quad .$$

Setzt der Innovator die Lizenzgebühr auf $P < \widehat{P}$, dann ist es eine dominante Strategie für jede Firma, zu investieren, da $\Delta C(s) \geq P$ für jedes $s \leq \bar{e}^*$ gilt. Andererseits definiere man

$$\widetilde{P} := C_0(\underline{e}^*) - C_I(\underline{e}^*) = \Delta C(\underline{e}^*) \quad .$$

Setzt der Innovator die Lizenzgebühr auf $P > \widetilde{P}$, dann ist es eine dominante Strategie für jede Firma, nicht zu investieren, da $\Delta C(s) \leq P$ für jedes $s \geq \underline{e}^*$. Man beachte, daß aus $\underline{e}^* < \bar{e}^*$ unmittelbar $\widehat{P} < \widetilde{P}$ folgt.

Zuletzt betrachte man den Fall, daß der Innovator einen Lizenzpreis P mit $\widehat{P} \leq P \leq \widetilde{P}$ setzt. Es sei daran erinnert, daß der Regulator für $n_I = n$ den Standard auf $s = \underline{e}^*$ und für $n_I = 0$ den Standard auf $s = \bar{e}^*$ setzt. Da andererseits $\Delta C(\underline{e}^*) \geq P$ bzw. $\Delta C(\bar{e}^*) \leq P$ sind sowohl vollständige Diffusion der neuen Technologie, d.h. $n_I = n$, als auch keine Übernahme der neuen Technologie, d.h. $n_I = 0$, mögliche Gleichgewichte. Es bleibt zu zeigen, daß auch eine teilweise Übernahme der neuen Technologie ein Gleichgewicht darstellen kann. Es sei daran erinnert, daß in einem Investitions-gleichgewicht $\Delta C(s) = P$ erfüllt sein muß. Hierdurch ist ein Standard $\tilde{s}(P)$ definiert, der um so niedriger ist, je höher die Lizenzgebühr ausfällt. Weiterhin erinnere man sich, daß in Stufe 3 der Regulator den Standard so setzen wird, daß die durchschnittlichen Grenzvermeidungskosten dem Grenzschaten entsprechen. Dies definiert einen Standard $s(n_I)$, der um so strenger ist, je mehr Firmen die neue Technologie übernommen haben. In einem teilspielperfekten Gleichgewicht muß der Standard s daher $s = \tilde{s}(P) = s(n_I)$ erfüllen. Damit ergibt sich die gleichgewichtige Anzahl an Firmen, die die neue Technologie übernimmt, durch Auflösen von Gleichung (6.3.2) nach n_I

$$n_I(P) = n \frac{D'(ns) + C'_0(s)}{C'_0(s) - C'_I(s)} \quad \text{für } \underline{e}^* < s(n_I) < \bar{e}^* \quad . \quad \text{Q.E.D.}$$

Beweis Proposition 6.7:

Im Fall erfolgreicher Innovation setzt der Innovator die Lizenzgebühr auf $P = \widehat{P}$. Da alle Firmen die neue Technologie übernehmen, setzt der Regulator den Standard auf $s = \underline{e}^*$. Der Erlös des Innovators ist gegeben durch $\Theta_s(s) = n\widehat{P} = n[C_0(\bar{e}^*) - C_I(\bar{e}^*)]$. Dieser ist offensichtlich kleiner als der soziale Wert der Innovation, denn

$$\Theta_s(s) < nC_0(\bar{e}^*) + \left[D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*) \right] - nC_I(\underline{e}^*) = R'(\chi^*) \quad . \quad \text{Q.E.D.}$$

Beweis Lemma 6.5:

Auf der letzten Stufe setzen die Firmen ihre Emissionen, so daß $-C'_0(e_0) = -C'_I(e_I) = x$ gilt. Daraus ergeben sich eindeutige Emissionen $e_0 = e_0(x)$ und $e_I = e_I(x)$ für die herkömmliche bzw. die neue Technologie. Auf der 3. Stufe setzt der Regulator den Preis für Emissionen so, daß die Grenzvermeidungskosten dem Grenzscha- den entsprechen, d.h. $x(n_I) = D'(E)$, wobei $E = n_I e_I(x) + (n - n_I) e_0(x)$.

Im folgenden bezeichne x_I den optimalen Preis für Emissionen, wenn alle Firmen die neue Technologie übernommen haben, d.h. $x_I = D'(\underline{E}^*)$ und analog dazu x_0 den optimalen Preis für Emissionen, wenn keine Firma die neue Technologie übernommen hat, d.h. $x_0 = D'(\overline{E}^*)$. Schließlich erinnere man sich, daß in einem Investitions- gleichgewicht $\Delta C(x) = P$ erfüllt sein muß. Nun definiere man einen Lizenzpreis \underline{P} , so daß $\underline{P} = \Delta C(x_I)$ gilt. Dann übernehmen offensichtlich für $P \leq \underline{P}$ alle Firmen die neue Technologie, d.h. $n_I = n$. Andererseits definiere man einen Lizenzpreis \overline{P} , so daß $\overline{P} = \Delta C(x_0)$ gilt. Dann übernimmt offensichtlich für $P \geq \overline{P}$ keine Fir- ma die neue Technologie, d.h. $n_I = 0$. Man beachte, daß aus $x_I < x_0$ unmittelbar $\underline{P} = \Delta C(x_I) < \Delta C(x_0) = \overline{P}$ folgt. Zuletzt betrachte man den Fall einer Lizenzgebühr $P \in (\underline{P}, \overline{P})$. Es sei daran erinnert, daß in einem Investitions- gleichgewicht ein Preis für Emissionen $\tilde{x}(P)$ existiert, der $\Delta C(\tilde{x}) = P$ erfüllt. Je höher der Lizenzpreis ist, um so höher ist auch dieser Preis für Emissionen \tilde{x} , da

