

# **Lerneffekte mit Spillover - Optimale Regulierung, Marktevolution und empirische Evidenz**

**Mit einer theoretischen und empirischen  
Untersuchung des Windenergiesektors**

## **Inaugural-Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors  
der Wirtschafts- und Sozialwissenschaftlichen Fakultät  
der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

vorgelegt von  
Diplom-Volkswirt Albrecht Bläsi  
aus Stuttgart

Kiel, April 2006

„Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich meine Doktorarbeit „Lerneffekte mit Spillover - Optimale Regulierung, Marktevolution und empirische Evidenz“ selbständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe verfasst habe, und dass alle wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommenen Stellen dieser Arbeit unter Quellenangabe einzeln kenntlich gemacht sind.“

Kiel, den

# Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b>	<b>iv</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Einführung in die theoretische Literatur</b>	<b>6</b>
2.1 Lerneffekte in einer geschlossenen Volkswirtschaft . . . . .	9
2.1.1 Lerneffekte im Monopolfall . . . . .	9
2.1.2 Lerneffekte im Oligopolfall . . . . .	10
2.1.3 Lerneffekte und vollkommener Wettbewerb . . . . .	12
2.1.4 Lerneffekte und Evolution von Märkten . . . . .	13
2.2 Lerneffekte und Außenhandelspolitik . . . . .	17
2.3 Offene Fragen . . . . .	19
<b>3 Lerneffekte bei vollkommenem Wettbewerb</b>	<b>20</b>
3.1 Einmalige Fixkosten und einmaliger Markteintritt . . . . .	20
3.1.1 Das Grundmodell . . . . .	20
3.1.2 Das soziale Optimum . . . . .	22
3.1.3 Die optimale Politik bei vollkommenem Wettbewerb . . . . .	23
3.1.4 Komparative Statik . . . . .	24
3.2 Fixkosten in beiden Perioden - später Marktzutritt und früher Marktaustritt	28
3.2.1 Modellerweiterung . . . . .	28

3.2.2	Die optimale Politik bei spätem Marktzutritt und frühem Marktaustritt . . . . .	29
3.2.3	Komparative Statik . . . . .	38
3.3	Zusammenfassung . . . . .	40
3.4	Anhang . . . . .	41
<b>4</b>	<b>Lerneffekte bei Cournotwettbewerb</b>	<b>49</b>
4.1	Einmalige Fixkosten . . . . .	49
4.1.1	Gleichgewichtskonzept und Firmenverhalten . . . . .	50
4.1.2	Die optimale Politik bei Cournotwettbewerb . . . . .	52
4.1.3	Eine Bemerkung zur Spilloverrate . . . . .	54
4.2	Fixkosten in beiden Perioden - später Markteintritt und früher Marktaustritt	55
4.2.1	Modellerweiterung . . . . .	55
4.2.2	Später Markteintritt . . . . .	55
4.2.3	Früher Marktaustritt . . . . .	60
4.3	Zusammenfassung . . . . .	64
4.4	Anhang . . . . .	65
<b>5</b>	<b>Optimale Regulierung bei Lerneffekten im Windkraftsektor</b>	<b>68</b>
5.1	Einleitung . . . . .	68
5.1.1	Politischer Hintergrund . . . . .	68
5.1.2	Struktur des deutschen Strom- und Windenergiesektors . . . . .	70
5.2	Das Modell . . . . .	73
5.3	Das soziale Optimum . . . . .	76
5.4	Optimale Regulierung bei vollkommenem Wettbewerb . . . . .	77
5.5	Zweitbeste Regulierung falls Pigou-Steuern (politisch) nicht möglich sind .	78
5.5.1	Komparative Statik bei Lerneffekten ohne Spillover-Effekte . . . . .	79

5.5.2	Zweitbeste Subventionen ohne Spillover-Effekte . . . . .	81
5.5.3	Komparative Statik bei Lerneffekten mit Spillover-Effekten . . . . .	83
5.5.4	Zweitbeste Subventionen mit Spillover-Effekten . . . . .	84
5.6	Zusammenfassung . . . . .	85
5.7	Anhang . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Einführung in die empirische Untersuchung von Lerneffekten</b>	<b>94</b>
6.1	Herleitung der Schätzgleichung aus einer Cobb-Douglas-Funktion . . . . .	95
6.2	Erweiterungen der klassischen Lernkurve . . . . .	98
6.3	Privates oder öffentliches Lernen? . . . . .	102
6.4	Managementempfehlungen bei Lerneffekten . . . . .	103
6.5	Lerneffekte im Energiesektor . . . . .	104
<b>7</b>	<b>Der Einfluss von Lerneffekten auf die Preise der Windturbinenindustrie</b>	<b>108</b>
7.1	Datengewinnung . . . . .	108
7.2	Datenaufbereitung . . . . .	109
7.3	Deskriptive Beschreibung des Datensatzes . . . . .	113
7.4	Schätzungen . . . . .	118
7.5	Schlussfolgerungen . . . . .	123
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
	<b>Literatur</b>	<b>129</b>

# Danksagung

Diese Arbeit ist das Ergebnis meiner Forschung der letzten drei bis vier Jahre. Diese hätte aber in dieser Form nie fertig gestellt werden können, ohne die vielen Menschen, die mir dabei geholfen haben.

An dieser Stelle möchte ich mich daher herzlich bei meinem Betreuer Till Requate für die zahlreichen konstruktiven Verbesserungsvorschläge und Ideen insbesondere zum theoretischen Teil dieser Arbeit bedanken. Ebenso geht mein Dank an Helmut Herwartz für die hilfreichen Anmerkungen zum empirischen Teil meiner Arbeit.

Ich habe außerdem von vielen Anregungen profitiert, die ich bei Präsentationen einzelner Teile der Arbeit auf Konferenzen wie der EAERE, der EEA und der SGVS, aber auch im „Brown-Bag-Seminar“ unserer Fakultät und nicht zuletzt im kleinen Kreis unseres Lehrstuhlkolloquiums erhalten habe. Mein Dank geht daher auch an meine Kollegen Paul Mensink, Dagmar Nelissen, Andreas von Döllen, Thure Traber, Gunter Bahr und Thomas Lontzek. Ich danke außerdem den wissenschaftlichen Hilfskräften des Lehrstuhls, insbesondere Insa Kühling, Nils Courvoisier, Kai Lassen und Christoph Richter, die mir mit zahlreichen Kleinigkeiten behilflich waren.

# Kapitel 1

## Einleitung

*„If we want cost-efficient, CO<sub>2</sub>-mitigation technologies available during the first decades of the new century, these technologies must be given the opportunity to learn in the current market place.“ Internationale Energieagentur (2000, S. 97)*

*„Die Realisierung einer nachhaltigen Energieversorgung ist ein zentrales Politikziel der Bundesregierung. [...] Ein Kernelement dieser Strategie ist es, [...] durch die Degressions-effekte der Breitereinführung dazu beizutragen, dass Strom aus Erneuerbaren Energien sich am Markt durchsetzen kann.“ Aus der Begründung des Erneuerbare-Energien-Gesetz, Bundesumweltministerium (2004)*

Seit Anfang der 90-er Jahre wird in Deutschland Strom aus erneuerbaren Energieformen wie Wind und Sonne subventioniert. Diese Subventionierung wurde mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (2000) und dessen Überarbeitung 2004 fortgesetzt. Das Ziel des Gesetzgebers ist eine nachhaltige Energieversorgung. Dies bedeutet, dass die CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert und die Versorgungssicherheit durch Verringerung der Abhängigkeit vom Ausland erhöht wird. Die erneuerbaren Energieformen sind allerdings derzeit noch nicht wettbewerbsfähig, aber der Gesetzgeber erhofft sich, dass durch eine subventionierte Breitereinführung Degressionseffekte entstehen, die dazu führen, dass erneuerbare Energien in Zukunft konkurrenzfähig sein werden. Ähnlich argumentiert auch die Internationale Energieagentur: Um in einigen Jahren CO<sub>2</sub>-reduzierende Technologien (und gemeint sind auch hier Wind- und Solarenergie) zur Verfügung zu haben, müsse diesen jetzt die Gelegenheit gegeben werden zu lernen. Hinter diesen Argumenten steckt die Hoffnung, dass die Produktionskosten im Laufe der Zeit durch Learning-by-Doing absinken und zwar möglichst so stark, dass die neuen Technologien auch ohne Staatsintervention wettbewerbsfähig sein werden.

Bei dieser Argumentationsweise stellen sich im Wesentlichen zwei Fragen: Gibt es Learning-by-Doing überhaupt und wenn ja, rechtfertigt dies dann einen Staatseingriff?

Dies sollen die Leitfragen sein, die ich in dieser Arbeit zu beantworten suche. Das Ziel der Arbeit besteht letztlich darin, mit Hilfe der gewonnenen Antworten konkrete wirtschaftspolitische Empfehlungen bei der Regulierung der erneuerbaren Energien geben zu können. Zur Klärung dieser Fragen untersuche ich erst zwei allgemeine Modelle mit Lerneffekten, um dann ein Modell des Windkraftsektors mit Lerneffekten zu analysieren. In einem empirischen Teil frage ich mich schließlich, ob Lerneffekte im Bereich der Windenergie in der Vergangenheit beobachtet werden konnten.

Zunächst ist jedoch zu klären, was man unter Lerneffekten oder Learning-by-Doing (ich verwende beides synonym) versteht. Ganz allgemein bedeutet dies, dass Individuen oder Unternehmen durch die häufige Ausübung einer Handlung, wie zum Beispiel eines Produktionsvorgangs, Erfahrung gewinnen und dadurch besser werden. Bei Unternehmen bedeutet „besser“ ganz konkret, dass der Produktionsprozess für eine Einheit billiger wird, also die Kosten sinken. Auf die erneuerbaren Energien, und hier speziell auf den Windenergiesektor übertragen, heißt dies, dass die Kilowattstunde Windstrom oder die einzelne Windenergieanlage mit zunehmender Produktionsmenge billiger werden sollte.

Welche Auswirkungen Learning-by-Doing haben kann, wurde erstmals von Arrow (1962) in einem theoretischen Modell untersucht. Ein Hauptergebnis der bisherigen Forschung zu Learning-by-Doing (Spence 1981) lautet, dass Lerneffekte dazu führen, dass die wahren Grenzkosten einer Firma in einer Periode nicht nur aus den Grenzkosten der Produktion in dieser Periode bestehen, sondern dass dazu noch der Grenznutzen des Lernens gezählt werden muss. Dieser Grenznutzen entsteht, weil die Produktion in einer bestimmten Periode durch die Lerneffekte die Produktionskosten in den Folgeperioden senkt. Daraus folgern Fudenberg und Tirole (1983), dass, falls die Grenzkosten in einer bestimmten Periode konstant sind, im Optimum nur eine Firma aktiv ist und es kein Gleichgewicht bei vollkommenem Wettbewerb geben kann. Bei steigenden Grenzkosten in einer Periode gibt es jedoch, wie Petrakis, Rasmusen und Roy (1997) zeigen, auch bei vollkommenem Wettbewerb ein Gleichgewicht. Insbesondere zeigen die Autoren, dass bei rein privaten Lerneffekten ohne Spillover alle Firmen die Lerneffekte internalisieren: das Marktergebnis ist so die sozial optimale Allokation.

Die Literatur legt nahe, dass es bei Existenz von Learning-by-Doing eine Tendenz zu Marktaustritten gibt beziehungsweise zumindest Markteintritte nicht möglich sind. So argumentieren beispielsweise Dasgupta und Stiglitz (1988), dass eine Firma, die einmal einen Vorsprung hat, diesen unter Umständen immer weiter ausbauen kann, bis sie die anderen Firmen wegen wesentlich niedrigerer Kosten aus dem Markt drängen kann.

Offen bleibt in der bisherigen Literatur jedoch, wie die optimale Politik des Regulators bei Existenz von Spillover-Effekten, also externen Effekten, aussehen würde. In einem Partialmodell untersuche ich deshalb, wie die optimale Regulierung bei vollkommenem



Wettbewerb und freiem Marktzutritt aussieht. Damit es überhaupt ein Gleichgewicht gibt, nehme ich analog zu Petrakis, Rasmusen und Roy (1997) in einem Zwei-Perioden-Modell steigende Grenzkosten und Fixkosten an. Es zeigt sich, dass der Regulator nicht nur ein, sondern zwei Instrumente zur Internalisierung der externen Effekte benötigt. Zum einen braucht er eine Outputsubvention, weil sonst wegen der positiven externen Effekte zu wenig produziert wird. Zum anderen muss der Regulator aber auch eine Investitionssubvention oder Markteintrittsprämie zahlen, da sonst zu wenig Firmen in den Markt eintreten. In einer Modellerweiterung nehme ich an, dass die Firmen in jeder Periode Fixkosten haben und nicht nur in der ersten. Es zeigt sich dann, dass sowohl im sozialen Optimum wie auch im unregulierten Fall sowohl Markteintritt als auch Marktaustritt nach der ersten Periode möglich sind. Eine natürliche Tendenz zum Monopol aufgrund von Lerneffekten mit Spillover-Effekten ist also nicht vorhanden. Die optimale Regulierung wird durch die Möglichkeit von Marktein- und -austritt allerdings komplizierter, und zwar insbesondere im Fall von frühem Marktaustritt. Da austretende und verweilende Firmen unterschiedliche externe Effekte verursachen, müssen sie auch unterschiedlich subventioniert werden. Es zeigt sich, dass dies ohne Diskriminierung nur gelingt, wenn keine einheitliche Subvention an beide Firmen, sondern vielmehr die Subvention gemäß einer Outputsubventionsfunktion gezahlt wird. So wählen die Firmen freiwillig unterschiedliche Grenzsabventionssätze.

Analog zum Modell mit vollkommenem Wettbewerb untersuche ich auch ein Modell mit Cournotwettbewerb, analysiere dort das Firmenverhalten und zeige, mit welchen Instrumenten der Regulator die sozial optimale Allokation erreichen kann. Zusätzlich zu den Lerneffekten müssen jetzt noch die normalen strategischen Effekte aufgrund des Cournotverhaltens innerhalb einer Periode sowie ein zusätzlicher intertemporaler strategischer Effekt internalisiert werden. Falls Fixkosten in beiden Perioden anfallen, lässt sich auch für den Cournotfall zeigen, dass Marktein- und -austritt möglich sind. Auch hier kann es also sein, dass Firmen trotz eines Kostennachteils gegenüber den alten Firmen erst in der zweiten Periode eintreten und keine Verluste machen. Auch für zweimalige Fixkosten zeige ich mögliche optimale Regulierungspolitiken auf. Gleichwohl ist die Regulierung hier durch die strategischen Effekte und die unterschiedlichen Firmentypen recht komplex, so dass sie sich als Politikempfehlung nicht unbedingt anbietet.

Die Erkenntnisse aus dem Modell mit vollkommenem Wettbewerb dienen anschließend der Analyse des Windenergiesektors. Dieser ist bislang in der Literatur theoretisch nicht untersucht worden. Die Annahme lautet hier, dass es einen vorgelagerten Sektor mit vollkommenem Wettbewerb gibt, in dem Windenergieanlagen produziert werden. In diesem Sektor existieren auch Lerneffekte mit Spillover. Die Windenergieanlagen werden an den nachgelagerten Sektor, die Windanlagenbetreiber oder Windstromproduzenten, weiterverkauft. Eine Besonderheit dieses Sektors ist, dass die Anlagenbetreiber un-

terschiedliche Standortparameter haben, dass es also bessere und schlechtere Standorte gibt. Diese Anlagenbetreiber konkurrieren nun auf dem Strommarkt mit konventionellen, fossilen Stromproduzenten. Die fossilen Stromproduzenten emittieren bei der Produktion einen Schadstoff. Vereinfachend wird angenommen, dass auch auf dem Strommarkt vollkommene Konkurrenz herrscht und die konventionellen Stromproduzenten konstante Grenzkosten haben. In diesem Modell gibt es nun zwei Arten von Externalitäten: den Schadstoffausstoß der konventionellen Strombetreiber und die positiven externen Effekte der Lern-Spillover der Windenergieanlagenhersteller. Es zeigt sich, dass bei optimaler Regulierung der konventionelle fossile Strom dem Grenzscha-den entsprechend besteuert wird und den Anlagenherstellern Output- und Markteintrittssubventionen gezahlt werden. Insbesondere gilt daher, dass bei der optimalen Regulierung keine Subventionen an die Windstromproduzenten gezahlt werden sollten.

Da aber in Deutschland derzeit tatsächlich der Windstrom subventioniert wird, stellt sich außerdem die Frage, wie die zweitbeste Subvention aussehen müsste, wenn wir davon ausgehen, dass der Regulator nur mittels Windstromsubventionen regulierend eingreifen kann. Es zeigt sich, dass auch diese Subvention gleich dem Grenzscha-den sein muss. Bei Spillover-Effekten kommt noch ein Term hinzu, der die positiven externen Effekte der Spillover innerhalb des vorgelagerten Sektors internalisiert. Weiter gilt, dass bei der zweitbesten Regulierung der Gesamtstromoutput und die Umweltverschmutzung höher als im sozialen Optimum sind.