$$\tilde{x}'(P) = 1/(e_0(\tilde{x}) - e_I(\tilde{x})) < 0 \tag{A.20}$$

gilt. Nun beachte man, daß in einem teilspielperfekten Gleichgewicht

$$x = \tilde{x}(P) = x(n_I) \tag{A.21}$$

gelten muß. Differenzieren von $E(x) = n_I e_I(x) + (n - n_I) e_0(x)$ nach x ergibt

$$E'(x) = n'_I(x) [e_I - e_0] + n_I e'_I(x) + (n - n_I) e'_0(x) \quad . \tag{A.22}$$

Man beachte weiterhin, daß $E'(x) = 1/D''(E)$ gilt. Einsetzen von Gleichungen (A.20) und (A.21) in (A.22) und Auflösen nach n_I ergibt dann schließlich

$$\frac{dn_I}{dP} = \frac{dn_I(x)}{dx} \frac{dx}{dP} = - \frac{1/D''(E) - [n_I e'_I(x) + (n - n_I) e'_0(x)]}{[e_I - e_0]^2} < 0 \quad .$$

Daher fällt die Nachfrage nach der neuen Technologie in P für $P \in (\underline{P}, \overline{P})$. Q.E.D.

Beweis Proposition 6.8:

Zunächst betrachte man den Fall einer Randlösung des Maximierungsproblems des Innovators, d.h. $P = \underline{P}$ und $n_I(P) = n$. Man beachte, daß \underline{P} definiert war als $\underline{P} = \Delta C(x_I)$. Der Regulator setzt den Preis für Emissionen auf $x = x_I$. Die aggregierten Emissionen sind gegeben durch $E = ne_I = n\underline{e}^* = \underline{E}^*$. Es sei bemerkt, daß $x_I = \underline{MD}^*$ gilt. Das F&E-Niveau beträgt daher

$$\begin{aligned} R'(\chi_p) &= \Theta(x_I) = n(C_0(e_0) + x_I e_0(x) - C_I(\underline{e}^*) - x_I \underline{e}^*) \\ &= nC_0(e_0) + nx_I(e_0(x) - \underline{e}^*) - nC_I(\underline{e}^*) \\ &= [nC_0(e_0) + nx_I(e_0(x) - \bar{e}^*)] + nx_I[\bar{e}^* - \underline{e}^*] - nC_I(\underline{e}^*) \\ &= [nC_0(e_0) + nx_I(e_0(x) - \bar{e}^*)] + x_I[\bar{E}^* - \underline{E}^*] - nC_I(\underline{e}^*) \quad . \end{aligned}$$

Da $x_I = \underline{MD}^* < \overline{MD}^*$, gilt zum einen $C_0(e_0) + x_I(e_0(x) - \bar{e}^*) < C_0(\bar{e}^*)$ und zum anderen $x_I[\bar{E}^* - \underline{E}^*] < D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*)$. Daraus folgt unmittelbar

$$\begin{aligned} R'(\chi_x) &= [nC_0(e_0) + nx_I(e_0(x) - \bar{e}^*)] + x_I[\bar{E}^* - \underline{E}^*] - nC_I(\underline{e}^*) \\ &< nC_0(\bar{e}^*) + [D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*)] - nC_I(\underline{e}^*) = R'(\chi^*) \quad . \end{aligned}$$

Das F&E-Niveau ist suboptimal.

Nun betrachte man den Fall einer inneren Lösung des Maximierungsproblems des Innovators, d.h. $P > \underline{P}$ und $n_I < n$. Laut Lemma 6.5 gilt dann insbesondere für den Preis für Emissionen $x_I < x(n_I) < x_0$. Die Gesamtemissionen sind gegeben durch $E = n_I e_I + (n - n_I)e_0 > \underline{E}^*$. Das F&E-Niveau ist ebenfalls suboptimal, da

$$\begin{aligned} R'(\chi_x) &= \Theta(x) = n_I(C_0(e_0) + x e_0(x) - C_I(e_I) - x e_I(x)) \\ &= [nC_0(e_0) + nx(e_0(x) - \bar{e}^*)] + x[n\bar{e}^* - (n_I e_I(x) + (n - n_I)e_0(x))] \\ &\quad - [n_I C_I(e_I) + (n - n_I)C_0(e_0)] \\ &= \left[nC_0(e_0) + x(ne_0(x) - \bar{E}^*) \right] + x[\bar{E}^* - E] - [n_I C_I(e_I) + (n - n_I)C_0(e_0)] \end{aligned}$$

Mit $x = D'(E) < \overline{MD}^*$ erhält man folgende Abschätzungen

$$\begin{aligned} C_0(e_0) + x(e_0(x) - \bar{e}^*) &< C_0(\bar{e}^*) \quad , \\ x[\bar{E}^* - E] &< D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*) \quad , \\ [n_I C_I(e_I) + (n - n_I)C_0(e_0)] &> nC_I(\underline{e}^*) \quad . \end{aligned}$$