Nun ist es natürlich interessant, sich zu fragen, ob es die diskutierten Lerneffekte in der Windenergieanlagenproduktion überhaupt gibt. Die empirische Untersuchung von Learning-by-Doing begann bereits mit Wright (1936). Seither haben Forscher eine Vielzahl von Industrien mit unterschiedlichen Methoden auf Lerneffekte hin untersucht und Evidenz für sowohl private Lerneffekte als auch Spillover gefunden. In den letzten Jahren haben Studien wie von Neij (1997), (1999), Neij et al. (2003), Hansen, Jensen und Madsen (2003) oder Junginger, Faaij und Turkenberg (2005) untersucht, ob in der Windenergieanlagenproduktion Lerneffekte eine Rolle spielen. Alle kommen zu dem Ergebnis, dass Lerneffekte vorhanden waren, wenn auch das Ausmaß der ermittelten Lerneffekte voneinander abweicht. Diese Studien leiden allerdings an einer methodischen Schwäche, weil in der Schätzgleichung der kumulierte Output die einzige Einflussgröße auf die Produktionskosten ist. Andere mögliche Einflussgrößen sollten, wenn die Daten dafür vorhanden sind, unbedingt mitgeschätzt werden. Zum anderen ist der kumulierte Output ein nicht-stationärer Prozess, da er zwangsläufig anwächst beziehungsweise zumindest nicht abnehmen kann. Wird diese Tatsache nicht berücksichtigt, sind die Konfidenzintervalle der Schätzungen nicht zu gebrauchen.

Mit Hilfe eines neuen, aus verschiedenen Datenquellen zusammengestellten Datensatzes

untersuche ich, ob Lerneffektes beim Bau von Windenergieanlagen auch noch nachgewiesen werden können, wenn die oben angeführten Schwächen korrigiert werden. Weitere Einflussgrößen habe ich in den Schätzungen auch berücksichtigt. Dadurch lässt sich zeigen, dass die bisherigen Resultate in der Literatur eine gravierende Schwäche aufweisen, weil sie die Nicht-Stationarität des kumulierten Outputs vernachlässigt haben. Ich werde diese hingegen berücksichtigen und alternativ mit Hilfe einer Schätzung in ersten Differenzen und mit Hilfe eines „group mean estimators“ (Pesaran und Smith 1995) zeigen, dass der kumulierte Output sich nicht zur Erklärung der sinkenden Preise eignet. Wenn Lerneffekte sich tatsächlich durch kumulierten Output messen lassen könnten, so gilt für den Bau von Windenergieanlagen, dass es weder signifikante private noch öffentliche Lerneffekte gibt. Eine Subventionierung des Outputs, die mit öffentlichen Lerneffekten begründet wird, muss daher abgelehnt werden.

Diese Arbeit gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 stelle ich die bisherige theoretische Literatur zu Lerneffekten mit Spillover vor. Im theoretischen Teil der Arbeit entwickle ich in Kapitel 3 das Modell mit Learning-by-Doing, Spillover-Effekten, freiem Marktzutritt und vollkommenem Wettbewerb. Ich präsentiere die optimale Regulierung, zeige, dass Marktein- und -austritt denkbar sind und untersuche die komparativ-statischen Effekte von Subventionsänderungen. Analog gehe ich in Kapitel 4 vor; die einzige, entscheidende, Änderung in meinen Annahmen ist, dass hier von Cournotwettbewerb ausgegangen wird. Diese Erkenntnisse verwende ich nun, um in Kapitel 5 nach einer kurzen Einführung in Gesetzgebung und wirtschaftlichem Hintergrund des Windenergiesektors die optimale und zweitbeste Regulierung sowie einige komparativ-statische Effekte vorzustellen.

In Kapitel 6 führe ich in die bisherigen empirischen Arbeiten zu Lerneffekten ein. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei den Lerneffekten im Energiesektor. Im folgenden Kapitel 7 erläutere ich zunächst, wie der Datensatz gewonnen wurde, was für Daten zur Verfügung standen und was die Schwächen des Datensatzes sind. Es folgt eine Diskussion der methodischen Vorgehensweise und eine Präsentation der Schätzergebnisse. In Kapitel 8 fasse ich meine wichtigsten Ergebnisse noch einmal zusammen, diskutiere die wirtschaftspolitische Relevanz und benenne die verbleibenden offenen Fragen.

# Kapitel 2

## Einführung in die theoretische Literatur

Wenn von Lerneffekten die Rede ist, stellt sich grundlegend die Frage, wer eigentlich bei welcher Tätigkeit was lernt, wie er es lernt, was das Lernen bewirkt und wer letztlich von dem Gelernten profitiert. Üblicherweise wird zwischen individuellem und organisatorischem Learning-by-Doing unterschieden, wobei die Organisationen, die hier interessieren, Unternehmen sind. Learning-by-Doing in Zusammenhang mit Unternehmen wurde von Arrow (1962) in die theoretische Literatur eingeführt. Natürlich lernen auch innerhalb einer Organisation Individuen, aber eben nicht für sich, sondern als Organisation. Wie einzelne Individuen aufgrund von Erfahrung lernen, ist in den letzten Jahren Gegenstand der experimentellen ökonomischen Forschung geworden. So untersuchen beispielsweise Merlo und Schlotter (2003) in einem Experiment, ob der tatsächlich Arbeitende oder der Beobachter einer Arbeit besser lernt. Sie kommen zu dem überraschenden Ergebnis, dass man durch Beobachtung besser als durch eigene Erfahrung lernt. Ein andere Arbeit aus diesem Arbeitsfeld kommt von Offerman und Sonnemans (1998), die sich fragen, in wie weit Individuen aufgrund eigener Erfahrungen oder Entscheidungen und Erfahrungen anderer Individuen lernen.

Gleichwohl ist der Fokus meiner Arbeit nicht das individuelle Lernen, sondern das Lernen innerhalb einer Organisation. Hierbei stellt sich die Frage, was die Organisation durch Erfahrung lernt. Typischerweise - und auch in dieser Arbeit - wird angenommen, dass die Unternehmen lernen, ihre Arbeit und ihren Maschineneinsatz besser zu organisieren, wie sie ihr Material besser einsetzen können und wie eine bestimmte Aufgabe besser erledigt werden kann. Andere Ansätze sind aber auch denkbar wie zum Beispiel bei Creane (1995). Er geht davon aus, dass Firmen über ihre eigenen internen Abläufe, ihre Produktion und deren Kosten nicht vollständig im Bilde sind und erst mit zunehmender Erfahrung ihre eigenen wahren Kosten kennenlernen. Die Informationsgewinnung wird

also endogenisiert. Er geht von einem 2-Perioden-Duopol-Modell aus, in dem die beiden Konkurrenten von sich und der Konkurrenz nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kostenfunktionen kennen und am Anfang festlegen können, ob sie mit der Konkurrenz nach der ersten Periode ihre Informationen austauschen wollen. Es zeigt sich, dass der Informationsaustausch die Produktionsmenge bei Cournotwettbewerb erhöht und dass die Firmen daher unter Umständen die Kosteninformation der Konkurrenz wegen potentieller negativer Preiseffekte eines höheren Outputs gar nicht kennenlernen wollen.

Wenn aber davon ausgegangen wird, dass Lerneffekte dazu führen, dass Unternehmen ihre Arbeit, Maschinen- und Materialeinsatz besser organisieren, stellt sich für den Ökonomen die Frage, wie dieser komplexe Vorgang am besten modelliert werden kann, wenn man nicht wie Freeman (1999) der Meinung ist, dass Learning-by-Doing in der Regel zu komplex sei, als dass dies über die Zeit über verschiedene Firmen hinweg auf die gleiche deterministische Formel gebracht werden könne und daher einzelne Fallstudien notwendig und sinnvoll seien. In der theoretischen Literatur finden sich im Wesentlichen zwei Varianten, wie Learning-by-Doing in einem Modell erfasst werden kann. Sehr häufig wird der kumulierte Output vorangegangener Perioden als Maß für den Wissensbestand in einem Unternehmen herangezogen. In einigen Modellen werden aber auch die vergangenen Bruttoinvestitionen in Kapital wie erstmals bei Arrow (1962) als Maß des Wissensbestands verwendet. Weiter wird üblicherweise angenommen, dass ein steigender Wissensbestand (wie auch immer er gemessen wird) zu Kostensenkungen beziehungsweise Produktivitätssteigerung führt. Meines Wissens gibt es hingegen keine theoretischen Modelle, in denen die ebenfalls plausible Annahme getroffen wird, dass ein steigender Wissensbestand nicht zu einem billigeren, sondern zu einem besseren Produkt führt.<sup>1</sup> Bei Laffont und Tirole (1988) ergeben sich die Lerneffekte nicht via kumuliertem Output sondern kumulierter Anstrengung. Sie untersuchen ein natürliches Monopol, das so reguliert wird, dass der Regulator die Monopolrechte in jeder Periode neu vergeben kann. Die Frage ist, ob der Gewinner der ersten Runde bei der Vergabe in der zweiten Runde Vorteile hat beziehungsweise vom Regulator bevorzugt werden sollte. Laffont und Tirole nehmen an, dass die Anstrengung in der ersten Periode nicht nur Einfluss auf den Gewinn in der ersten Periode hat, sondern durch Lernen auch die Kosten in der zweiten Periode senkt und zwar sowohl die eigenen als auch die der anderen potentiellen Konkurrenten. Die Autoren können zeigen, dass der Regulator mit um so größerer Wahrscheinlichkeit den Gewinner der ersten Runde auch in der zweiten Runde wählen sollte, je höher durch sein Lernen auch die potentiellen Konkurrenten profitieren. Die Idee ist, dass der Regulator den Gewinner der ersten Periode dann für seine Anstrengung belohnen sollte, wenn der private Vorteil gering ausfällt, weil auch die Konkurrenz profitiert. Schließlich nehmen Goulder

---

<sup>1</sup>In empirischen Studien finden Qualitätssteigerungen hingegen durchaus auch Beachtung. So findet beispielsweise Moul (2001) empirische Belege, dass qualitative Lerneffekte beim Übergang vom Stummzum Tonfilm eine Rolle gespielt haben.

und Mathai (2000) an, dass sinkende Vermeidungskosten bei  $CO_2$ -Emissionen durch die kumulierte Vermeidung gemessen werden kann. Gelernt wird hier also in vermiedenen Emissionseinheiten.

Schließlich stellt sich die Frage, wem das Lernen eigentlich nützt. Das könnte zum einen der einzelne Arbeiter sein, der aufgrund von Lernen eine höhere Produktivität hat und damit einen höheren Lohn verhandeln kann. Oder es könnte zum anderen das Unternehmen sein, dass in Folge niedrigerer Kosten höhere Gewinne erzielen kann. Häufig wird aber auch angenommen, dass außer dem lernenden Unternehmen auch noch die anderen Unternehmen im selben Sektor oder gar Unternehmen in anderen Sektoren vom Lernen, also dem höheren Wissensbestand des einen Unternehmens profitieren, weil Wissen, sei es durch wechselnde Mitarbeiter oder durch Austausch unter Ingenieuren, in andere Unternehmen diffundiert. In diesem Fall spreche ich von „Spillover“, „Spillover-Effekten“ oder öffentlichem Lernen.

Wenn in Modellen ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Lernvariablen (zum Beispiel kumulierter vergangener Output) und den Kosten oder der Produktivität des Unternehmens besteht, wird dies als „Lernkurve“ bezeichnet. Manchmal wird auch explizit zwischen „Lernkurve“ und „Erfahrungskurve“ unterschieden. Wenn bei lediglich manueller Arbeit gelernt wird, spricht man von einer Lernkurve, wenn jedoch das Lernen die gesamte Organisation erfasst, also auch besseres Wissen über Materialeinsatz und Arbeitsabläufe, spricht man von einer Erfahrungskurve. Ich werde diese Begriffe hier allerdings synonym verwenden.

Modelle, in denen technischer Fortschritt nicht nur durch Lerneffekte, sondern beispielsweise auch durch neue Erfindungen erklärt wird, untersuche ich hier nicht weiter. Klenow (1998) oder Young (1993) kombinieren beide Ansätze und nehmen an, dass neue Technologien zunächst schlechter als alte sind, aber durch Lernen die alten überholen können.

Für Modelle mit Lerneffekten wurden in der bisherigen Literatur nun eine Reihe von Fragen aufgeworfen und auch beantwortet. Im folgenden Abschnitt 2.1 stelle ich Modelle mit Lerneffekten in einer geschlossenen Volkswirtschaft vor. Ich untergliedere diesen Abschnitt in Modelle mit Lerneffekten bei Monopol, Oligopol und vollkommenem Wettbewerb sowie Modellen, die die Evolution von Märkten, also Marktein- und -austritt, mit Hilfe von Lerneffekten erklären. In der Außenhandelsliteratur beschäftigen sich die Autoren meist mit der Frage, in wie weit Lerneffekte Protektionismus rechtfertigen, ob ein Staat also durch den Schutz einer Industrie, in der gelernt wird, gewinnen kann. Diese Literatur stelle ich in Abschnitt 2.2 vor.

## 2.1 Lerneffekte in einer geschlossenen Volkswirtschaft

Da Lerneffekte das Verhalten der Firmen beeinflussen, ist es naheliegend, zu untersuchen, wie lernende Firmen sich in den verschiedenen Marktformen Monopol, Oligopol (insbesondere Duopol) und im Polypol verhalten. Es ist dann interessant herauszufinden, ob bei diesem Verhalten auf dem Markt die sozial optimale Allokation ohne Staatseingriff erreicht wird. Wenn auf dem unregulierten Markt das soziale Optimum verfehlt wird, stellt sich die Frage, wie der Regulator gegebenenfalls das soziale Optimum erreichen kann. Eine andere wichtige Frage ist, ob Lerneffekte zu einer Veränderung der Marktform führen können, insbesondere ob möglicherweise eine Tendenz zur Marktkonzentration (bis hin zum Monopol) besteht. Ich möchte in diesem Kapitel in dieser Reihenfolge einen Überblick geben, welche Antworten auf diese Fragen in der bisherigen Literatur gegeben wurden.

### 2.1.1 Lerneffekte im Monopolfall

Fudenberg und Tirole (1983) untersuchen ein Modell, in dem sie vollkommene Information, stetige Zeit und konstante laufende Grenzkosten (also die Grenzkosten zu einem Zeitpunkt) annehmen. Sie zeigen, dass ein Monopolist zu allen Zeiten weniger als der soziale Planer produziert. Wie schon Spence (1981) zeigen Fudenberg und Tirole, dass es auch sozial optimal ist, wenn nur eine Firma aktiv ist. Diese Firma würde aufgrund der Lerneffekte in der ersten Periode (beziehungsweise in allen Perioden bis auf die letzte) den Preis kleiner den Grenzkosten setzen und insgesamt Verluste machen. Dasgupta und Stiglitz folgern (1988), dass die per se - Doktrin der Kartellpolitik, die besagt, dass ab einem gewissen Marktanteil einer Firma die Wohlfahrt sinkt, nicht gestützt werden kann, da es bei Existenz von Lerneffekten durchaus der Fall sein kann, dass die Wohlfahrt mit einer im Markt aktiven Firma höher als mit mehreren Firmen ist. Außerdem zeigen Dasgupta und Stiglitz (1988), dass ein Monopolist, der einer Nullgewinnbedingung unterliegt, mehr produziert (und lernt) als der normale Monopolist, aber weniger produziert (und lernt) als eine sozial optimal produzierende Firma. Während im sozialen Optimum die Monopolfirma in allen Perioden bis auf die letzte Verluste macht und auch insgesamt einen Verlust erwirtschaftet, wird ein privater Monopolist insgesamt einen Gewinn erzielen. Alvarez und Cerda (2001) zeigen nun, dass auch ein privater Monopolist in den Anfangsperioden Verluste machen kann. Ob dies der Fall ist, hängt allerdings nur von der Lernintensität ab, im Allgemeinen jedoch nicht von der Lerndauer.