Daraus folgt wiederum unmittelbar

$$\begin{aligned} R'(\chi_x) &= [nC_0(e_0) + nx(e_0(x) - \bar{e}^*)] + x [\bar{E}^* - E] - [n_I C_I(e_I) + (n - n_I)C_0(e_0)] \\ &< nC_0(\bar{e}^*) + [D(\bar{E}^*) - D(\underline{E}^*)] - nC_I(\underline{e}^*) = R'(\chi^*) \quad . \quad \text{Q.E.D.} \end{aligned}$$

Beweis Proposition 6.10:

Es sei daran erinnert, daß der Regulator den Steuersatz in Spiel A auf $\tau_0 = \overline{MD}^*$ setzt. Für Stückkosten $F \geq \bar{F}$ hat der Innovator offensichtlich keinen Anreiz, die neue Technologie zu entwickeln. Nun betrachte man Stückkosten $F < \bar{F}$. In diesem Fall ist, laut Konstruktion von \bar{F} , der Steuersatz τ_0 höher als der sozial optimale Grenzscha- den nach Innovation, d.h. $\tau_0 = \overline{MD}^* > MD^*$. Man beachte, daß der Erlös gegeben ist durch

$$\begin{aligned} \Theta_t(\tau_0) &= n[P - F] = n[\Delta C(\tau_0) - F] && \text{(A.23)} \\ &= n[C_0(e_0) + \tau_0(e_0(\tau_0) - e_I(\tau_0)) - C_I(e_I) - F] \\ &= n\left[C_0(e_0) + \overline{MD}^*(e_0(\tau_0) - e_I(\tau_0)) - C_I(e_I) - F\right] \quad . \end{aligned}$$

Andererseits gilt für den sozialen Grenznutzen aus der Übernahme der neuen Technologie

$$SMB(n_I) = C_0(e_0) + D'(E)(e_0(\tau_0) - e_I(\tau_0)) - C_I(e_I) - F \quad .$$

Da $D'(E) < \overline{MD}^*$ gilt, kann man die letzte Gleichung nach oben folgendermaßen abschätzen

$$SMB(n_I) < C_0(e_0) + \overline{MD}^*(e_0(\tau_0) - e_I(\tau_0)) - C_I(e_I) - F \quad . \quad \text{(A.24)}$$

Ein Vergleich von Gleichungen (A.23) und (A.24) ergibt, daß der Erlös aus dem Verkauf der neuen Technologie höher ist als der soziale Wert der Innovation. Q.E.D.

Beweis Proposition 6.11:

Es bezeichne σ_0 den Marktpreis für Zertifikate vor Übernahme der neuen Technologie. Analog zu Steuern ergibt sich aus der Konstruktion von \bar{F} durch $\Delta C(\sigma_0) = \bar{F}$, daß für $F \geq \bar{F}$ keine Firma einen Anreiz hat, die neue Technologie zu übernehmen.

Nun sei daran erinnert, daß laut Lemma 6.3 für $F = 0$ ein $\widehat{L}(0) < \overline{E}^*$ existiert, so daß für eine Anzahl von Zertifikaten größer als $\widehat{L}(0)$ die neue Technologie nur von einem Teil der Firmen übernommen wird. Andererseits wurde im Haupttext gezeigt, daß $\widehat{L}'(F) < 0$ gilt. Ist daher $\widehat{L}(0) < \overline{E}^*$, dann gilt auch $\widehat{L}(F) < \overline{E}^*$. Ist hingegen $\widehat{L}(0) > \overline{E}^*$, dann läßt sich ein $F_{\widehat{L}}$ mit $F_{\widehat{L}} < \overline{F}$ konstruieren, so daß $\widehat{L}(F_{\widehat{L}}) = \overline{E}^*$ gilt. Nun betrachte man Stückkosten $F < \overline{F}$. Dann wird die neue Technologie für $F_{\widehat{L}} < F < \overline{F}$ nur von einem Teil der Firmen übernommen und für $F \leq F_{\widehat{L}}$ von allen Firmen.

Zuletzt betrachte man die Innovationsanreize. Wiederum bezeichne σ den Marktpreis für Zertifikate in einem Investitionsleichgewicht. In einem Investitionsleichgewicht muß

$$P = \Delta C(\sigma) = C_0(e_0) + \sigma(e_0(\sigma) - e_I(\sigma)) - C_I(e_I) \quad (\text{A.25})$$

erfüllt sein. Der Zertifikatpreis ergibt sich dabei aus der Räumungsbedingung des Zertifikatemarktes

$$L = n_I e_I(\sigma) + (n - n_I) e_0(\sigma) \quad .$$

Man beachte, daß der Marktpreis für Zertifikate niedriger ist als der sozial optimale Grenzschaten, da $E^* < L = \overline{E}^*$. Andererseits ist der soziale Grenznutzen aus der Übernahme der neuen Technologie aber gegeben durch

$$SMB(n_I) = C_0(e_0) + D'(E)(e_0(\sigma) - e_I(\sigma)) - C_I(e_I) - F \quad . \quad (\text{A.26})$$

Ein Vergleich von Gleichungen (A.25) und (A.26) ergibt, daß der Erlös aus dem Verkauf der neuen Technologie $\Theta_p(L) = n_I [\Delta C(\sigma) - F]$ niedriger ist als der soziale Wert der Innovation. Q.E.D.

Beweis Proposition 6.12:

Zunächst betrachte man Stückkosten $F = \widehat{\widehat{F}}$. Da $\widehat{\widehat{F}} < \overline{F}$ gilt, ist der soziale Wert der Innovation offensichtlich positiv. Andererseits entsprechen laut Konstruktion von $\widehat{\widehat{F}}$ die Stückkosten gerade der Zahlungsbereitschaft für die neue Technologie, d.h. der Innovator hat keinen Anreiz in F&E zu investieren.