Eine mögliche Erweiterung der obigen Modelle besteht darin, anzunehmen, dass Unsicherheit über die wahren Kosten herrscht. Alvarez und Amman (1999) nehmen an, dass der Monopolist zum einen nur die Verteilungsfunktion des Lernprozess kennt und zum anderen Lagerhaltung (mit einer quadratischen Kostenfunktion) betreiben kann. Für spe-

zielle Funktionen können sie zeigen, dass die Unsicherheit über den Lernprozess dazu führen kann, dass der Monopolist sich besser stellen könnte, wenn er den Lernprozess komplett ignorieren würde. Außerdem zeigen die Autoren, dass die Lagerhaltung über die Zeit ansteigen wird. Eine andere Herangehensweise besteht darin, anzunehmen, dass zwar der Monopolist seine Kosten- und Lernfunktionen kennt, nicht aber der Regulator. Es ist dann interessant zu wissen, wie der soziale Planer unter dieser Nebenbedingung am besten regulieren sollte. Lewis und Yildirim (2002) gehen dieser Frage nach und nehmen an, dass die Kosten des Monopolisten aus einem nicht-stochastischen und einem stochastischen Teil bestehen. Der soziale Planer kann nur den nicht-stochastischen Teil der Kosten beobachten. Es gibt Lerneffekte, die aber ebenfalls stochastisch sind. Es wird weiter angenommen, dass der Regulator sich nicht langfristig auf eine Politik festlegen kann. Ziel des Regulators, dem als Regulierungsinstrument ein Vertrag mit Prämienzahlung und Mengenfestlegung zur Verfügung steht, ist daher, einen Vertrag zu finden, der eine Prämie  $P$  für eine Produktmenge  $X$  festlegt und der die Summe aus heutigem und zukünftigen Konsumentenutzen minus  $P$  maximiert. Die Nebenbedingung besteht darin, dass der Monopolist bei Annahme des Vertrags mindestens so viel Gewinn macht wie bei Ablehnung des Vertrags. Es zeigt sich, dass bei optimaler Regulierung sich beide Seiten besser stellen als im Fall ohne Lernen. Der Regulator zahlt eine relativ großzügige Prämie, damit relativ viel produziert und gelernt wird. Dadurch sinken die Kosten und damit profitieren auch die Konsumenten. Die Verteilung der Gewinne kann allerdings sehr unterschiedlich sein und hängt von den unbeobachtbaren Kosten des Monopolisten ab. Für den Fall, dass alle Kosten des Monopolisten private Information sind, kann Osmundsen (2002) zeigen, dass der Monopolist gegenläufige Anreize hat. Einerseits würde er gerne möglichst hohe Kosten angeben um einen hohen Transfer einzustreichen. Andererseits produziert und lernt er dann auch weniger und reduziert damit die Effizienz in der zweiten Periode. Der optimale Vertrag besteht hier aus einem zweistufigen Tarif mit Stückpreisen und einer festen Transferzahlung.

### 2.1.2 Lerneffekte im Oligopolfall

Im Oligopol wird die Unterscheidung zwischen privatem und öffentlichem Lernen relevant. Es stellt sich insbesondere die Frage, ob der kumulierte vergangene Output einer Firma nicht nur die eigenen Kosten, sondern auch die Kosten der Konkurrenz senkt. Ebenso spielen nun strategische Überlegungen der Firmen eine Rolle. Spence (1981) entwickelte als erster ein Modell, das diese Fragen behandelt. Er geht von konstanten laufenden Grenzkosten aus, privatem Lernen und einem endlichen Zeitraum. Eine eher ungewöhnliche Annahme besteht darin, dass Firmen nur zu exogen vorgegebenen Zeiten einzeln in den Markt eintreten können und dieser Prozess solange andauert, bis weitere Firmen keinen



Gewinn mehr machen würden und daher nicht mehr eintreten. Die Anzahl der Firmen ist also endogen, nicht aber deren Eintrittszeitpunkt. Durch die unterschiedlichen Eintrittszeitpunkte und die dadurch unterschiedlichen Lerneffekte sind die Firmen jeweils ex post unterschiedlich bezüglich ihrer Kostenstruktur. Spence charakterisiert das Verhalten der Firmen bei teilspielperfekten und nicht-teilspielperfekten Gleichgewichten und zeigt mit Beispielen, dass sich die Ergebnisse nur geringfügig unterscheiden. Er zeigt ferner, dass sowohl bei sehr starkem als auch sehr schwachem Lernen tendenziell mehr Firmen in den Markt eintreten als bei mittleren Lernniveaus. Schließlich demonstriert Spence in einer Modellerweiterung, dass bei Existenz von Spillover-Effekten die Firmen nicht mehr sozial optimal produzieren, die Wohlfahrt mit steigender Spilloverrate aber dennoch ansteigen kann, weil die Kosten der Industrie sinken und der Wettbewerb steigt. Diese Beobachtung wird von Ghemawat und Spence (1985) noch genauer untersucht. Spillover beim Lernen lösen zwei Effekte aus: Zum einen einen negativen Anreizeffekt für die individuelle Firma, weil ihr Lernen nicht mehr (beziehungsweise nur noch zum Teil) privat ist und sie daher weniger lernen und produzieren will; zum anderen gibt es einen Effizienzeffekt, der darin besteht, dass die Kosten der Firmen durch die Spillover stärker sinken als bei lediglich privatem Lernen. Die Autoren zeigen, dass tendenziell der Effizienzeffekt überwiegt, also höhere Spillover wohlfahrtsverbessernd sind. Im Gegensatz dazu überwiegt bei Ausgaben für Forschung und Entwicklung häufig der negative Anreizeffekt. Der Grund für den Unterschied besteht darin, dass hier Output und Lernen gekoppelt sind und der Output in jeder Periode auch Erlöse bringt. Es wäre also unsinnig, überhaupt nichts mehr zu produzieren, während es unter Umständen sinnvoll sein kann, die Forschung einzustellen, da Produktion und Forschung nicht gekoppelt sind.

Fudenberg und Tirole (1983) charakterisieren unter der Annahme eines Markts mit Cournotwettbewerb, privaten Lerneffekten und konstanten laufenden Grenzkosten ein teilspielperfektes und ein nicht-teilspielperfektes Gleichgewicht. Sie zeigen insbesondere, dass der Regulator mit einer budgetneutralen Regulierung mittels einer Steuer auf den Output der ersten Periode und einer Subvention auf den Output der zweiten Periode die Wohlfahrt verbessern kann. Da die Lerneffekte privat sind, ist eine Subventionierung aufgrund des Lernens nicht notwendig. Die Regulierung ist also eine zweitbeste Lösung zur Internalisierung der Cournot-Marktmacht.

Wenn wenige Firmen im Markt sind, besteht für die Firmen neben nicht-kooperativem Verhalten auch eine realistische Möglichkeit mit den anderen zu kooperieren und ein Kartell zu bilden. Mookherjee und Ray (1991) zeigen allerdings, dass kollusives Verhalten durch private Lerneffekte weder gefördert noch beeinträchtigt wird, wenn private Lerneffekte mit dem Fall ohne Lerneffekte verglichen werden. Lerneffekte können also nicht zur Erklärung von Kartellbildung herangezogen werden.

Schließlich stellt sich die Frage, ob Unsicherheit bezüglich der zukünftigen Absatzmöglichkeiten die Ergebnisse verändert. Dies untersucht Habermeier (1992), der in seinem Modell annimmt, dass zwei Oligopolisten in einem Markt konkurrieren, wobei pro Periode immer jeweils nur einer der beiden sein Gut verkauft. Welcher Oligopolist das ist, hängt vom jeweils geforderten Preis und vom Zufall ab. Je niedriger eine Firma den Preis setzt, um so höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie etwas verkauft. Ab einem gewissen Preisunterschied ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Firma, die den niedrigeren Preis setzt, gewinnt gleich eins. Welchen Preis eine Firma setzt, hängt natürlich von ihren Kosten und damit von den vergangenen Verkäufen und den dadurch entstandenen privaten Lerneffekten ab. Es zeigt sich, dass langfristig eine Firma aus dem Markt ausscheiden kann, dass aber auch eine Firma mit höheren Kosten aufholen und am Ende dominieren kann. Wichtig sind dabei die ersten Verkäufe, da diese wesentlich das endgültige Ergebnis beeinflussen.

### 2.1.3 Lerneffekte und vollkommener Wettbewerb

In der bisher angeführten Literatur wurde durchweg angenommen, dass die Firmen in der laufenden Periode konstante Grenzkosten haben. Fudenberg und Tirole (1983) haben gezeigt, dass in diesem Fall kein Gleichgewicht für vollkommenen Wettbewerb existiert. Wenn aber angenommen wird, dass die Grenzkosten steigend sind und die Firmen Fixkosten haben, wie Petrakis, Rasmusen und Roy (1997) dies tun, gibt es auch ein Gleichgewicht bei vollkommenem Wettbewerb. Die Autoren nehmen an, dass Lernen nur privat ist und durch Lernen sowohl die variablen als auch die Fixkosten gesenkt werden können und demonstrieren, dass dann Subventionen für die Industrie nicht notwendig sind. Jede Firma internalisiert ihre Lerneffekte und wird daher in der ersten Periode etwas mehr als ohne Lernen produzieren. Dies bedeutet, dass die Grenzkosten in dieser Periode über dem Preis liegen.<sup>2</sup> Alle Firmen machen daher in der ersten Periode Verlust. In der zweiten Periode können jedoch alle Firmen einen Gewinn machen, so dass sie die intertemporale Nullgewinnbedingung erfüllen. Damit Firmen überhaupt ihren abdiskontierten Gewinn berechnen können, müssen sie jedoch nicht nur die Kosten der Konkurrenz (hier identisch), sondern auch die Nachfrage in der Zukunft kennen. Diese Annahme ändern Majd und Pindyck (1989) und führen Unsicherheit über die zukünftige Nachfrage- und damit Preisentwicklung ein. Die Autoren fragen sich, wie ein Unternehmen im vollkommenem Wettbewerb mit unsicheren zukünftigen Preisen umgehen soll. Sie nehmen an, dass die Firma eine Kapazitätsschranke hat und mit konstanten Grenzkosten produziert. Es gibt

---

<sup>2</sup>Dies kann ein Problem für die Wettbewerbsbehörden sein. Dick (1991) zeigt, dass japanische Firmen in den 80-ern in den USA tatsächlich Halbleiter unter den laufenden Grenzkosten verkauft haben. In einer dynamischen Perspektive, in der Lernen die Kosten senkt, war das aber rational, und zwar völlig ohne strategische Effekte. Die Wettbewerbsbehörde sollte also nicht nur auf die statischen Grenzkosten schauen.

keine Fixkosten, rein privates Lernen und eine untere Schranke, die den Rückgang der Grenzkosten aufgrund von Lernen begrenzt. Die Firma kann die Preise nicht beeinflussen und kennt nur die Verteilungsfunktion der zukünftigen Preisentwicklung. Aufgrund der Unsicherheit über die Preisentwicklung besteht auch Unsicherheit über die in der Zukunft absetzbaren Mengen und damit auch über den Wert des Lernens. Da Lernen eine irreversible Investition in Kostensenkung ist, steigen die Opportunitätskosten dieser Investition mit steigender Unsicherheit. Je höher die Unsicherheit ist, desto geringer ist der Wert des Lernens und desto höher muss der Mindestpreis sein, bei dem eine Firma überhaupt noch produziert. Mit steigender Unsicherheit nähert sich dieser Mindestpreis den laufenden konstanten Grenzkosten an. Entsprechend wird dann auch die Outputentscheidung nur noch nach kurzfristigen Kriterien getroffen.

#### **2.1.4 Lerneffekte und Evolution von Märkten**

In den vorherigen Abschnitten habe ich einen Überblick über die bisherigen Erkenntnisse gegeben, wie Lerneffekte das Firmenverhalten beeinflussen, wenn die Marktform gegeben ist. Von großem Interesse ist allerdings auch, ob die Annahme von Lerneffekten auch dazu beitragen kann, die Evolution von Märkten zu erklären, also ob und wie sich die Firmenanzahl ändern kann, ob Lerneffekte Firmeneintritte in späteren Perioden begünstigen oder im Gegenteil zu einem Rückgang der Firmenanzahl durch Marktaustritte führen können.<sup>3</sup> In der Managementliteratur, wie bei Henderson (1972), wird in der Regel die Vermutung geäußert, dass Lerneffekte zu einem Rückgang der Firmenzahl führen und dass Firmen, die bei sich Lerneffekte beobachten, eine aktive Markteroberungsstrategie zur Gewinnung von Marktanteilen und weiter steigenden Lerneffekten verfolgen sollten. Eine derartige Strategie könnte jedoch aus Wohlfahrtsgesichtspunkten langfristig schädlich sein, da eine Firma eine marktbeherrschende Stellung erhalten und großen Einfluss auf den Marktpreis haben könnte. Cabral und Riordan untersuchen in ihren Arbeiten von 1994 und 1997 die Zusammenhänge zwischen Lerneffekten, Verdrängungsstrategien und Wohlfahrtseffekten. In ihrem Aufsatz von 1994 nehmen sie an, dass zwei Firmen im Bertrand-Preiswettbewerb mit differenzierten Gütern stehen. Die laufenden Grenzkosten sind konstant, können aber durch Lernen bis zu einer unteren Kostengrenze sinken. In jeder Periode kaufen die Konsumenten bei einem der beiden Firmen ein, wobei die Konsumentenpräferenzen unabhängig und identisch verteilt sind. Es zeigt sich, dass Firmen, die einmal einen Vorsprung haben, diesen bei geringer Diskontierung halten und vergrößern können. Eine interessante Erkenntnis besteht darin, dass auch dann, wenn eine Firma ausgelernt hat, diese noch

---

<sup>3</sup>Wenn der Kostenverlauf über die Zeit nicht endogen ist, wie das bei Lerneffekten ja der Fall ist, können Marktaustritte auch mit Informationsasymmetrien - zum Beispiel über die Kosten der Konkurrenz - zur Erklärung herangezogen werden. Fudenberg und Tirole (1986) zeigen beispielsweise, dass derartige Informationsasymmetrien zu Marktaustritt, aber auch zu späterem Wiedereintritt führen können.

Anreize hat, ihre Preise aggressiv zu setzen, um den Lernprozess des Konkurrenten zu verlangsamen. Die Autoren zeigen, dass die Möglichkeit besteht, dass die Gewinne der Firmen geringer sind als im Fall ohne Lernen, das heißt, dass Lernen zwar sozial wünschenswert ist, für die Firmen privat aber nachteilig. All dies gilt, falls die Firmen keine Fixkosten haben. Wenn jedoch in jeder Periode Fixkosten anfallen, gibt es für die führende Firma einen Anreiz für Verdrängungsstrategien, die auch zu Marktaustritt der anderen Firma führen kann.

Cabral und Riordan (1997) untersuchen nun, inwieweit solche Verdrängungsstrategien für den Konsumenten schädlich sein können. Als Verdrängungsstrategie gilt eine Strategie dann, wenn eine andere Strategie die Überlebenschance des Konkurrenten erhöhen würde und gleichzeitig diese Strategie profitabler wäre, falls nicht die Überlebenschance der anderen Firma durch die Verdrängungsstrategie negativ beeinflusst werden könnte. Cabral und Riordan gehen von einem Zwei-Perioden-Modell mit Cournotwettbewerb aus und treffen die Annahme, dass eine Firma, sagen wir Firma *A*, auf jeden Fall in beiden Perioden produziert (weil sie beispielsweise alle Fixkosten zu Beginn gezahlt hat), während die andere Firma *B* nach der ersten Periode möglicherweise aussteigt, da sie in der zweiten noch Fixkosten zu tragen hätte. Markteintritt ist ausgeschlossen. Die Höhe der Fixkosten in der zweiten Periode ist zufällig verteilt, der konkrete Wert wird erst nach der ersten Periode allgemein bekannt. Es zeigt sich nun, dass der Verdrängungswettbewerb sowohl wohlfahrtssteigernd (Grund ist der intensivere Wettbewerb in Periode 1) als auch wohlfahrtsmindernd (Monopol in der 2. Periode überwiegt die positiven Effekte der 1. Periode) sein kann, wobei die wohlfahrtsmindernde Variante wahrscheinlicher ist. Ein weiteres Ergebnis (das insbesondere für Kartellbehörden interessant ist) besteht darin, dass Preise, die sogar unter den variablen Kosten liegen, weder eine notwendige noch hinreichende Bedingung für Verdrängungswettbewerb sind.

Während Cabral und Riordan von lediglich privaten Lerneffekten ausgehen, lassen Dasgupta und Stiglitz (1988) auch Spillover-Effekte zu, indem sie einen Parameter  $\alpha$  mit  $0 \leq \alpha \leq 1$  einführen, dessen Wert den Grad der Spillover angibt. Ist  $\alpha = 0$ , gibt es keine Spillover-Effekte, ist  $\alpha = 1$  sind die Spillover vollständig, das heißt, es gibt keinen Unterschied zwischen privatem und öffentlichem Lernen. Außerdem nehmen die Autoren an, dass der Lernprozess irgendwann zu Ende ist, die Kosten also nicht unbegrenzt sinken. Dasgupta und Stiglitz' zentraler Kritikpunkt an der vorhergehenden Literatur ist die Annahme identischer Firmen. Sie nehmen deshalb abweichend an, dass eine Firma bereits einen Kostenvorteil besitzt. In einem Cournot-Duopol mit linearer Nachfrage werden nun bei niedrigen Diskontraten beide Firmen im Markt bleiben, da die Firma mit den höheren Kosten die zukünftigen Oligopolgewinne, wenn beide Firmen ausgelernt haben, antizipiert. Bei einer hohen Diskontrate hingegen kann sich ein Monopol entwickeln, da aufgrund der wegen des Lernens zunehmenden Kostendifferenz zwischen den Firmen die

schlechtere Firma aussteigt, da die zukünftigen, aber stark abdiskontierten Gewinne die hohen Anfangsverluste nicht ausgleichen könnten.

Sie untersuchen im Weiteren Bertrand-Wettbewerb mit homogenen Gütern und treffen die wichtige Annahmen, dass bei gleichen Kosten immer eine Firma den ganzen Markt bekommt und nicht hälftig geteilt wird. Bei exogener Marktstruktur mit zwei Firmen zeigt sich, dass eine Firma in beiden Perioden alles produziert, aber keinen Gewinn macht. Der Grund ist, dass die (mögliche) Konkurrenz in der ersten Periode den Preis so stark senkt, dass der Preis gleich den Grenzkosten der ersten Periode und dem Lernnutzen in der zweiten Periode gesetzt wird. Wenn nun angenommen wird, dass eine Firma bereits im Markt ist und eine andere Firma eintreten will, dann gibt es, sobald auch nur minimale Eintrittskosten existieren, ein teilspielperfektes Gleichgewicht, in dem keine Firma in den Markt eintritt und die alte Firma unbeschränkte Monopolgewinne erwirtschaftet.