Nun betrachte man Stückkosten $F < \widehat{\widehat{F}}$. Es sei daran erinnert, daß $\widehat{\widehat{F}}$ größer oder kleiner als \underline{F} sein kann. Man betrachte daher zunächst den Fall $\widehat{\widehat{F}} \leq \underline{F}$. Dann sollten

alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Der soziale Wert entspricht $\Delta SC(F) = SC_0^* - [nC_I(e_I) + nF + D(\underline{E}^*)]$. Differenzieren bezüglich F ergibt $\Delta SC'(F) = -n$. Bei einem Standard $s = \underline{e}^*$ übernehmen alle Firmen die neue Technologie. Der Erlös ist gegeben durch $\Theta_s(\underline{e}^*, F) = n[\Delta C(\underline{e}^*) - F]$. Differenzieren nach F ergibt $\partial\Theta_s(\underline{e}^*, F)/\partial F = -n$. Nun beachte man, daß Standards laut Proposition 6.2 für $F = 0$ suboptimale Anreize in F&E bieten. Da andererseits sowohl der soziale Wert der Innovation als auch der Erlös des Innovators gleichermaßen mit F fallen, bieten Standards im gesamten Intervall $[0, \widehat{F}]$ suboptimale Anreize in F&E. Nun betrachte man den Fall $\widehat{F} > \underline{E}$. In diesem Fall fällt der Erlös des Innovators schneller als der soziale Wert der Innovation. Für den Erlös des Innovators gilt $\partial\Theta_s(\underline{e}^*, F)/\partial F = -n$. Andererseits ergibt Differenzieren von $\Delta SC(F)$ nach F in der Umgebung von n_I^* nach Ausnutzung des Umhüllendensatzes

$$\Delta SC'(F) = -n_I^* + n_I'(F) \underbrace{[C_0(e_0) + (e_0 - e_I) MD(F) - C_I(e_I) - F]}_{=0} = -n_I^* \quad .$$

Da $n_I^* < n$ für $\widehat{F} > \underline{E}$, gilt $\partial\Theta_s(\underline{e}^*, F)/\partial F < \Delta SC'(F)$. Daher bieten Standards auch im Intervall $[\underline{E}, \widehat{F}]$ suboptimale Anreize in F&E. Q.E.D.

Beweis Proposition 6.13:

Für Stückkosten $F > \underline{E}$ hat der Innovator keinen Anreiz, die neue Technologie zu entwickeln. Nun betrachte man Stückkosten $F \leq \underline{E}$. Dann sollten alle Firmen die neue Technologie übernehmen (sofern die Innovation erfolgreich ist). Der soziale Wert entspricht $\Delta SC(F) = SC_0^* - [nC_I(e_I) + nF + D(\underline{E}^*)]$. Differenzieren bezüglich F ergibt $\Delta SC'(F) = -n$. Es bezeichne τ_I den optimalen Steuersatz, d.h. $\tau_I = \underline{MD}^*$. Der Erlös des Innovators positiv, d.h. $\Theta_t(\tau_I, F) = n[\Delta C(\tau_I) - F] > 0$. Differenzieren nach F ergibt $\partial\Theta_t(\tau_I, F)/\partial F = -n$. Man erinnere sich, daß für $F = 0$ laut Proposition 6.5 die Anreize des Innovators zu gering sind. Andererseits sinkt der soziale Wert der Innovation und die Anreize des Innovators gleichermaßen für steigende F , d.h. $\Delta SC'(F) = \partial\Theta_t(\tau_I, F)/\partial F$. Daher gilt $\Theta(\tau_I) < R'(\chi^*)$ für $F \leq \underline{E}$. Q.E.D.

Beweis Proposition 6.14:

Die Herleitung des kritischen Wertes $\widehat{F}_{\widehat{L}}$ verläuft analog zu Proposition 6.11. Wiederum sei daran erinnert, daß laut Lemma 6.3 für $F = 0$ ein $\widehat{L}(0) < \overline{E}^*$ existiert, so daß für

eine Anzahl von Zertifikaten größer als $\widehat{L}(0)$ die neue Technologie nur von einem Teil der Firmen übernommen wird. Andererseits wurde im Haupttext bereits gezeigt, daß $\widehat{L}'(F) < 0$ gilt. Ist daher $\widehat{L}(0) < \underline{E}^*$, dann gilt auch $\widehat{L}(F) < \underline{E}^*$. Ist hingegen $\widehat{L}(0) > \underline{E}^*$, dann läßt sich ein $\widehat{F}_{\widehat{L}}$ konstruieren, so daß $\widehat{L}(\widehat{F}_{\widehat{L}}) = \underline{E}^*$ gilt. Im Fall $F \leq \widehat{F}_{\widehat{L}}$ teilt der Regulator $L = \underline{E}^*$ viele Zertifikate aus und der Innovator setzt den Preis P^{\max} so, daß alle Firmen die neue Technologie übernehmen. Es bezeichne σ_I den korrespondierenden Marktpreis. Man beachte, daß sowohl $\sigma_I = \underline{MD}^*$ als auch $\Delta C(\sigma_I) = \underline{E}$ gilt. Da andererseits $\Delta C(\sigma_I) = \underline{E} + P$ gilt, erhält man $\widehat{F}_{\widehat{L}} \leq \underline{E}$. Im Fall von Stückkosten $\widehat{F}_{\widehat{L}} < F < \overline{F}$ teilt der Regulator hingegen $L > \widehat{L}(\widehat{F}_{\widehat{L}})$ viele Zertifikate aus und der Innovator setzt den Preis P^{\max} so, daß die neue Technologie nur von einem Teil der Firmen übernommen wird. Q.E.D.

Beweis Proposition 6.16:

Es bezeichne $x(n_I)$ den optimalen Marktpreis für Emissionen, falls n_I viele Firmen die neue Technologie übernommen haben. Man beachte, daß im Fall vollständiger Übernahme $x(n) = \underline{MD}^*$ und $\Delta C(x(n)) = \underline{E}$ gilt. Da der Innovator den Preis für die Innovation P^{\max} höher als die Stückkosten setzen wird, d.h. $P^{\max} > F$, existiert ein F_x mit $F_x < \underline{E}$, so daß für $F \leq F_x$ alle Firmen die neue Technologie übernehmen und für $F_x < F < \overline{F}$ die neue Technologie nur von einem Teil der Firmen übernommen wird. Zunächst unterstelle man Stückkosten $F \leq F_x$. In diesem Fall setzt der Regulator den Preis für Emissionen auf $x(n) = \underline{MD}^*$. Die aggregierten Emissionen entsprechen $E = ne_0(x(n)) = \underline{E}^*$. Nun gehe man von Stückkosten $F \in (F_x, \overline{F})$ aus. Es bezeichne $x^*(F)$ den sozial optimalen Preis für Emissionen. Man beachte, daß $\Delta C(x^*(F)) = F$ gilt. Dann impliziert $P > \Delta C(x^*(F))$, daß zu wenige Firmen die neue Technologie übernehmen. Daher gilt auch für den optimalen Preis für Emissionen $x(n_I) > \underline{MD}^*$ und für die aggregierten Emissionen $E(x) > \underline{E}^*$.

Zuletzt betrachte man die Innovationsanreize. Es sei daran erinnert, daß der soziale Grenznutzen aus Übernahme der neuen Technologie durch eine weitere Firma gegeben ist durch

$$SMB(n_I) = C_0(e_0) + D'(E)(e_0(D'(E)) - e_I(D'(E))) - C_I(e_I) - F \quad . \quad (\text{A.27})$$

Andererseits gilt für den Preis der Innovation

$$P = C_0(e_0) + x(n_I)(e_0(x) - e_I(x)) - C_I(e_I)$$

bzw. nach Abzug der Stückkosten

$$P - F = C_0(e_0) + x(n_I)(e_0(x) - e_I(x)) - C_I(e_I) - F \quad . \quad (\text{A.28})$$

Da suboptimal viele Firmen die neue Technologie übernehmen, d.h. $n_I < n_I^*$, gilt $x(n_I) > MD^*(F)$. Damit ergibt ein Vergleich von Gleichungen (A.27) und (A.28), daß auch die Anreize in Innovation suboptimal sind. Q.E.D.

Literaturverzeichnis

- Arrow, K.** [1962]: „Economic Welfare and the allocation of resources for invention,“ in: Nelson, R. (Ed.), *The Rate and Direction of Inventive Activity: Economic and Social Factors*, NBER, Princeton University Press.
- Atkinson, S.E. und D.H.Lewis** [1974]: „A Cost-Effectiveness Analysis of Alternative Air Quality Control Strategies.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 1: 237–250.
- Atkinson, S.E. und T.H. Tietenberg** [1982]: „The Empirical Properties of Two Classes of Designs for Transferable Discharge Permit Markets.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 9:101–121.
- Atkinson, S.E. und T.H. Tietenberg** [1991]: „Market Failure in Incentive-Based Regulation: The Case of Emissions Trading.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 21: 17–31.
- Bailey, E. M.** [1998]: „Intertemporal Pricing of sulfur Dioxide Allowances.“ MIT, Center for Energy and Environmental Policy Research, Working Paper 98-006.
- Baumol, W.J.** [1972]: „On Taxation and the Control of Externalities.“ *American Economic Review*, LXII (3): 307–322.
- Baumol, W.J. und W.E. Oates** [1971]: „The Use of Standards and Prices for Protection of the Environment.“ *Swedish Journal of Economics*, 73: 42–54.
- Baumol, W.J. und W.E. Oates** [1988]: „The Theory of Environmental Policy.“ 2nd Edition, Cambridge University Press.
- Beath, J., Katsoulacos, Y. und D. Ulph** [1995]: „Game-theoretic approaches to the modelling of technological change,“ in: P. Stoneman (Ed.), *Handbook of Innovation and Technological Change*, Blackwell Press, Oxford, UK.