Ebenfalls von asymmetrischen Firmen in einem Duopol geht Agliardi (1992) aus; in ihrem Modell unterscheiden sich die Firmen dadurch, dass nur eine Firma lernt. Sie zeigt, dass die lernende Firma bei starken Lerneffekten in der zweiten Periode eine Monopolstellung erlangen kann. In einer Erweiterung nimmt sie an, dass die Lerneffekte entweder stark oder schwach sein können und bei starken Lerneffekten die lernende Firma Monopolist ist. Die Information über das Ausmaß der Lerneffekte ist jedoch asymmetrisch verteilt, nur die lernende Firma kennt die wahren Kosten. Es zeigt sich nun, dass die lernende Firma, um glaubhaft hohe Lerneffekte zu signalisieren, wenn sie tatsächlich solche hat, in der ersten Periode so viel produzieren muss, dass die Produktion bei niedrigen Lerneffekten nicht mehr profitabel wäre. Die asymmetrische Information führt hier also zu höherem Output.

Jin, Perote-Peña und Troege (2004) untersuchen, unter welchen Bedingungen es zu Marktaustritt kommt, wenn die Firmen nur begrenzt rational sind. In ihrem Modell stehen Firmen mit differenzierten Gütern im Bertrand-Wettbewerb. Markteintritt ist ausgeschlossen, die vor der ersten Periode exogen vorgegebene Firmenanzahl kann aber im Laufe der Zeit abnehmen. Die Firmen haben konstante laufende Grenzkosten, keine Fixkosten und Lernen ist sowohl privat als auch öffentlich, wobei die Kosten mit kumuliertem Output linear bis zu einer Untergrenze abnehmen. Die begrenzte Rationalität der Firmen zeigt sich darin, dass sie nicht in der Lage sind, das teilspielperfekte Gleichgewicht über mehrere Perioden zu berechnen, sondern stattdessen die Firmen völlig myopisch sind und nur für die jeweilige Periode optimieren. Es gibt also kein strategisches Lernen. Für diese Annahmen können nun Bedingungen angegeben werden, wann es zu Marktaustritt kommt. Unter anderem sind Marktaustritte um so wahrscheinlicher, je geringer die Gesamtnachfrage ist und je schwächer die Spillover sind. Es zeigt sich, dass Marktaustritte kurzfristig positive Wohlfahrtswirkungen haben können, da nur die kostengünstigsten Firmen im Markt

verbleiben, sich dadurch allerdings langfristig der Wettbewerb reduziert.

In den bisher angesprochenen Modellen sind die Autoren durchweg von einer exogen vorgegebenen Firmenzahl in der ersten Periode ausgegangen (meist einem Duopol) und haben dann untersucht, unter welchen Bedingungen sich diese Firmenanzahl verändern kann. Petrakis, Rasmusen und Roy (1997) endogenisieren die Firmenanzahl hingegen konsequent inklusive der ersten Periode. Sie zeigen, dass selbst bei vollkommenem Wettbewerb und vollständiger Information sich die Firmenanzahl durch Lernen verändern kann. Bei einem konvexen Kostenverlauf und rein privatem Lernen sind Marktaustritten in der zweiten Periode möglich. Es gibt also Firmen, die in der ersten Periode produzieren und schon zu diesem Zeitpunkt wissen, dass sie in der zweiten Periode austreten. Wenn Lernen nicht nur die variablen Kosten, sondern auch die Fixkosten beeinflusst, kann es auch zu spätem Markteintritt in der zweiten Periode kommen. Die entscheidende Modellaussage lautet, dass privates Lernen zu einer Veränderung der Firmenanzahl im Zeitablauf führen kann, dass aber, da alle Firmen dies so antizipieren und internalisieren, kein Grund für einen staatlichen Eingriff gegeben ist.

Intuitiv leuchtet ein, dass es in einem Markt nicht gleichzeitig Ein- und Austritt von Firmen geben kann. Denn warum sollte eine Firma, die noch nicht gelernt hat, in den Markt eintreten, wenn gleichzeitig eine alte Firma, die schon gelernt hat, also niedrigere Kosten hat, keine Gewinnchancen mehr sieht und aus dem Markt austritt? Bei Jovanovic und Lach (1989) kann aber nun genau das passieren. Dies liegt an der speziellen Modellstruktur: Die Firmen, die in den Markt eintreten wollen, kaufen die derzeit beste Maschine oder Technologie (Fixkosten) und produzieren dann mit dieser Maschine zu konstanten Grenzkosten, wobei es eine Kapazitätsgrenze (normalisiert auf 1) gibt, die bestimmt, wieviel produziert werden kann. Jeder Kauf einer Technologie/Maschine führt nun dazu, dass der Preis jeder zukünftigen Maschine sinkt - und damit die Fixkosten für die Käufer - und dass mit jeder zukünftigen Maschine zu geringeren variablen Kosten produziert werden kann. Durch den Kauf einer Maschine wird also eine positive Externalität für alle zukünftigen Käufer verursacht. Die variablen Kosten der Produktion mit den alten Maschinen verändern sich jedoch nicht. Genau genommen wird also nicht bei der Güterproduktion mit der Maschine, sondern in der Produktion der Maschine der vorgelagerten Industrie gelernt. Darin besteht die wesentlich andere Annahme im Vergleich zur sonstigen Literatur.

Es stellt sich hier nun die Frage, wann welche Firmen eintreten und wieder austreten, ob Marktein- und -austritt sozial optimal ist und wie ein Monopolist im Vergleich zum vollkommenen Wettbewerb agieren würde. Jovanovic und Lach nehmen an, dass jede Firma genau eine Maschine kauft. Sie tritt dann aus dem Markt aus, wenn der Preis unter die Grenzkosten sinkt. Am Anfang ist zunächst keine Firma im Markt. Die Firmen

werden nun nacheinander und nicht gleichzeitig in den Markt eintreten, da es sich nach dem Eintritt einer Firma lohnt jeweils einen Augenblick zu warten, da nach dem Eintritt einer Firma die Fixkosten und variablen Kosten sinken. Aufgrund des vollkommenen Wettbewerbs werden die Firmen gerade keinen Gewinn machen, die Fixkosten entsprechen also genau den konstanten Stückgewinnen, die eine Firma macht, solange der Preis höher als ihre Grenzkosten ist. Es zeigt sich, dass die Diffusionsrate S-förmig verläuft. Zunächst treten relativ wenige Firmen in den Markt ein, im mittleren Bereich sehr viele, und dann nähert sich die Firmenanzahl langsam asymptotisch der maximalen Firmenanzahl an. Die Firmenanzahl nimmt immer zu, es treten also immer mehr Firmen ein als alte Firmen mit alten Maschinen austreten. Aufgrund der Diffusion wird im vollkommenen Wettbewerb allerdings nicht das soziale Optimum erreicht. Es zeigt sich, dass ein Monopolist eventuell besser für die Wohlfahrt ist, da er zwar am Ende weniger produziert, aber, weil er die Lerneffekte internalisieren kann, am Anfang sehr viel mehr produziert und viele Maschinen am Anfang kauft. Der soziale Planer würde alle Maschinen sehr früh kaufen, also noch früher als der Monopolist, die optimale Firmenanzahl ist dieselbe wie bei vollkommenem Wettbewerb, sie wird allerdings schneller erreicht.

## 2.2 Lerneffekte und Außenhandelspolitik

Bardhan (1971) stellt die Frage, wie die optimale Außenhandelspolitik aussieht, wenn in einer Industrie Lerneffekte vorliegen. Er betrachtet dafür ein Außenhandelsmodell mit zwei inländischen Sektoren. In einem Sektor gibt es Lerneffekte mit vollständigen Spillover-Effekten, wobei ein Teil des Gelernten immer wieder verloren geht. Der Wissensbestand steigt also nicht zwangsläufig an. Für ein kleines Land, das die Weltmarktpreise als gegeben ansieht, zeigt Bardhan nun, wie die optimale Subventionierung des lernenden Sektors aussieht. Rauch (1992) baut auf diesem Modell auf, nimmt aber an, dass der Regulator nur unvollständige Information hat. Er ist daher nicht mehr in der Lage, die optimale Subvention zu implementieren. Rauch leitet nun eine Art Daumenregel her, mit der eine zweitbeste Subvention bestimmt werden kann, zu deren Bestimmung der Regulator aber über weniger Information verfügen muss. Da diese zweitbeste Subvention immer höher als die optimale Subvention ist, kann sie dem Regulator als Obergrenze für die tatsächliche Subventionshöhe dienen.

Es liegt nahe zu fragen, wie sich die Ergebnisse verändern, wenn statt nur einem beide inländischen Sektoren unterschiedlich stark lernen, aber weiterhin vollständige Spillover-Effekte in beiden Sektoren gelten und wir eine offene Volkswirtschaft betrachten. Clemhout und Wan (1970) zeigen, dass abhängig von den Parameterkonstellationen mal der schwach lernende, mal der stark lernende Sektor geschützt werden sollte. Feder und

Schmitz (1976) zeigen, dass diese Ergebnisse auch für ein einfacheres Partialgleichgewichtsmodell gelten. Wenn nun zudem angenommen wird, dass Lernen in einem Sektor auch den anderen Sektor beeinflusst, dass also neben intrasektoralen auch intersektorale Lerneffekte vorliegen, überrascht es nicht sonderlich, dass aufgrund der höheren externen Effekte auch höhere Subventionen gerechtfertigt sind, wie Succar (1987) zeigt.

Eine andere Frage lautet, wie die optimale Außenhandelspolitik bei privaten Lerneffekten aussieht. To (1994) untersucht diesen Fall und nimmt an, dass eine inländische lernende und eine ausländische Firma, die nicht (mehr) lernt, im Cournotwettbewerb stehen. Die Grenzkosten beider Firmen sind zu einem Zeitpunkt konstant und die Grenzkosten der ausländischen Firma sollen zu Beginn kleiner als die der inländischen Firma sein. Wenn der (inländische) Staat nun die inländische Wohlfahrt bestehend aus Zolleinnahmen, Firmengewinnen (Inland) und der Konsumentenrente maximiert, zeigt sich, dass für bestimmte funktionale Formen der optimale Zoll bei Lerneffekten höher sein sollte als im Fall ohne Lerneffekte. Zwar kann für das Inland eine solche Politik wohlfahrtsmaximierend sein, es ist aber durchaus möglich, dass durch die Zollpolitik die Gesamtwohlfahrt aus In- und Ausland sinkt. Allerdings sollten derartige Schutzzölle nicht unbefristet bestehen bleiben, wie Miravate (2003) zeigt. In seinem Modell konkurriert eine inländische Firma mit ausländischen Firmen, wobei die Inländer die ausländischen Produkte nur als unvollständige Substitute der Inlandsprodukte ansehen. Bei einer optimalen zeitkonsistenten Zollpolitik sollten die Zölle im Zeitablauf bis auf Null zurückgehen, so dass Freihandel erreicht ist.

Leahy und Neary (1999) fragen sich dagegen, inwieweit durch Lerneffekte strategische Handelspolitik und Exportsubventionen gerechtfertigt sein können. Eine inländische und eine ausländische Firmen, die beide unterschiedlich stark lernen, stehen in einem dritten Land im Cournotwettbewerb zueinander. Da der Konsum in einem dritten Land erfolgt, berücksichtigt die Regierung für ihre optimale Regulierung nur den Firmengewinn und die optimalen Produktionskosten der inländischen Firma. Leahy und Neary unterscheiden in ihrem Zwei-Perioden-Modell nun drei verschiedene Spiele. Im ersten Spiel legen sich Firmen und Staat zu Beginn des Spieles auf Preise, Mengen und Subventionen fest. Im zweiten Spiel kann sich der Staat auf seine Subventionen in beiden Perioden festlegen, die Firmen aber in Periode zwei ihre Mengen neu entscheiden können. Im dritten Spiel können sich weder Firmen noch Staat zu Beginn des Spieles auf Mengen beziehungsweise Subventionshöhe in der zweiten Periode festlegen (sogenanntes „sequentielles Gleichgewicht“). Tendenziell (und eindeutig, falls die ausländische Firma gar nicht lernt) gilt nun, dass die optimale Subvention um so kleiner wird, je weniger sich die Firmen beziehungsweise der Staat bezüglich ihrer Handlungen in der zweiten Runde festlegen können, da die strategischen Interaktionsterme die optimale Subvention reduzieren. Insbesondere zeigen Leahy und Neary auch, dass bei linearer Nachfrage und linearem Lernen die optimale



Subvention mit steigenden Lerneffekten im sequentiellen Gleichgewicht abnimmt. Folglich gilt dann das typische infant-industry-Argument nicht mehr, demzufolge Lerneffekte Subventionen rechtfertigen, da die Subventionen ohne Lerneffekte höher als im Fall mit Lerneffekten sein sollten.

## 2.3 Offene Fragen

In der vorgestellten Literatur sind zahlreiche Fragen, die sich aufgrund von Lerneffekten ergeben, beantwortet worden. Insbesondere, wenn die Grenzkosten konstant sind, wissen wir nun recht gut, wie sich Firmen in unterschiedlichen Marktformen verhalten dürften und wie das Marktergebnis gegebenenfalls von der sozial optimalen Allokation abweicht. Bisher ist jedoch nur vereinzelt diskutiert worden, wie der soziale Planer gegebenenfalls regulieren sollte, wenn der unregulierte Markt zu einer suboptimalen Allokation führt. Insbesondere fehlt bisher eine Analyse der optimalen Regulierung sowohl für vollkommenen Wettbewerb als auch Cournotwettbewerb bei steigenden Grenzkosten in einer Periode, Spillover-Effekten und freiem Marktzutritt. Ebenfalls wurde bisher nicht diskutiert, wie sich bei endogener Firmenanzahl und Spillover die Marktstruktur über die Zeit entwickeln kann. Diese beiden Fragen will ich in den folgenden zwei Kapiteln beantworten.

# Kapitel 3

## Lerneffekte bei vollkommenem Wettbewerb

In diesem Kapitel untersuche ich die Auswirkungen von Learning-by-Doing mit Spillover in Wettbewerbsmärkten mit freiem Marktzutritt. Ich betrachte zwei Varianten eines Zwei-Perioden-Modells. In der ersten Variante in Abschnitt 3.1 fallen Fixkosten nur einmal an und können somit als Markteintrittskosten interpretiert werden. Firmen werden in diesem Fall in beiden Perioden produzieren. Bei der zweiten Variante in Abschnitt 3.2 fallen Fixkosten in jeder Periode neu an. Nun ist es möglich, dass außer Firmen, die in beiden Perioden produzieren, auch Firmen im Markt sind, die nur in der ersten oder nur in der zweiten Periode produzieren. Bei der ersten Variante können sozial optimale Allokationen nur erreicht werden, wenn der Output der ersten Periode subventioniert und außerdem eine Markteintrittsprämie gezahlt wird. In der zweiten Variante benötigt der Regulator, falls Marktaustritt einiger Firmen nach der ersten Periode optimal ist, ein nicht-lineares Subventionsschema, um zwischen austretenden und verbleibenden Firmen zu diskriminieren. Außerdem untersuche ich die komparativ-statischen Effekte der verschiedenen Politikinstrumente.

### 3.1 Einmalige Fixkosten und einmaliger Markteintritt

#### 3.1.1 Das Grundmodell

In einem Partialmodell betrachte ich einen Markt mit vollkommener Konkurrenz und freiem Marktzutritt. Die Firmen lernen, das heißt, dass ihre Produktionskosten auch von der kumulierten vergangenen Produktionsmenge abhängen. Wenn nur der eigene vergangene Output die Produktionskosten beeinflusst, sind die Lerneffekte privat. Wenn auch

der Output der anderen Firmen zum Lernen beiträgt, sind die Lerneffekte öffentlich, es gibt also Lern-Spillover. Ich nehme an, dass sowohl privates als auch öffentliches Lernen möglich ist. Um nun Lerneffekte zu modellieren, gehe ich von zwei Perioden  $t = 1, 2$  aus. Die Anzahl der ex ante symmetrischen Firmen sei mit  $n$  bezeichnet, die Produktionsmenge einer typischen Firma in der Periode  $t$  mit  $y_t$ . Der gesamte Output der Industrie ergibt sich dann als  $Y_t = ny_t$ . Die variablen Kosten in der ersten Periode bezeichne ich mit  $C^1(y_1)$  und in der zweiten Periode mit  $C^2(y_2; L)$ . In der ersten Periode haben die Firmen in der Vergangenheit noch nichts produziert und daher keine Erfahrung. Daher hängen die Kosten nur von der Produktionsmenge in der laufenden Periode ab. Die Kosten der zweiten Periode hingegen hängen nicht nur vom laufenden Output ab, sondern auch von der gesamten Erfahrung  $L = y_1 + \epsilon(n-1)\tilde{y}_1$ , die wiederum vom eigenen Output und vom Output aller anderen  $(n-1)$  Firmen abhängt. Ich nehme insbesondere an, dass  $n \geq 1$  gilt. Wenn die Firmenanzahl auch zwischen  $0 \leq n \leq 1$  liegen könnte, wie in einem Beispiel in Petrakis, Rasmusen und Roy (1997), würden die Spillover-Effekte negative Werte annehmen, was ökonomisch keinen Sinn ergibt. Wie bei Dasgupta und Stiglitz (1988) misst der Parameter  $\epsilon$  mit  $0 \leq \epsilon \leq 1$  die Stärke des Spillover-Effekts. Wenn  $\epsilon = 0$  ist, gibt es nur privates Lernen, bei  $\epsilon = 1$  ist alles Lernen öffentlich, die Spillover sind also vollständig. Ob der Output von der Firma selbst oder von einer anderen Firma produziert wurde, hat dann den gleichen kostensenkenden Effekt.