- Besanko, D.** [1987]: „Performance versus design standards in the regulation of pollution,“ *Journal of Public Economics*, 34: 19–44.
- Biglaiser, G., Horowitz, J.K. und J. Quiggin** [1995]: „Dynamic Pollution Regulation,“ *Journal of Regulatory Economics*, 8: 33–44.
- Biglaiser, G. und J.K. Horowitz** [1995]: „Pollution Regulation and Incentives for Pollution Control Research,“ *Journal of Economics and Management Strategy*, 3: 663–684.
- Bohm, P. und C. Russell** [1985]: „Comparative Analysis of Alternative Policy Instruments.“ in: A.V. Kneese and J.L. Sweeney (Ed.), *Handbook of Natural Resource and Energy Economics*, Amsterdam, North-Holland. 1: 395–460.
- Bovenberg, A.L. und R.A. de Mooij** [1994]: „Environmental levies and distortionary taxation,“ *American Economic Review*, 84: 1085–1089.
- Bovenberg, A.L. und S. Smulders** [1995]: „Environmental quality and pollution-augmenting technological change in a two-sector endogenous growth model,“ *Journal of public Economics*, 57: 369–391.
- Burtraw, D.** [1996]: „The SO₂ emissions trading program: cost savings without allowance trades,“ *Contemporary Economic Policy*, 14: 79–94.
- Cansier, D. und R. Krumm** [1997]: „Air pollutant taxation: an empirical survey,“ *Ecological Economics*, 23: 59–70.
- Carraro, C. und D. Siniscalco** [1994]: „Environmental Policy Reconsidered: the Role of Technological Innovation.“ *European Economic Review*, 38: 545–554.
- Carraro, C. und A. Soubeyran** [1996]: „Environmental taxation and profits in oligopoly.“ in: Carraro, C., Katsoulacos, Y. und A. Xepapadeas (Ed.), *Environmental Policy and Market Structure*, Kluwer Academic Publishers.
- Cason, T. und C. Plott** [1996]: „EPA’s new emissions trading mechanism: a laboratory evaluation,“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 30: 905–922.
- Coase, R.** [1960]: „The Problem of Social Cost.“ *The Journal of Law and Economics*, 3: 1–44.

- Coase, R.** [1972]: „Durability and Monopoly.“ *Journal of Law and Economics*, 15: 143–149.
- Com** [1998]: „Klimaänderungen – zu einer EU-Strategie nach Kyoto.“ Mitteilung der Kommission an den Rat und das europäische Parlament, COM(98)353.
- Dales, J.H.** [1968]: „Pollution, Property and Prices.“ University Press, Toronto, Canada.
- Dasgupta, P., Hammond, P.J. und E.S. Maskin** [1980]: „On Imperfect Information and Optimal Pollution Control.“ *Review of Economic Studies*, 146: 857–860.
- Dasgupta, P. und J. Stiglitz** [1980a]: „Industrial structure and the nature of innovative activity,“ *The Economic Journal*, 90: 266–293.
- Dasgupta, P. und J. Stiglitz** [1980b]: „Uncertainty, industry structure and the speed of R&D,“ *The Bell Journal of Economics*, 11: 1–28.
- Downing, P.B. und L.J. White** [1986]: „Innovation in Pollution Control,“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 13: 18–29.
- Ebert, U.** [1998]: „Relative Standards: A positive and normative analysis,“ *Journal of economics*, 67 (1): 17–38.
- Ellerman, A.D.** [1998]: „Electric utility response to allowances: from autarkic to market-based compliance,“ MIT discussion paper.
- Ellerman, A.D. und J.P. Montero** [1998]: „The Declining Trend in Sulfur Dioxide Emissions: Implications for Allowance Prices.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 36: 26–45.
- EPRI** [1993]: „Integrated Analysis of Fuel, Technology and Emission Allowance Markets: Electric Utility Responses to the Clean Air Act Amendments of 1990,“ EPRI TR–102510, Palo Alto, CA.
- Farrell, A., Carter, R. und R. Rauffer** [1999]: „The NO_x Budget: market-based control of tropospheric ozone in the northeastern United States,“ *Resource and Energy Economics*, 21: 103–124.
- Farrow, S.** [1995]: „The Dual Political Economy of Taxes and Tradable Permits,“ *Economic Letters*, 49: 217–220.

- Farzin, H. F.** [1999]: „Pollution abatement investment when environmental regulation is uncertain,“ EAERE Conference, Oslo.
- Feess, E.** [1998]: „Environmental Policy and Incentives to Adopt Advanced Pollution Abatement Technology,“ Discussion Paper No.86, Department of Economics, University of Frankfurt.
- Fischer, C., Parry, I.W.H. und W.A. Pizer** [1998]: „Instrument Choice for Environmental Protection when Technological Innovation is Endogenous,“ Discussion Paper 99-04, Resources for the Future, Washington D.C.
- Fredriksson, P.G.** [1997]: „Environmental policy choice: Pollution abatement subsidies,“ *Resource and Energy Economics*, 20: 51-63.
- Gabler** [1996]: „Gabler-Volkswirtschafts-Lexikon,“ Gabler Verlag, Wiesbaden.
- Georg, S., Ropke, I. und U. Jorgensen** [1992]: „Clean Technology - Innovation and Environmental Regulation.“ *Environmental and Resource Economics*, 2: 533-550.
- Gersbach, H. und A.Glazer** [1999]: „Markets and Regulatory Hold-up Problems,“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 37: 151-164.
- Goulder, L.H.** [1995]: „Environmental taxation and the 'double dividend': a reader's guide.“ *International Tax and Public Finance*, 2: 157-183.
- Griliches, Z.** [1957]: „Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technical Change.“ *Econometrica*, 25 (4): 501-522.
- Gul, F., H. Sonnenschein und R. Wilson** [1986]: „Foundations of Dynamic Monopoly and the Coase Conjecture.“ *Journal of Economic Theory*, 39: 155-190.
- Hahn, R.W.** [1984]: „Market Power and Transferable Property Rights,“ *The Quarterly Journal of Economics*, 99: 753-765.
- Hahn, R.W.** [1989]: „Economic Prescriptions for Environmental Problems: How the Patient Followed the Doctor's Orders,“ *The Journal of Economic Perspectives*, 3: 95-114.

- Heijnes, H.A.M., Jantzen, J., Nentjes, A. und F. Schellerman** [1998]: „Tradable emission permits versus flexibilisation of regulation: a case study,“ Paper for the World Congress of Environmental and Resource Economists, Venice.
- Helfand, G.E.** [1991]: „Standards versus Standards: The Effect of Different Pollution Restrictions,“ *The American Economic Review*, 81(3): 622–634.
- Hemmelskamp, J.** [1998]: „Der Einfluß der Umweltpolitik auf das Innovationsverhalten - eine ökonometrische Untersuchung.“ Discussion Paper, Centre for European Economic Research, Mannheim.
- Hoteling, H.** [1929]: „Stability in Competition,“ *Economic Journal*, 39: 41–57.
- 1994** : „Taxes Versus Tradable Discharge Permits: A Review in the Light of the U.S. and European Experience,“ *Environmental and Resource Economics*, 4: 151–169.
- IfW** [1997]: „Zahlen zur wirtschaftlichen Entwicklung der Bundesrepublik Deutschland.“ Institut der Deutschen Wirtschaft, Köln.
- Jaffe, A.B. und R.N. Stavins** [1995]: „Dynamic Incentives of Environmental Regulations: The Effects of Alternative Policy Instruments on Technology Diffusion.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 29 (Suppl.Part 2): 43–63.
- Joskow, P. und R. Schmalensee** [1998a]: „The political economy of market-based environmental policy: The U.S. Acid Rain Program,“ *Journal of Law and Economics*, forthcoming.
- Joskow, P. und R. Schmalensee** [1998b]: „The Market for Sulfur Dioxide Emissions.“ *The American Economic Review*, 88: 669–685.
- Jung, Ch., Krutilla, K. und R. Boyd.** [1996]: „Incentives for Advanced Pollution Abatement Technology at the Industry Level: An Evaluation of Policy Alternatives,“ *Journal Environmental Economics and Management*, 30: 95–111.
- Kamien, M. und N. Schwartz** [1969]: „Induced factor augmenting technical progress from a microeconomic viewpoint,“ *Econometrica*, 37: 668–684.
- Kamien, M. und N. Schwartz** [1982]: „Market Structure and Innovation.“ Cambridge University Press.

- Katsoulacos, Y. und A. Xepapadeas** [1996]: „Emission taxes and market structure.“ in: Carraro, C., Katsoulacos, Y. und A. Xepapadeas (Ed.), *Environmental Policy and Market Structure*, Kluwer Academic Publishers.
- Kemp, R.** [1996]: „Environmental Policy and Technical Change: A Comparison of the Technological Impact of Policy Instruments.“ Cheltenham.
- Kennedy, P.W. und B. Laplante** [1998]: „Environmental Policy and Time Consistency,“ University of Victoria, Discussion Paper.
- Klaassen, G.** [1996]: „Acid Rain and Environmental Degradation: The economics of Emission Trading,“ Edward Elgar, Cheltenham.
- Kling, C. und J. Rubin** [1997]: „Bankable permits for the Control of Environmental Pollution,“ *Journal of Public Economics*, 64: 101–115.
- Kneese, A.V. und C.L. Schulze** [1975]: „Pollution, Prices and Public Policy,“ Brookings Institution, Washington, DC.
- Kwerel, E.** [1977]: „To Tell the Truth: Imperfect Information and Optimal Pollution Control,“ *Review of Economic Studies*, 136: 595–601.
- Laffont, J.-J. und J. Tirole** [1996a]: „Pollution Permits and Compliance Strategies,“ *Journal of Public Economics*, 62: 85–125.
- Laffont, J.-J. und J. Tirole** [1996b]: „Pollution Permits and Environmental Innovation,“ *Journal of Public Economics*, 62: 127–140.
- Lanjouw, J.O. und A. Mody** [1995]: „Innovation and the international diffusion of environmentally responsive technology.“ *Research Policy*, 25: 549–571.
- Magat, W.A.** [1978]: „Pollution control and technological advance: A dynamic model of the firm,“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 5: 297–300.
- Maloney, M.T. und B. Yandle** [1984]: „Estimation of the Cost of Air Pollution Control Regulation.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 11: 244–263.

- Malueg, D.A.** [1989]: „Emission Credit Trading and the Incentive to Adopt New Pollution Abatement Technology,“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 16: 52–57.
- Malueg, D.A.** [1990]: „Welfare Consequences of Emissions Credit Trading Programs.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 18: 66–77.
- Mansfield, E.** [1961]: „Technical Change and The Rate of Imitation.“ *Econometrica*, 29: 741–766.
- Marin, A.** [1991]: „Comment: Firms Incentives to Promote Technological Change in Pollution Control,“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 21: 297–300.
- Mendelsohn, R.** [1984]: „Endogenous Technical Change and Environmental regulation,“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 11: 202–207.
- Milliman, S.R. und R. Prince** [1989]: „Firms Incentives to Promote Technological Change in Pollution Control,“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 17: 247–265.
- Montero, J.-P.** [1997]: „Marketable pollution permits with uncertainty and transaction costs,“ *Resource and Energy Economics*, 20: 27–50.
- Montero, J.-P.** [1998]: „Environmental Regulation and Technology Innovation,“ paper presented at the World Congress of Environmental and Resource Economists, Venice, June 1998.
- Montero, J.-P. und A.D. Ellerman** [1998]: „Low prices in the sulfur dioxide emissions market: The effect of declining emissions and irreversible investments,“ draft, MIT.
- Montgomery, W.D.** [1972]: „Markets in Licenses and Efficient Pollution Control Programs.“ *Journal of Economic Theory*, 5: 395–418.
- OECD** [1997]: „Evaluating Economic Instruments for Environmental Policy.“ OECD.
- Orr, L.** [1976]: „Incentive for innovation as the basis for effluent charge strategy,“ *American Economic Review*, 56: 441–447.