Weiter nehme ich an, dass die Kostenfunktionen folgende Eigenschaften haben:  $C_{y_t}^t > 0$  und  $C_{y_t y_t}^t > 0$ , das heißt, dass die Grenzkosten positiv und steigend in beiden Perioden sind. Zusätzlich gelte  $C_L^2 < 0$  und  $C_{y_2 L}^2 < 0$ , was bedeutet, dass Lernen, sei es privat oder öffentlich, die Kosten und die Grenzkosten in der zweiten Periode vermindert. Allerdings soll auch gelten, dass  $C_{LL}^2 > 0$ , dass also die Lerneffekte mit zunehmendem Lernen schwächer werden. Aus technischen Gründen nehme ich weiter an, dass  $C^2$  insgesamt konvex ist, also  $C_{LL}^2 C_{y_2 y_2}^2 - [C_{Ly_2}^2]^2 > 0$  gilt, falls  $y_2, L > 0$ . Schließlich soll gelten, dass die Kostenfunktionen in der ersten und zweiten Periode gleich sind, wenn in der ersten Periode nicht gelernt wurde, also  $C^2(y_2; 0) = C^1(y_1)$ . Um ein Marktgleichgewicht mit freiem Marktzutritt und steigenden Grenzkosten zu erhalten, ist es außerdem notwendig, dass die Firmen Fixkosten  $F$  zu tragen haben. In diesem Abschnitt untersuche ich zunächst den Fall, dass den Firmen nur in einer Periode Fixkosten entstehen, die Fixkosten also als Markteintrittskosten interpretiert werden können. In Abschnitt 3.2 untersuche ich hingegen den Fall, dass die Firmen in beiden Perioden Fixkosten zu tragen haben. Wenn die Fixkosten nur einmal anfallen, bedeutet das auch, dass die Firmen entweder in beiden Perioden oder in gar keiner Periode produzieren. Marktzutritt oder -austritt zwischen der ersten und zweiten Periode ist dann weder aus privater Sicht rational noch aus sozialer Sicht erwünscht. Der Grund ist folgender: Erstens gilt, dass die Fixkosten für Firmen, die in der ersten Periode in den Markt eingetreten sind, in der zweiten Periode versun-

ken sind. Daher sind Firmen, die erst in der zweiten Periode in den Markt eintreten und Fixkosten zu zahlen haben, aufgrund höherer Durchschnittskosten nicht konkurrenzfähig. Später Marktzutritt ist also nicht möglich. Zweitens ergibt sich wegen der versunkenen Fixkosten aus der ersten Periode, der ansteigenden Grenzkosten und der Tatsache, dass keine weiteren Firmen eintreten, in der zweiten Periode ein Markt mit exogener Firmenanzahl. In einem solchen Markt gibt es in der zweiten Periode positive private und soziale Renten. Es ist daher weder privat noch sozial optimal, dass Firmen den Markt nach der ersten Periode verlassen.

Die Nachfrage für die produzierten Güter sei durch eine inverse Nachfragefunktion  $p_t = P_t(Y_t)$  gegeben, für die wie gewöhnlich gilt, dass die Nachfrage um so größer ist, je niedriger der Preis ist, also  $P'_t(Y_t) < 0$ . Wegen der Symmetrie der Firmen und aufgrund der steigenden Grenzkosten muss eine sozial optimal Allokation auch symmetrisch sein. Daher können wir die Wohlfahrtsfunktion wie folgt schreiben:

$$W = \int_0^{ny_1} P_1(Y) dY - nC^1(y_1) - nF + \delta \left[ \int_0^{ny_2} P_2(Y) dY - nC^2(y_2; L) \right], \quad (3.1)$$

wobei  $\delta$  den sozialen und privaten Diskontfaktor angibt.<sup>1</sup>

### 3.1.2 Das soziale Optimum

Der soziale Planer maximiert die Wohlfahrtsfunktion bezüglich  $y_1, y_2$  und der optimalen Firmenanzahl  $n$ . Die Bedingungen erster Ordnung sind durch die folgenden Gleichungen gegeben. Die partiellen Ableitungen  $\frac{\partial W}{\partial y_1}$  bezeichne ich im Folgenden mit  $W_{y_1}$  etc.:

$$W_{y_1} = P_1(Y_1) - C_{y_1}^1(y_1) + \delta[-C_L^2(y_2; L)[1 + \epsilon(n-1)]] = 0 \quad (3.2)$$

$$W_{y_2} = P_2(Y_2) - C_{y_2}^2(y_2; L) = 0 \quad (3.3)$$

$$W_n = P_1(Y_1)y_1 - C^1(y_1) - F + \delta[P_2(Y_2)y_2 - C^2(y_2; L) - nC_L^2(y_2; L)\epsilon y_1] = 0 \quad (3.4)$$

Gleichung (3.2) besagt, dass in der ersten Periode die Grenzkosten einer Firma gleich der marginalen Zahlungsbereitschaft der Konsumenten plus dem sozialen Grenznutzen des Lernens in der zweiten Periode sein müssen. Gleichung (3.3) gibt an, dass in der zweiten Periode die Grenzkosten gleich der marginalen Zahlungsbereitschaft sein sollten. Gleichung (3.4) bestimmt schließlich zusammen mit den Gleichungen (3.2) und (3.3) die optimale Firmenanzahl. Überraschenderweise findet sich auch in dieser Bedingung noch ein Lerneffekt. Dies liegt daran, dass eine Firma, die in den Markt eintritt, damit eine

---

<sup>1</sup>Der soziale Diskontfaktor muss im Allgemeinen nicht mit dem privaten übereinstimmen. Derartige mögliche Unterschiede sind aber für diese Arbeit nicht von Interesse und werden von mir deshalb vernachlässigt.

positive Externalität auslöst, weil sie selbst nun auch lernt und vom Lernen der anderen profitiert.

### 3.1.3 Die optimale Politik bei vollkommenem Wettbewerb

Wenn wir vollkommenen Wettbewerb unterstellen, gilt, dass die Firmen relativ klein im Verhältnis zum Gesamtmarkt sind und als Preisnehmer handeln. Die Firmen werden ihre intertemporalen Gewinne so maximieren, dass sie nur den privaten Lerneffekt bei ihrer Gewinnmaximierung berücksichtigen, nicht jedoch die positive Externalität, das öffentliche Lernen, das als Nebenprodukt der Produktion in der ersten Periode anfällt. Es ist daher nicht weiter überraschend, dass sich - wie unten gezeigt wird - die sozial optimale Allokation in einem unregulierten Markt nicht einstellt. In der bisherigen Literatur gibt es bislang keine Untersuchung des optimalen Subventionsregimes bei Existenz von Spillover-Effekten, vollkommenem Wettbewerb und freiem Marktzutritt. Da in der bisherigen Literatur wie Spence (1981), Fudenberg und Tirole (1983) oder Dasgupta und Stiglitz (1988) überwiegend konstante laufende Grenzkosten angenommen wurden, sollte dort im Optimum nur eine Firma im Markt sein. Dieses Resultat gilt bei steigenden Grenzkosten nicht mehr beziehungsweise höchstens zufällig. Unter Vorwegnahme der optimalen Politik lasse ich zu, dass der Regulator sowohl eine Outputsubvention  $s_{out}$  als auch eine Markteintrittsprämie (oder Investitionssubvention)  $s_{ent}$  zahlt. Mit diesen beiden Instrumente ergibt sich der Firmengewinn wie folgt

$$[p_1 + s_{out}]y_1 - C^1(y_1) - F + s_{ent} + \delta[p_2y_2 - C^2(y_2; L)]$$

Die Bedingungen erster Ordnung einer Firma, die als Preisnehmerin agiert, lauten dann

$$\pi_{y_1} = [p_1 + s_{out}] - C_{y_1}^1(y_1) + \delta[-C_L^2(y_2; L)] = 0 \quad (3.5)$$

$$\pi_{y_2} = p_2 - C_{y_2}^2(y_2; L) = 0 \quad (3.6)$$

Außerdem gilt wegen freien Marktzutritts auch, dass die Gewinne der Firmen gleich null sein müssen:

$$\pi = [p_1 + s_{out}]y_1 - C^1(y_1) - F + s_{ent} + \delta[p_2y_2 - C^2(y_2; L)] = 0 \quad (3.7)$$

Durch Vergleich der Gleichungen (3.2) - (3.4) mit den Gleichungen (3.5) - (3.7) ergibt sich, dass die optimale Outputsubvention dem marginalen Spillover-Effekt jeder Firma auf die anderen  $(n - 1)$ -Firmen entsprechen muss, also gelten muss, dass

$$s_{out} = -\delta\epsilon(n^* - 1)C_L^2(y_2^*; L^*), \quad (3.8)$$

und dass die optimale Markteintrittsprämie durch

$$s_{ent} = -\delta\epsilon C_L^2(y_2^*; L^*)y_1^* \quad (3.9)$$

gegeben ist. Mit  $y_1^*$ ,  $y_2^*$ ,  $L^*$ ,  $n^*$  bezeichne ich die effizienten Outputlevel, Lerneffekte, beziehungsweise Firmenanzahl.

Es stellt sich nun die Frage, warum außer einer Outputsubvention auch eine Markteintrittsprämie erforderlich ist, um die sozial optimale Allokation zu implementieren. Die intuitive Erklärung lautet wie folgt: Die Outputsubvention  $s_{out}$  sorgt dafür, dass die Firmen in der ersten Periode nicht wie im unregulierten Fall zu wenig produzieren, die Markteintrittsprämie  $s_{ent}$  hingegen, dass nicht zu wenig Firmen in den Markt eintreten. Ich möchte das anhand eines kleinen Gedankenexperiments erläutern: Angenommen, es gäbe nur eine Outputsubvention und keine Markteintrittsprämie und weiter sei angenommen, dass dann lediglich zwei Firmen im Markt aktiv wären, jedoch drei Firmen im sozialen Optimum aktiv sein sollten. Die zwei Firmen im Markt erhalten eine Outputsubvention für die positive Externalität der Spillover. Falls nun eine dritte Firma in den Markt eintreten wollte, würde diese ebenfalls eine Outputsubvention für die von ihr verursachten Spillover erhalten. Allerdings würde diese dritte Firma bei ihrer Markteintrittsentscheidung nicht berücksichtigen, dass die positiven Spilloverexternalitäten der beiden anderen Firmen nun auch zusätzlich ihre eigenen Kosten senken, also mehr wert sind als vorher. Dieser zusätzliche Wert wird nun genau durch die Markteintrittsprämie  $s_{ent} = \delta \epsilon C_L^2(y_2^*; L^*) y_1^*$  wiedergegeben.

Die obigen Ergebnisse können wir nun in der folgenden Proposition zusammenfassen:

**Proposition 1** *Bei vollkommenem Wettbewerb, freiem Marktzutritt und privatem und öffentlichem Lernen (Spillover) kann der Regulator die sozial optimale Allokation durch Einführung einer Outputsubvention  $s_{out} = -\delta \epsilon (n^* - 1) C_L^2(y_2^*; L^*)$  auf den Output der ersten Periode und einer Markteintrittsprämie  $s_{ent} = -\delta \epsilon C_L^2(y_2^*; L^*) y_1^*$  für alle aktiven Firmen erreichen.*

Damit ist auch klar, dass eine Laisser-faire-Politik zu Marktversagen führt. Damit die Subventionspolitik tatsächlich zur gewünschten sozial optimalen Allokation führt, nehme ich an, dass das Marktgleichgewicht eindeutig und stabil ist. Die entsprechenden Stabilitätsbedingungen finden sich im Kapitelanhang.

### 3.1.4 Komparative Statik

Um die Effekte zu untersuchen, die durch eine Veränderung sowohl der Outputsubvention als auch der Markteintrittsprämie entstehen, müssen wir die totalen Ableitungen der Gleichungen (3.5) - (3.7) bestimmen und dann nach  $\partial y_1 / \partial s_{ent}$ ,  $\partial y_2 / \partial s_{ent}$  und  $\partial n / \partial s_{ent}$  (bei konstantem  $s_{out}$ ), beziehungsweise nach  $\partial y_1 / \partial s_{out}$ ,  $\partial y_2 / \partial s_{out}$  und  $\partial n / \partial s_{out}$  (bei konstantem  $s_{ent}$ ) auflösen. Ebenfalls können wir die komparativ-statischen Effekte für den

jeweiligen Gesamtoutput in einer Periode  $Y_1$  and  $Y_2$  bestimmen. Einige dieser Effekte ergeben sich direkt aus den Annahmen, für andere müssen noch weitere Annahmen über die Kosten- und Nachfragefunktionen erfüllt sein. Wir geben daher noch die folgenden Bedingungen an, die wir als gegeben annehmen:

$$-P_2' y_2 + \epsilon C_{y_2 L}^2 y_1 \geq 0 \quad (3.10)$$

$$C_{y_1 y_1}^1 y_1 + \delta C_{y_2 L}^2 y_2 \geq 0 \quad (3.11)$$

$$C_{y_2 y_2}^2 y_2 + C_{y_2 L}^2 y_1 \geq 0 \quad (3.12)$$

Nun kann der Effekt einer Erhöhung der Markteintrittsprämie wie folgt zusammengefasst werden:

**Proposition 2** *Wenn die über die Kosten- und Nachfragefunktionen getroffenen Annahmen erfüllt sind und das Marktgleichgewicht bei vollkommenem Wettbewerb und freiem Markteintritt stabil ist, gilt:*

- i)  $\partial n / \partial s_{ent} > 0$  und  $\partial y_1 / \partial s_{ent} < 0$ .
- ii) Wenn (3.10), dann  $\partial y_2 / \partial s_{ent} < 0$ .
- iii) Wenn (3.11), dann  $\partial Y_1 / \partial s_{ent} > 0$ .
- iv) Wenn (3.12), dann  $\partial Y_2 / \partial s_{ent} > 0$ .

Der Beweis findet sich im Kapitelanhang. Die Intuition dieser Ergebnisse ist wie folgt: Eine Markteintrittsprämie hat denselben Effekt wie eine Reduktion der Fixkosten und führt daher zu geringeren minimalen Durchschnittskosten. Im normalen statischen Partialgleichgewichtsmodell mit freiem Marktzutritt führen geringere Fixkosten zu steigender Firmenanzahl (Markteintritt) und einem geringeren Output der einzelnen Firma. Gleiches gilt nun auch hier für die Firmenanzahl und den Output jeder einzelnen Firma in der ersten Periode. Allerdings ist der Effekt einer Prämienerrhöhung auf die Produktionsmenge jeder Firma in der zweiten Periode im Allgemeinen unbestimmt. Nur wenn Bedingung (3.10) erfüllt ist, sinkt der Output. Der Grund für die Unbestimmtheit ist, dass nach der ersten Periode die Firmenanzahl als fix angesehen werden kann, da Markteintritt in der zweiten Periode nicht rational ist. Wegen der Lerneffekte führt ein steigender (Gesamt-) Output in der ersten Periode zu sinkenden Kosten in der zweiten Periode. Im Lehrbuchfall eines Partialgleichgewichtsmodells mit fester Firmenanzahl führen nun aber sinkende variable Kosten zu einem steigenden Output jeder einzelnen Firma. Folglich gibt es in unserem Modell zwei gegenläufige Effekte, wobei unter Bedingung (3.10) der outputreduzierende Effekt aufgrund von Markteintritt den outputerhöhenden Effekt aufgrund sinkender variabler Kosten dominiert.

Die komparativ-statischen Effekte hinsichtlich der gesamten Produktionsmenge in beiden Perioden sind dagegen intuitiv einleuchtend und in Übereinstimmung mit dem typischen Lehrbuchmodell ohne Lerneffekte. Obwohl ich die weiteren Bedingungen (3.11) und (3.12) benötige, um die Vorzeichen exakt zu bestimmen, konnte ich keinerlei Gegenbeispiele finden, bei denen eine Erhöhung der Markteintrittsprämie zu einem Rückgang des Outputs in mindestens einer der beiden Perioden führt.

Wie sieht es nun mit den komparativ-statischen Effekten bei einer Erhöhung der Outputsubvention aus? Um eindeutige Effekte zu erhalten, müssen wir zunächst weitere Bedingungen an die Kostenfunktionen stellen: Zusätzlich zu den Bedingungen (3.10) - (3.12) benötigen wir die folgenden Bedingungen:

$$\delta\epsilon C_L^2 + C_{y_1 y_1}^1 y_1 \geq 0 \quad (3.13)$$

$$C_{LL}^2 y_1 + C_{y_2 L}^2 y_2 \geq 0 \quad (3.14)$$

Die Bedingungen (3.11) - (3.14) haben allesamt gemeinsam, dass die Reduktion sowohl der Kosten als auch der Grenzkosten durch Lernen nicht zu hoch ausfällt. Wir erhalten mit diesen Bedingungen das folgende Ergebnis:

**Proposition 3** *i) Wenn Bedingung (3.12) gilt und  $\epsilon$  hinreichend klein ist, dann ist  $\partial y_1 / \partial s_{out} > 0$ .*

*ii) Wenn Bedingung (3.10) gilt und auch Bedingung (3.14) erfüllt ist, dann ist  $\partial y_2 / \partial s_{out} < 0$ .*

*iii) Wenn Bedingung (3.14) gilt, dann ist  $\partial n / \partial s_{out} > 0$ .*

*iv) Wenn die Bedingungen (3.12) und (3.13) gelten, dann sind  $\partial Y_1 / \partial s_{out} > 0$  und  $\partial Y_2 / \partial s_{out} > 0$ .*

Der Beweis findet sich im Anhang. Die komparativ-statischen Effekte aus Proposition 3 sind die „normalen“ Effekte, das heißt, dass, wie man erwarten würde, eine Erhöhung der Outputsubvention zu einem Anstieg des Outputs jeder einzelnen Firma führt. Es mag allerdings überraschen, dass normalerweise der Output in der zweiten Periode zurückgeht. Der Grund besteht darin, dass die Outputsubvention die Produktion in der ersten Periode relativ attraktiver macht. Da die Firmen aufgrund von Markteintritt keine Gewinne erwirtschaften, verschieben sie ihre Produktion von der zweiten in die erste Periode. Dies gilt, obwohl die Kosten der zweiten Periode mit zunehmendem Lernen abnehmen. Wenn jedoch die oben genannten Bedingungen nicht erfüllt sind, kann es natürlich auch vorkommen - wie Beispiel 1 zeigt -, dass eine Subventionserhöhung zu einem Outputrückgang in der ersten Periode und einer Outputerhöhung in der zweiten Periode jeder einzelnen Firma führen kann.



**Beispiel 1** <sup>2</sup> Es sei  $\epsilon = 1$ ,  $\delta = 0,0001$ ,  $F = 10$ ,  $P_t = (100 - Y_t)/2$ ,  $C^1(y_1) = 20y_1^2$  und  $C^2(y_2, L) = \frac{20y_2^2}{1+L}$ . Eine Outputsubventionserhöhung von  $s_{out} = 0,2$  auf  $s_{out} = 1$  führt dann zu einem Rückgang von  $y_1$  von 1,22463 auf 1,22458 und zu einem Anstieg von  $y_2$  von 3,956 auf 5,215.

Man beachte, dass in Beispiel 1 die beiden Bedingungen (3.10) und (3.14) verletzt sind. Bedingung (3.12) gilt zwar, allerdings ist  $\epsilon$  zu groß, als dass  $\partial y_1 / \partial s_{out} > 0$  gelten würde.

Wie Beispiel 2 zeigt, kann bei einer Outputsubventionserhöhung die Firmenanzahl zurückgehen, wenn Bedingung (3.14) verletzt ist.

**Beispiel 2** Es sei  $\epsilon = 0,9$ ,  $\delta = 1$ ,  $F = 10$ ,  $P_t = 100 - Y_t$ ,  $C^1(y_1) = 6,5y_1^2$  und  $C^2(y_2, L) = 0,5(3y_2 - 0,1L)^2 + 2y_2^2$ . Die Outputsubvention steige von  $s_{out} = 0$  auf  $s_{out} = 1$ . Dann ergeben sich die Ergebnisse aus Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1: Rückgang der Firmenanzahl bei Anstieg der Outputsubvention.

	$s_{out} = 0$		$s_{out} = 1$	
	1. Periode	2. Periode	1.Periode	2.Periode
y	1,49	1,82	1,51	1,83
n	53,87	53,87	53,75	53,75
Y	80,42	98,09	81,18	98,21

Die Firmenanzahl sinkt von 53,87 auf 53,75, während die individuelle und die gesamte Produktionsmenge in beiden Perioden ansteigt. Zwei gegenläufige Effekte wirken auf die Firmenanzahl. Einerseits führt die Outputsubvention zu steigendem Output von mehr Firmen, andererseits führt eine größere Produktionsmenge in der ersten Periode zu größeren Lerneffekten und damit geringeren Kosten in der zweiten Periode. Dies kann dazu führen, dass der Markt in der zweiten Periode weniger Firmen aufnehmen kann. In Beispiel 2 dominiert der zweite Effekt.

---

<sup>2</sup>Der aufmerksame Leser wird bemerken, dass die in diesem Beispiel gewählten Kostenfunktionen die Modellannahme  $C_{yy}C_{LL} - C_{yL}^2 > 0$  nicht erfüllen. Vielmehr gilt  $C_{yy}C_{LL} - C_{yL}^2 = 0$ , das heißt, dass nur die notwendige, nicht jedoch die hinreichende Bedingung erfüllt ist, damit die Funktion insgesamt konvex ist. Die Bedingung wäre jedoch schon erfüllt, wenn man ein  $\eta y^2$  mit  $\eta \rightarrow 0$  zu der Kostenfunktion addieren würde. Die Ergebnisse der Beispiele würden sich dann nur unwesentlich verändern. Ich habe aber dennoch die obigen Kostenfunktionen gewählt, weil die Rechenzeit des Computers sonst extrem angestiegen wäre.

## 3.2 Fixkosten in beiden Perioden - später Marktzutritt und früher Marktaustritt

Im vorigen Abschnitt 3.1 bin ich davon ausgegangen, dass die Firmen lediglich einmal Fixkosten zu tragen haben. Petrakis, Rasmusen und Roy (1997) nehmen im Gegensatz dazu an, dass bei den Firmen in beiden Perioden Fixkosten anfallen und dass - anders als bei mir - das Lernen nicht nur die variablen, sondern auch die Fixkosten beeinflussen kann. Sie zeigen, dass bei privaten Lerneffekten früher Marktaustritt möglich ist, das heißt, dass manche Firmen nur in der ersten Periode produzieren. Auch später Markteintritt ist bei privaten Lerneffekten möglich, aber nur, wenn die Kostenfunktionen nicht konvex sind, wenn zum Beispiel nur die Fixkosten aufgrund des Lernens sinken. Ich nehme in diesem Kapitel nun auch an, dass den Firmen in beiden Perioden Fixkosten entstehen, so dass, wie ich zeigen werde, nun auch hier früher Marktaustritt und später Markteintritt möglich sind. Allerdings nehme ich an, dass die Lerneffekte weiterhin nur die variablen Kosten betreffen. Die Fixkosten sind also in beiden Perioden gleich hoch. Man kann die von mir getroffenen Modellannahmen auch als Extremformen von möglichem Lernen in Fixkosten interpretieren, nämlich gar nicht beziehungsweise vollständig, so dass in der zweiten Periode keine Fixkosten mehr anfallen.

### 3.2.1 Modellerweiterung

Die Fixkosten bezeichne ich mit  $F_1$  und  $F_2$ , wobei  $F_1 = F_2 = F$  gilt, da die Fixkosten durch Lernen nicht beeinflusst werden können. Es sind nun drei verschiedene Firmentypen denkbar: Erstens Firmen, die nur in der ersten Periode im Markt sind und dann frühzeitig ausscheiden (X-Firmen), zweitens Firmen, die in beiden Perioden im Markt sind (S-Firmen) und drittens Firmen, die erst später in den Markt eintreten, also nur in der zweiten Periode aktiv sind (E-Firmen). Im Weiteren bezeichne ich mit  $n_s, n_x$  und  $n_e$  die Anzahl der S-, X- und E-Firmen. Die Produktionsmenge der S-Firmen in den jeweiligen Perioden bezeichne ich mit  $y_1^s$  und  $y_2^s$ , den Output der X-Firmen mit  $y_x$  und den Output der E-Firmen mit  $y_e$ . Unter Annahme von Symmetrie der jeweiligen Firmentypen ergibt sich der Gesamtoutput der Perioden als  $Y_1 = n_s y_1^s + n_x y_x$  und  $Y_2 = n_s y_2^s + n_e y_e$ . Die Wohlfahrtsfunktion lautet daher:

$$\begin{aligned}
 W = & \int_0^{Y_1} P_1(Y) dY - n_s C^1(y_1^s) - n_x C^1(y_x) - (n_s + n_x) F + \\
 & \delta \left[ \int_0^{Y_2} P_2(Y) dY - n_s C^2(y_2^s; L_s) - n_e C^2(y_e; L_e) - (n_s + n_e) F \right]
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Auf zwei Aspekte möchte ich hier hinweisen. Erstens kann es, falls  $\epsilon > 1$  ist, also ein Teil der Lerneffekte privat ist, wie bei Petrakis, Rasmusen und Roy (1997) niemals optimal

sein, dass einige Firmen den Markt frühzeitig verlassen und gleichzeitig neue Firmen in der zweiten Periode in den Markt eintreten.<sup>3</sup> Der Grund hierfür lautet, dass bei einer derartigen Allokation die Wohlfahrt dadurch erhöht werden könnte, dass E-Firmen mit X-Firmen substituiert werden, da die X-Firmen ja bereits gelernt haben und - da Lernen teilweise privat ist - auf jeden Fall niedrigere Kosten als die E-Firmen haben. Zweitens ist zu beachten, dass im Falle von späterem Marktzutritt der Lernparameter  $L$  für S- und E-Firmen unterschiedlich ist, und zwar ergibt sich  $L_s = y_1^s + \epsilon(n_s - 1)y_1^s$  für S-Firmen und  $L_e = \epsilon n_s y_1^s$  für E-Firmen. Die erste Beobachtung möchte ich in der folgenden Proposition festhalten:<sup>4</sup>

**Proposition 4** *Unter der Annahme, dass die Lerneffekte mindestens teilweise privat sind (also  $\epsilon < 1$ ), die Firmen in beiden Perioden Fixkosten aufwenden müssen und sowohl Marktzutritt als auch Marktaustritt möglich ist, gilt, dass es nie sozial optimal sein kann, dass manche Firmen den Markt nach der ersten Periode verlassen und gleichzeitig neue Firmen in Periode 2 in den Markt eintreten.*

Durch Ableiten der Wohlfahrtsfunktion nach der Firmenanzahl und den Produktionsmengen erhalten wir die Optimalitätsbedingungen. Während im Optimum nie alle drei Firmentypen gleichzeitig aktiv sein können, ist es möglich, dass X-Firmen und S-Firmen, nur S-Firmen oder auch S-Firmen und E-Firmen aktiv sind. Die Bedingungen erster Ordnung sind im Kapitelanhang angegeben.

### 3.2.2 Die optimale Politik bei spätem Marktzutritt und frühem Marktaustritt

Petrakis, Rasmusen und Roy (1997) zeigen, dass bei konvexen Kostenfunktionen Marktzutritt in der zweiten Periode niemals optimal sein kann; Marktaustritt nach der ersten Periode kann hingegen optimal sein. Wenn es jedoch Lerneffekte mit Spillover gibt, kann beides vorkommen und zwar sowohl im sozialen Optimum als auch im unregulierten Laisser-faire-Fall, was ich mit Hilfe der Beispiele 3, 4 und 6 zeigen werde.

---

<sup>3</sup>Bei Jovanovic und Lach (1989) ist dieses Phänomen durchaus möglich, was allerdings an den sehr unterschiedlichen Modellannahmen liegt. Dort führt Lernen nur zu einer Kostenreduktion von neuen Anlagen, während existierende Anlagen nicht mehr verbessert werden können. Daher können also durchaus gleichzeitig Firmen mit veralteter Technologie aus dem Markt austreten und Firmen mit neuer Technologie in den Markt eintreten.

<sup>4</sup>Dieses Ergebnis ähnelt dem Ergebnis von Baumol, Panzar und Willig (1982) für Mehrproduktunternehmen.

## Später Marktzutritt

Falls später Marktzutritt optimal ist, unterscheiden sich die Lernparameter  $L_s$  und  $L_e$  für S- und E-Firmen. Trotzdem kann die sozial optimale Allokation weiterhin mit denselben Instrumenten wie bei einmaligen Fixkosten erreicht werden. Es gilt also:

**Proposition 5** *Wenn später Marktzutritt einiger Firmen optimal ist, kann der Regulator die sozial optimale Allokation mit Hilfe einer Outputsubvention und einer Markteintrittsprämie erreichen. Für diese muss gelten:*

$$s_{out} = -\delta\epsilon[(n_s^* - 1)C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) + n_e^*C_L^2(y_e^*, L_e^*)] \quad (3.16)$$

$$s_{ent} = -\delta\epsilon C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*)y_1^{s*} \quad (3.17)$$

Die effizienten Outputniveaus der ersten und zweiten Periode bezeichne ich hierbei mit  $y_1^{s*}$ ,  $y_2^{s*}$  und  $y_e^*$ , die optimalen Lernniveaus mit  $L_s^*$  und  $L_e^*$  und die optimale jeweilige Firmenanzahl mit  $n_s^*$  und  $n_e^*$ .

Der Beweis findet sich im Kapitelanhang. Im folgenden Beispiel 3 zeige ich, dass später Markteintritt einiger Firmen tatsächlich möglich ist.

### Beispiel 3 [Später Marktzutritt einiger Firmen]

Es sei  $\epsilon = 0,9$ ,  $\delta = 1$ ,  $F = 10$ ,  $P_t = (100 - Y_t)/9$ ,  $C^1(y_1) = 2y_1^2$ ,  $C^{2,i}(y_2^i, L_i) = (y_2^i - \alpha L_i)^2 + (y_2^i)^2$  mit  $i = e, s$  und  $\alpha = 1/15$ . Im sozialen Optimum ergeben sich dann die Ergebnisse aus Tabelle 3.2. E-Firmen produzieren in der zweiten Periode weniger als S-Firmen; der Marktpreis sinkt, während die gesamte Produktionsmenge steigt.

Tabelle 3.2: Später Marktzutritt im sozialen Optimum

	S-Firmen		E-Firmen		p	Y
	y	n	y	n		
1. Periode	2,24	14,05	0	0	7,62	31,42
2. Periode	2,61	14,05	2,60	1,36	6,64	40,22

## Früher Marktaustritt

Nehmen wir nun an, dass es sozial optimal ist, dass einige Firmen nach der ersten Periode aus dem Markt austreten. Die Regulierung wird nun komplizierter, weil die positive Externalität, die die unterschiedlichen Firmentypen produzieren, für die Typen unterschiedlich ist. Dies liegt daran, dass die S-Firmen, die während beider Perioden am Markt aktiv

sind, den privaten Grenzeffekt des Lernens  $\delta C_L^2(y_2^s, L_s)$  internalisieren und für die restlichen  $(n_s - 1)$  S-Firmen eine positive Grenzexternalität in Höhe von  $\delta\epsilon(n_s - 1)C_L^2(y_2^s, L_s)$  produzieren. Die X-Firmen, die aus dem Markt austreten, sind an privatem Lernen nicht interessiert und produzieren daher eine positive Grenzexternalität für alle  $n_s$  S-Firmen in Höhe von  $\delta\epsilon n_s C_L^2(y_2^s, L_s)$ . Da die produzierte Externalität unterschiedlich ist, kann der Regulator die sozial optimale Allokation auch nicht mit einer einheitlichen Outputsubvention und einer einheitlichen Markteintrittsprämie erreichen. Die Firmen sind zwar vor der ersten Periode bezüglich ihrer Kosten identisch, nach der ersten Periode sind die Firmen aber aufgrund ihrer unterschiedlichen Produktions- und Lernentscheidung unterschiedlich. Das Problem besteht also darin, dass der Regulator zu Beginn nicht unbedingt zwischen den Firmen diskriminieren kann, da die unterschiedlichen Typen ex ante nicht bekannt sind. Ich werde zunächst dennoch annehmen, dass der Regulator zwischen den beiden Firmentypen unterscheiden kann und die optimale Regulierung für diesen Fall aufzeigen. Danach werde ich zeigen, wie der Regulator die sozial optimale Allokation auch ohne Diskriminierungsmöglichkeit erreichen kann.

Falls der Regulator nun entweder ex ante zwischen den beiden Firmentypen diskriminieren kann oder aber die Subvention erst nach Ende der ersten Periode zahlt, wenn also die Firmen ihren Typ offenbart haben, kann der Regulator die sozial optimale Allokation mit folgenden Instrumenten erreichen.<sup>5</sup> Analog zu den vorherigen Kapiteln bezeichne die sozial optimalen Niveaus von Output, Firmenanzahl mit einem Stern, also  $y_1^{s*}$ ,  $y_x^*$ , etc. und den sozial optimalen Lerneffekt mit  $L_s^* = y_1^{s*} + \epsilon(n_s^* - 1)y_1^{s*} + \epsilon n_x^* y_x^*$ .

**Proposition 6** [Sozial optimale Regulierung bei frühem Marktaustritt und möglicher Diskriminierung zwischen den Firmen]

*Falls früher Marktaustritt einiger Firmen optimal ist und der Regulator zwischen S- und X-Firmen unterscheiden kann, kann er die sozial optimale Allokation mit einer Outputsubvention  $s_{out}^x$  für die austretenden Firmen sowie einer Outputsubvention  $s_{out}^s$  und einer Markteintrittsprämie  $s_{ent}^s$  für die im Markt verbleibenden Firmen gemäß folgender Regel erreichen:*

$$s_{out}^x = -\delta\epsilon n_s^* C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) \quad (3.18)$$

$$s_{out}^s = -\delta\epsilon(n_s^* - 1)C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) \quad (3.19)$$

$$s_{ent}^s = -\delta\epsilon C_L^2 y_1^{s*} \quad (3.20)$$

---

<sup>5</sup>Insbesondere, wenn die erste Periode dieses Modells in der Realität über einen Zeitraum von mehreren Jahren läuft, ist eine derartige Subventionszahlung im Nachhinein möglicherweise problematisch. Es könnte durchaus sein, dass der Regulator ein Glaubwürdigkeitsproblem hat, weil die Firmen wissen, dass sich spätere Regierungen nicht unbedingt an die Subventionsversprechungen vorheriger Regierungen gebunden fühlen, ja sogar die gleiche Regierung ihre Meinung mit der Zeit ändern kann. Für kurze reale Zeitperioden allerdings mag das folgende Subventionsregime wegen seiner Einfachheit geeignet sein.

Der Beweis findet sich im Anhang.

Eine derartige Diskriminierung zwischen den Firmen könnte nun allerdings praktisch schwierig oder auch verfassungsrechtlich problematisch sein. Aber auch ohne die Annahme der Diskriminierungsmöglichkeit kann der Regulator die sozial optimale Allokation erreichen, und zwar, in dem er eine nicht-lineare konkave Outputsubventionsfunktion  $S_{out}$  verwendet, die die Werte  $S'_{out}(y_1^{s*}) = \delta\epsilon(n_s^* - 1)C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*)$  und  $S'_{out}(y_x^*) = \delta\epsilon(n_s^*)C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*)$  annimmt, wenn die Firmen ihre optimalen Outputmengen  $y_1^{s*}$  and  $y_x^*$  wählen. Da dies zusammen mit der Konkavität die einzigen Bedingungen für die Outputsubventionsfunktion sind, gibt es unendlich viele Funktionen, die der Regulator verwenden könnte. Ich werde im Folgenden eine einfache quadratische Funktion verwenden, die die genannten Bedingungen erfüllt. Um auch die optimale Firmenanzahl von beiden Typen zu bekommen, muss der Regulator nun eine einheitliche Markteintrittssteuer für alle Firmen erheben und gleichzeitig eine Marktverweilprämie zahlen, die alle Firmen bekommen, die auch in der zweiten Periode produzieren, also alle S-Firmen. In der nächsten Proposition zeige ich, dass eine derartige Regulierung möglich ist und zur sozial optimalen Allokation führt.

**Proposition 7** [Sozial optimale Regulierung ohne Firmendiskriminierung bei frühem Marktaustritt]

*Falls es sozial optimal ist, dass einige Firmen frühzeitig aus dem Markt austreten, kann der Regulator die sozial optimale Allokation erreichen, indem er*

- *den Output beider Firmentypen in der ersten Periode gemäß folgender konkaver quadratischer Outputsubventionsfunktion subventioniert:*

$$S_{out}(y_1) = ay_1 - \frac{b}{2}y_1^2,$$

*a und b sind Konstanten und folgendermaßen definiert:*

$$a = -\delta\epsilon C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) \frac{n_s^* y_1^{s*} - (n_s^* - 1)y_x^*}{y_1^{s*} - y_x^*}, \quad (3.21)$$

$$b = \frac{-\delta\epsilon C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*)}{y_1^{s*} - y_x^*}, \quad (3.22)$$

- *eine Markteintrittssteuer von allen Firmen in der ersten Periode verlangt:*

$$T_{ent} = \frac{-\delta\epsilon C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) \cdot (y_x^*)^2}{2(y_1^{s*} - y_x^*)}, \quad (3.23)$$

- *eine Marktverweilprämie an alle Firmen, die auch in der zweiten Periode produzieren, zahlt:*

$$P_{stay} = \frac{-\epsilon C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) \cdot (y_1^{s*} - y_x^*)}{2}. \quad (3.24)$$

Es gilt dann, dass die Grenzübtersubventionsfunktion im sozialen Optimum die folgenden Werte annimmt:

$$S'_{out}(y_1^{s*}) = -\delta\epsilon(n_s^* - 1)C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) \quad (3.25)$$

$$S'_{out}(y_x^*) = -\delta\epsilon n_s^* C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) \quad (3.26)$$

Der Beweis findet sich im Kapitelanhang.

Aufgrund der Konkavität der Subventionsfunktion sind auch die Bedingungen zweiter Ordnung der Gewinnmaximierung der Firmen erfüllt. Dies bedeutet auch, dass die X-Firmen eine höhere marginale Subvention als die S-Firmen erhalten, da X-Firmen kein Interesse an privatem Lernen haben. Weiterhin gilt, dass die Summe aus der Eintrittssteuer und der Verweilprämie sowohl positiv als auch negativ sein kann.

Abbildung 3.1 verdeutlicht den Unterschied zwischen den beiden Regulierungsmöglichkeiten, also der diskriminierenden Regulierung mit linearen Outputsubventionen und der nicht-diskriminierenden Regulierung mit der Outputsubventionsfunktion. Wenn der Re-

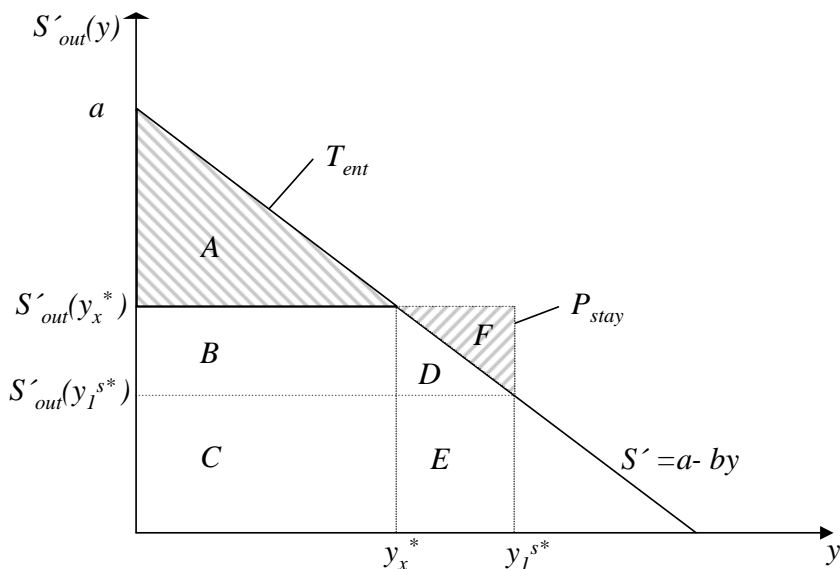


Abbildung 3.1: Vergleich zwischen den beiden Regulierungsmöglichkeiten mit und ohne Diskriminierung

gulator den Markt gemäß Proposition 7 reguliert, zahlen X-Firmen und S-Firmen die Eintrittssteuer  $T_{ent}$ .  $T_{ent}$  entspricht in der Abbildung der Fläche  $A = \frac{1}{2}(a - S'_{out})y_x^*$ . Im Optimum erhalten die X-Firmen Outputsubventionen in Höhe von  $A+B+C$ , die S-Firmen hingegen in Höhe von  $A + B + C + D + E$  gemäß der Grenzübtersubventionsfunktion  $S'_{out} = a - by$ . Insgesamt erhält jede X-Firma also eine Subventionszahlung in Höhe von  $A+B+C - A = B+C$ . Die S-Firmen erhalten außerdem noch die Verweilprämie  $P_{stay}$ ; in der Abbildung entspricht diese der Fläche  $F = \frac{1}{2}[S'_{out}(y_x^*) - S'_{out}(y_I^{s*})][y_I^{s*} - y_x^*]$ . Insgesamt

erhält jede S-Firma also eine Subventionszahlung in Höhe von  $A+B+C+D+E-A+F = B+C+D+E+F$ . Wenn der Regulator hingegen zwischen den Firmen diskriminieren kann (und darf) und gemäß Proposition 6 reguliert, erhalten die X-Firmen im Optimum Outputsubventionen in Höhe von  $S'_{out}y_x^* = B+C$  und die S-Firmen Outputsubventionen in Höhe von  $S'_{out}y_1^{s*} = C+E$ . Außerdem erhalten die S-Firmen noch die Markteintrittsprämie  $S'_{out}y_x^* - S'_{out}y_1^{s*} = -\delta\epsilon C_L^2 y_1^{s*} = B+D+F$ . Es ist klar, dass die effektive Allokation, die aus den zwei Regulierungsmöglichkeiten resultiert, identisch sein muss. Der Vorteil der nicht-diskriminierenden Regulierung besteht darin, dass der Regulator nicht schon im Voraus wissen muss, welche Firma sich wie entscheidet, also ob sie im Markt bleibt oder nach der ersten Periode austritt. Falls der Regulator sich für die diskriminierende Regulierung entscheiden sollte, obwohl er eigentlich gar nicht diskriminieren kann, wird sich die sozial optimale Allokation nicht einstellen. Die S-Firmen würden nämlich die höhere Subvention  $s_{out}^x$  wählen, was ihre Optimalitätsbedingung verändern würde und deswegen in der ersten Periode aus sozialer Sicht zu viel produzieren. Einen Haken hat allerdings auch die nicht-diskriminierende Regulierung: Weil die Verweilprämie erst nach der ersten Periode gezahlt wird, ergibt sich für den Regulator wieder das Problem, dass er letztlich kein bindendes Versprechen bezüglich der Prämienzahlung abgeben kann. In Deutschland sollten jedoch aufgrund von Rechtsschutz auch bindende Versprechen möglich sein.

Aus der Arbeit von Pertrakis, Rasmusen und Roy (1997) wissen wir, dass früher Marktaustritt einiger Firmen bei privatem Lernen sozial optimal sein kann. Auch für teilweise öffentliches Lernen, also  $0 < \epsilon < 1$ , kann früher Marktaustritt optimal sein, wie das folgende Beispiel zeigt:

**Beispiel 4** *Es sei  $P_t = 1000 - Y_t$ ,  $C^1(y_1^i) = 2(y_1^i)^2$  mit  $i = x, s$  und  $C^2(y_2^s, L_s) = (y_2 - 5/6L)^2 + (y_2^s)^2$  und  $\epsilon = 1/1000$ . Dann ergeben sich die Ergebnisse aus Tabelle 3.3.*

Tabelle 3.3: Früher Marktaustritt im sozialen Optimum

	S-Firmen		X-Firmen		p	Y
	y	n	y	n		
1. Periode	2,34	336,27	2,24	91,35	8,94	991,06
2. Periode	2,96	336,27	0	0	6,28	993,72

### Vollständige Spillover der Lerneffekte

In diesem Abschnitt nehme ich an, dass es vollständige Spillover der Lerneffekte gibt, also  $\epsilon = 1$ . Wenn es keine privaten Lerneffekte mehr gibt, gibt es bei spätem Marktzutritt auch keinen Unterschied zwischen den hinzutretenden und verweilenden Firmen, es gilt folglich



$L_s = L_e$ . Damit gibt es keinen Unterschied in den Kostenfunktionen beider Firmentypen, was zur Folge hat, dass S-Firmen in der zweiten Periode keine Gewinne machen können, und damit in der ersten Periode keine Verluste in Kauf nehmen werden um zu lernen. Der Preis in der ersten Periode  $p_1$  entspricht dann dem Minimum der Durchschnittskosten der X-Firmen, die ja gerade einen Gewinn von null erzielen:  $p_1 = (C(y_x^*) + F)/y_x^*$ . Der Preis in der zweiten Periode entspricht dem Minimum der Durchschnittskosten der E-Firmen  $p_2 = (C(y_e^*) + F)/y_e^*$ . Folglich machen alle Firmentypen in allen Perioden einen Gewinn von Null. Bei vollständigen Lerneffekten gilt außerdem, dass später Marktzutritt nur unter folgenden Bedingungen möglich ist:

**Proposition 8** *Wenn es vollständige Spillover der Lerneffekte gibt, also  $\epsilon = 1$ , ist später Marktzutritt einiger Firmen optimal, falls  $-C_L^2 C_{y_2 y_2}^2 + C_L^2 n_2 P_2' - C_{y_2 L}^2 n_2 P_2' > 0$  und  $\delta$  hinreichend klein ist.*

Beweis siehe Kapitelanhang.

Das folgende Beispiel verdeutlicht, dass später Marktzutritt und früher Marktaustritt im Falle vollständiger Spillover der Lerneffekte sowohl im sozialen Optimum als auch im unregulierten Fall möglich sind.

**Beispiel 5** *Es sei  $\epsilon = 1$ ,  $P_t(Y_t) = (100 - Y_t)/\beta$ ,  $C^1(y_1) = 20y_1^2$ ,  $C^2(y_2, L) = 20y_2^2/(1+L)$ . und  $F = 10$ . Für Werte von  $\beta = 2, 5$ ,  $\beta = 3, 3$  und  $\beta = 7$  ergeben sich dann die Ergebnisse von Tabelle 3.4.*

Tabelle 3.4: Marktein- und -austritt bei vollständigen Spillover,  $\epsilon = 1$

Periode	Laissez-faire				Soziales Optimum			
	$\beta = 2, 5$		$\beta = 3, 3$		$\beta = 3, 3$		$\beta = 7$	
	1	2	1	2	1	2	1	2
p	28,28	5,14	28,28	10,22	21,34	5,11	12,83	8,47
y	0,71	3,89	0,71	1,96	0,71	3,91	0,71	2,36
n	41,42	22,39	9,42	33,86	41,85	21,25	14,37	17,24
Y	29,29	87,15	6,66	66,27	29,59	83,12	10,16	40,74

Für  $\beta = 2, 5$  (relativ große Nachfrage) ergibt sich im unregulierten Laissez-Faire-Fall, dass einige Firmen nach der ersten Periode aus dem Markt austreten. Die relativ starke Nachfrage führt zu starken Lerneffekten, so dass Grenzkosten und Preise in der zweiten Periode so gering sind, dass nur noch wenige Firmen mit relativ großem Output im Markt verbleiben können, die Firmenanzahl sinkt also von 41,42 auf 22,39.

Bei  $\beta = 3, 3$  ist die Nachfrage relativ schwächer, so dass im Laissez-Faire in der ersten Periode nur relativ wenige Firmen im Markt aktiv sein können. Aufgrund des Lernens

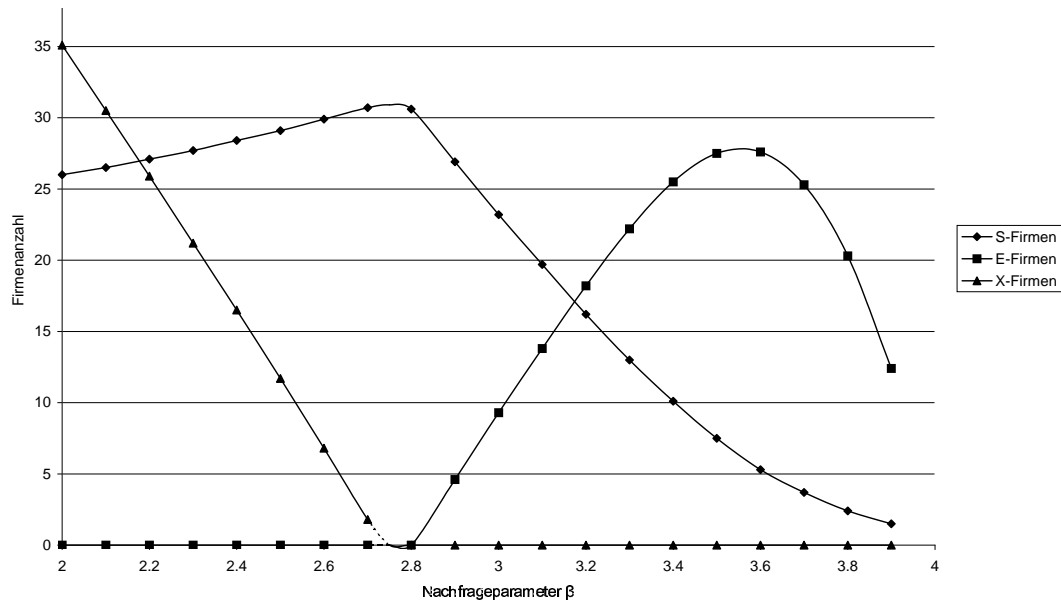


Abbildung 3.2: Anzahl der S-, X- und E-Firmen bei unterschiedlichen Nachfrageparametern

sinken aber die variablen Kosten so, dass in der zweiten Periode der Markt mehr Firmen aufnehmen kann, die Firmenanzahl steigt von 9,42 auf 33,86. Im sozialen Optimum sollte hingegen die Firmenanzahl bei  $\beta = 3,3$  von 41,85 auf 21,25 sinken, es findet also Marktaustritt nach der ersten Periode statt. Aber auch im sozialen Optimum kann es Marktzutritt in der zweiten Periode geben, zum Beispiel wenn wir  $\beta = 7$  wählen.

Weil es wegen der vollständigen Lerneffekte keine Unterschiede mehr zwischen E-Firmen und S-Firmen in der zweiten Periode gibt und analog auch in der ersten Periode keine Unterschiede mehr zwischen S-Firmen und X-Firmen bestehen, könnte es also auch sein, dass gleichzeitig Firmen in den Markt ein- und austreten. Das ist im Grunde aber nur eine Frage der Etikettierung der Firmen.

### Beispiele zu Laissez-Faire und Wohlfahrtsgewinnen durch Eintrittsverbot

In einem weiteren Beispiel möchte ich zeigen, dass auch für teilweise privates Lernen, also  $0 \leq \epsilon \leq 1$ , im Laissez-Faire sowohl Marktein- als auch -austritt möglich sind.

**Beispiel 6** [Marktein- und -austritt im unregulierten Markt] *Es sei  $\epsilon = 0,5$  und  $P_t = 100/\beta - Y_t$ . Außerdem sei  $C^1(y_1) = 20y_1^2$ ,  $C^2(y_2, L) = \frac{20y_2^2}{(1+L)}$ ,  $\delta = 1$  und  $F = 10$ . Wenn wir den Nachfrageparameter  $\beta$  zwischen 2 und 3,9 variieren, erhalten wir Abbildung 3.2. Auf der horizontalen Achse ist der Nachfrageparameter, auf der vertikalen Achse die Firmenanzahl der X-, S- und E-Firmen abgetragen. Bei einer hohen Nachfrage (also einem kleinen  $\beta$ ) sind sowohl X-Firmen als auch S-Firmen im Markt. Bei Erhöhung von  $\beta$  geht die Anzahl der X-Firmen zurück, während die der S-Firmen leicht steigt. In einer kleinen*

Tabelle 3.5: Marktein- und -austritt im unregulierten Fall mit  $\epsilon = 0,5$ ,  $\delta = 1$

	$\beta = 3,3$		$\beta = 2$	
	1. Periode	2. Periode	1. Periode	2. Periode
p	27,43	11,80	28,28	5,89
y, S-Firmen	0,73	1,80	0,72	4,40
y, X-Firmen	0	0	0,71	0
y, E-Firmen	0	1,69	0	0
n, S-Firmen	13,01	13,01	25,97	25,97
n, X-Firmen	0	0	35,05	0
n, E-Firmen	0	22,19	0	0
Y	9,49	61,06	43,43	88,22
II, S-Firmen	-0,634	+0,634	-0,002	+0,002

Spanne um  $\beta = 2,8$  sind nur S-Firmen im Markt.<sup>6</sup> Wenn wir  $\beta$  weiter erhöhen, gibt es nun sowohl S- als auch E-Firmen im Markt. In der Tabelle 3.5 habe ich nochmal explizit alle Variablen für  $\beta = 3,3$  und  $\beta = 2$  aufgeschrieben.

Ein weiteres Ergebnis besteht darin, dass die Möglichkeit von spätem Markteintritt im unregulierten Fall wohlfahrtsmindernd sein kann, die Wohlfahrt also anstiege, wenn Markteintritt verboten würde. Falls der Regulator, aus welchen Gründen auch immer, nicht in der Lage sein sollte, die optimale Regulierung einzuführen und beispielsweise keine Subventionen zahlen kann, kann er das Marktergebnis im Vergleich zum Laissez-Faire immerhin verbessern, wenn er Marktzutritt in der zweiten Periode nicht erlaubt, wie sich aus dem folgenden Beispiel 7 ergibt.

**Beispiel 7** [Wohlfahrtsgewinne durch Eintrittsverbot] *Unter Verwendung derselben inversen Nachfrage- und derselben Kostenfunktionen wie in Beispiel 6 erhalten wir für den unregulierten Laissez-Faire-Fall und für das Eintrittsverbot die Ergebnisse in Tabelle 3.6. Ein Ergebnisvergleich der ersten und zweiten Periode zwischen den beiden Szenarien zeigt, dass der Preis bei Eintrittsverbot in beiden Perioden niedriger und entsprechend der Gesamtoutput in beiden Perioden höher ist.*

Die Ergebnisse von Beispiel 7 folgen aus der Tatsache, dass aufgrund des Eintrittsverbots S-Firmen nicht so viel Konkurrenz in der zweiten Periode haben, eine Konkurrenz, die

<sup>6</sup>Dadurch unterscheidet sich das Ergebnis hier von Baumol, Panzar und Willigs (1982) Ergebnis für Zwei-Produkt-Unternehmen. Dort können zwei Produkte entweder von einer Firma (analog zu S-Firmen) oder von zwei verschiedenen Firmen (analog zu X- und E-Firmen) produziert werden. Sie zeigen, dass es nur bei einer einzigen Parameterkonstellation (und keine Spanne von Konstellationen wie hier) im Gleichgewicht nur Zwei-Produkt-Firmen im Markt gibt. Für alle anderen Parameterwerte gibt es immer zwei Firmentypen im Markt, also den Zwei-Produkt-Firmentyp und einen der beiden Ein-Produkt-Firmentypen. Der Unterschied rührt daher, dass dort das Ergebnis nur von den Kosten der Firmen, aber nicht von der Nachfrage abhängt. Aufgrund der Spillover hängen hier die Kosten auch von der Nachfrage ab, da die Firmenanzahl mit der Nachfrage steigt.

Tabelle 3.6:  $\epsilon = 1, \beta = 3, 3$

	Eintrittsverbot		Laissez-Faire	
	1. Periode	2. Periode	1. Periode	2. Periode
p	25,55	7,54	28,28	10,22
y	0,66	3,14	0,71	1,96
n	23,90	23,90	22,39	33,86
Y	15,69	75,13	6,66	66,27

vom Lernen der S-Firmen profitiert. Ohne später eintretende Firmen gibt es geringere Spillover-Effekte und damit einen höheren Anreiz für S-Firmen, in der ersten Periode mehr zu produzieren um zu lernen. Unter diesen Umständen kann ein Eintrittsverbot also zu einer Wohlfahrtsverbesserung im Vergleich zum unregulierten Fall führen.

### 3.2.3 Komparative Statik

Um die komparativ-statischen Effekte einer Veränderung der Outputsubvention oder Eintrittsprämie zu ermitteln, unterscheiden wir drei mögliche Fälle. Im ersten Fall befinden sich nur S-Firmen, im zweiten Fall sowohl S-Firmen als auch X-Firmen und im dritten Fall sowohl S-Firmen als auch E-Firmen im Markt. Den ersten Fall mit lediglich S-Firmen haben wir bereits in Kapitel 3.1.4 diskutiert.<sup>7</sup> Für die beiden anderen Szenarien ergeben sich nun aber andere Ergebnisse.

**Proposition 9** *Es sei angenommen, dass der Regulator eine Markteintrittsprämie und einheitliche oder differenzierte Outputsubventionen zahlt. Weiter sei angenommen, dass im Marktgleichgewicht mit diesen Subventionen und der Prämie X-Firmen und S-Firmen im Markt sind, also manche Firmen nach der ersten Periode aus dem Markt ausscheiden.*

i) *Es gilt dann, dass eine Erhöhung der Markteintrittsprämie unabhängig davon, ob einheitliche oder differenzierte Outputsubventionen gezahlt werden, zu folgenden Veränderungen führt:*

$$\begin{aligned} \partial Y_1 / \partial s_{ent}^s &= 0, \quad \partial Y_2 / \partial s_{ent}^s > 0, \quad \partial p_1 / \partial s_{ent}^s = 0, \quad \partial p_2 / \partial s_{ent}^s < 0, \\ \partial y_1 / \partial s_{ent}^s &< 0, \quad \partial y_2 / \partial s_{ent}^s < 0, \quad \partial n_s / \partial s_{ent}^s > 0, \quad \partial y_x / \partial s_{ent}^s = 0. \end{aligned}$$

ii) *Wenn der Regulator zwischen X- und S-Firmen unterscheiden kann, führt eine Erhöhung der Outputsubvention für die S-Firmen  $s_{out}^s$  zu folgendem Ergebnis:*

$$\partial Y_1 / \partial s_{out}^s = 0, \quad \partial p_1 / \partial s_{out}^s = 0, \quad \partial y_x / \partial s_{out}^s = 0.$$

<sup>7</sup>Zwar müssen hier im Vergleich zu Kapitel 3.1.4 S-Firmen sowohl in der ersten als auch in der zweiten Periode Fixkosten tragen, was aber an den komparativ-statischen Effekten überhaupt nichts ändert.

iii) Eine Erhöhung der Outputsubvention für X-Firmen  $s_{out}^x$  bewirkt dagegen folgendes:

$$\partial Y_1 / \partial s_{out}^x > 0, \partial p_1 / \partial s_{out}^x < 0, \partial y_x / \partial s_{out}^x = 0.$$

iv) Wenn der Regulator schließlich einen einheitlichen Subventionssatz  $s_{out}^{s,x}$  an beide Firmentypen zahlt, führt eine Subventionserhöhung zu folgendem Ergebnis:

$$\partial Y_1 / \partial s_{out}^{s,x} > 0, \partial p_1 / \partial s_{out}^{s,x} < 0, \partial Y_2 / \partial s_{out}^{s,x} > 0, \partial p_2 / \partial s_{out}^{s,x} < 0, \partial y_x / \partial s_{out}^{s,x} = 0.$$

Im Vergleich zu den komparativ-statischen Effekten mit lediglich S-Firmen sind die Effekte hier tendenziell eindeutiger. Eine Erhöhung der Eintrittsprämie für S-Firmen führt hier in allen Fällen zu einem höheren Gesamtoutput und niedrigeren Preisen in beiden Perioden. Der Output jeder einzelnen S-Firma sinkt, die Anzahl an S-Firmen steigt. Der Output von X-Firmen bleibt unverändert. Im Falle einer Erhöhung der Outputsubvention gibt es schon weniger eindeutige Ergebnisse. Es gilt für alle drei Typen von Outputsubventionen, dass der Output der einzelnen X-Firmen konstant bleibt. Bei einer Erhöhung der einheitlichen Subvention steigt der Gesamtoutput in beiden Perioden bei fallenden Preisen. Bei den differenzierten Outputsubventionen gilt, dass eine Erhöhung nicht zu einem Outputrückgang beziehungsweise einem Preisanstieg in der ersten Periode führen kann. Alle anderen nicht explizit aufgeführten komparativ-statischen Effekte sind nicht eindeutig bestimmbar.

**Proposition 10** *Es sei nun angenommen, dass der Regulator eine Markteintrittsprämie und Outputsubventionen an S-Firmen in der ersten Periode zahlt. Weiter sei angenommen, dass im Marktgleichgewicht mit Eintrittsprämie und Outputsubvention sowohl S- als auch E-Firmen im Markt sind, also manche Firmen in der zweiten Periode in den Markt eintreten. Eine Erhöhung der Eintrittsprämie  $s_{ent}$  bewirkt dann folgendes:*

$$\partial Y_1 / \partial s_{ent} > 0, \partial y_1 / \partial s_{ent} < 0, \partial n_s / \partial s_{ent} > 0, \partial p_1 / \partial s_{ent} < 0,$$

$$\partial Y_2 / \partial s_{ent} > 0, \partial p_2 / \partial s_{ent} < 0.$$

Eine Erhöhung der Eintrittsprämie für S-Firmen erhöht also den Gesamtoutput und senkt die Preise in beiden Perioden. Es wird mehr S-Firmen geben, wobei jede einzelne S-Firma in der ersten Periode weniger produziert. Alle anderen komparativ-statischen Effekte sind nicht eindeutig.

Die Beweise für die Propositionen 9 und 10 finden sich im Kapitelanhang.

### 3.3 Zusammenfassung

Die wesentliche Erkenntnis dieses Kapitels besteht darin, dass Lerneffekte mit Spillover-Effekten zwei Marktunvollkommenheiten zur Folge haben: weder produzieren die Firmen die sozial optimale Menge noch tritt die sozial optimale Anzahl an Firmen in den Markt ein. Der Regulator benötigt daher im Falle einmaliger Fixkosten eine lineare Outputsubvention und eine Markteintrittsprämie (Investitionssubvention), um die sozial optimale Allokation zu erreichen. Die Folge einer derartigen Subventionspolitik wird sein, dass durch die Einführung einer Markteintrittsprämie die Firmenanzahl steigen, aber der Output jeder einzelnen Firma zurückgehen wird und dass durch die Einführung der Outputsubvention in der Regel sowohl Firmenanzahl als auch der Output jeder Firma ansteigen wird.

Wenn Firmen in beiden Perioden Fixkosten zu tragen haben, kann es vorkommen, dass einige Firmen bereits nach der ersten Periode aus dem Markt ausscheiden. Dies ist aber keine Folge von Verdrängungsstrategien anderer Firmen, sondern der Entscheidung der austretenden Firmen, weniger zu lernen und damit nur in der ersten Periode wettbewerbsfähig zu sein. Aufgrund der Spillover sind ebenfalls Parameterkonstellationen denkbar, bei denen einige Firmen erst in der zweiten Periode in den Markt eintreten. Sowohl früher Marktaus- als auch später Markteintritt sind sowohl im sozialen Optimum als auch im unregulierten Wettbewerbsfall möglich. Lerneffekte führen also nicht zwangsläufig zu Marktkonzentration wie dies die Arbeiten von Dasgupta und Stiglitz (1988), Cabral und Riordan (1994), Jin, Perote-Peña und Troege (2004) sowie Henderson (1972) nahelegen.

Während im Falle zweimaliger Fixkosten und spätem Markteintritt der Regulator das Subventionsschema mit einer Outputsubvention und einer Markteintrittsprämie übernehmen kann, muss der Regulator bei frühem Marktaustritt auf einen komplizierteren Mechanismus zurückgreifen, um die sozial optimale Allokation zu erreichen. Denn in diesem Fall sind in der ersten Periode zwei unterschiedliche Firmentypen im Markt, die unterschiedliche externe Effekte verursachen. Der Regulator muss also zwischen diesen Firmentypen diskriminieren können. Ich habe gezeigt, dass dies mit Hilfe einer geeigneten konkaven Outputsubventionsfunktion gelingt; die Firmen offenbaren freiwillig ihren Typ und wählen den jeweils sozial optimalen Grenzsabventionssatz.

## 3.4 Anhang

### Stabilitätsbedingungen:

Im Folgenden benutze ich diese Kurzformen:  $P'_1 = P'(ny_1)$  und  $P'_2 = P'(ny_2)$ . Totales Ableiten der Gleichungen (3.5) - (3.7) nach  $s_{ent}$  und  $s_{out}$  ergibt folgendes System:

$$M * \begin{pmatrix} \partial y_1 / \partial s_{ent} \\ \partial y_2 / \partial s_{ent} \\ \partial n / \partial s_{ent} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \quad (3.27)$$

$$M * \begin{pmatrix} \partial y_1 / \partial s_{out} \\ \partial y_2 / \partial s_{out} \\ \partial n / \partial s_{out} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ -y_1 \end{pmatrix} \quad (3.28)$$

$M$  ist eine 3 x 3 - Matrix:

$$\begin{pmatrix} nP'_1 - C^1_{y_1 y_1} - \delta(1 + \epsilon(n-1))C^2_{LL} & -\delta C^2_{y_2 L} & P'_1 y_1 - \delta \epsilon C^2_{LL} y_1 \\ -(1 + \epsilon(n-1))C^2_{y_2 L} & nP'_2 - C^2_{y_2 y_2} & P'_2 y_2 - \epsilon C^2_{y_2 L} y_1 \\ nP'_1 y_1 - \delta \epsilon(n-1)C^2_L & \delta n P'_2 y_2 & P'_1 y_1^2 + \delta P'_2 y_2^2 - \delta \epsilon C^2_L y_1 \end{pmatrix}$$

Für Stabilität muss  $M$  negativ definit sein. Also müssen die drei Hauptminoren die folgenden Bedingungen erfüllen:  $M_1 < 0$ ,  $M_2 > 0$ ,  $M_3 < 0$ .  $M_1 < 0$  und  $M_2 > 0$  folgt aus den Modellannahmen.  $M_3$  ergibt sich aus der Annahme, dass das Gleichgewicht stabil ist.

### Beweis von Proposition 2:

Auflösen der Gleichung (3.27) nach  $\partial y_1 / \partial s_{ent}$ ,  $\partial y_2 / \partial s_{ent}$  und  $\partial n / \partial s_{ent}$  sowie den Effekt auf den Gesamtoutput  $\partial Y_1 / \partial s_{ent}$ ,  $\partial Y_2 / \partial s_{ent}$  ergibt bei konstantem  $s_{out}$ :

$$\begin{aligned} \partial y_1 / \partial s_{ent} &= \frac{1}{|M|} [\delta \epsilon y_1 [C^2_{y_2 y_2} C^2_{LL} - (C^2_{y_2 L})^2] - \delta \epsilon n y_1 C^2_{LL} P'_2 \\ &