- Petrakis, E. und** [1997]: „Environmental impact of technology policy: R&D subsidies versus R&D Cooperation,“ EAERE Conference, Tilburg.
- Petrakis, E. und A. Xepapadeas** [1999]: „Environmental policy, government commitment and market power,“ EAERE Conference, Oslo.
- Pezzey, J.** [1992]: „The Symmetry Between Controlling Pollution by Price and Controlling It By Quantity,“ *The Canadian Journal of Economics*, 25: 983–991.
- Phaneuf, D. und T. Requate** [1998]: „Incentives for Investment in Advanced Pollution Abatement Technology in Emission Permit Markets with Banking,“ Discussion Paper No.269, Department of Economics, University of Heidelberg.
- Pigou, A.C.** [1920]: „The Economics of Welfare.“ Macmillan, London.
- Reingarnum, J.F.** [1989]: „The Timing of Innovation: Research, Development, and Diffusion,“ *Handbook of Industrial Organization*, North-Holland.
- Requate, T.** [1993]: „Pollution Control Under Imperfect Competition: Asymmetric Bertrand Duopoly with Linear Technologies.“ *Journal of Institutional and Theoretical Economics*, 149 (2): 415–442.
- Requate, T.** [1995]: „Incentives to Adopt New Technologies Under Different Pollution-Control Policies.“ *International Tax and Public Finance*, 2: 295–317.
- Requate, T.** [1998a]: „Incentives to innovate under emission taxes and tradeable permits,“ *European Journal of Political Economy*, 14: 139–165.
- Requate, T.** [1998b]: „Does Banking of Permits Improve Welfare?“ Discussion Paper Nr. 272, Department of Economics, University of Heidelberg.
- Requate, T. und W. Unold** [1998]: „On the Incentives to Adopt Advanced Abatement Technology - Would the True Ranking Please Stand up?“ Discussion Paper No.251, Department of Economics, University of Heidelberg.
- Requate, T. und W. Unold** [1999]: „On the Incentives of Environmental Policy Instruments to Adopt Advanced Abatement Technology if Firms are Asymmetric,“ mimeo.
- Rico, R.** [1995]: „The U.S. Allowance Trading System for Sulfur Dioxide: An Update on Market Experience,“ *Environmental and Resource Economics*, 5(2): 115–129.

- Ritchken, P.** [1987]: „Options: Theory, Strategy, and Applications,“ Scott, Foresman and Company, Glenview, Illinois.
- Roberts, E. und M. Spence** [1976] „Effluent Charges and Licenses Under Uncertainty,“ *Journal of Public Economics*, 5: 193–208.
- Rose-Ackerman, S.** [1995]: „Umweltrecht und -politik in den Vereinigten Staaten und der Bundesrepublik Deutschland,“ Nomos-Verlag, Baden-Baden.
- Ross, S.** [1976]: „Options and Efficiency,“ *Quarterly Journal of Economics*, 90: 75–89.
- Salop, S.** [1979]: „Monopolistic Competition with Outside Goods,“ *Bell Journal of Economics*, 10: 141–156.
- Selten, R.** [1975]: „Reexamination of the perfectness concept for equilibrium points in extensive games.“ *International Journal of Game Theory*, 4: 25–55.
- Siebert, H.** [1998]: „Economics of the Environment,“ 5. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg.
- Smith, A.E., Platt, J. und A.D. Ellerman** [1998]: „The costs of reducing utility SO₂ emissions – not as low as you might think,“ MIT discussion paper.
- Smulders, S. und R. Gradus** [1996]: „Pollution abatement and long-term growth.“ *European Journal of Political Economy*, 12: 505–532.
- Solow, R.** [1957]: „Technical Change and the Aggregate Production Function.“ *Review of Economics and Statistics*, 39: 312–320.
- Spulber, D.F.** [1985]: „Effluent Regulation and Long-Run Optimality,“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 12 (2): 103–116.
- Stavins, R.N.** [1995]: „Transaction Costs and Tradable Permits.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, 29: 133–148.
- Tirole, J.** [1994]: „The Theory of Industrial Organization,“ The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Tisato, P. und C. Allen** [1993]: „Taxes and Marketable Permits in Pollution Control,“ *Economic Papers*, 12: 83–86.

- Turner, K., Pearce, D. und J. Bateman** [1994]: „Environmental Economics,“ Harvester Wheatsheaf, Hertfordshire.
- Ulph, D.** [1998]: „Environmental Policy and Technological Innovation,“ in: C. Carraro and D. Siniscalco (Ed.), *Frontiers of Environmental Economics*, Edward Elgar, Cheltenham, UK.
- Umweltbundesamt** [1999]: Internet-Homepage: <http://www.umweltbundesamt.de> .
- van Leeuwen, M.J., Velthuisen, J.W., van Es, G.A., van Buijen, K.H.S. und A.W.M. de Groot** [1998]: „Market Forces and Environmental Policy,“ Paper for the World Congress of Environmental and Resource Economists, Venice.
- Weimann, J.** [1995]: „Umweltökonomik,“ 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg.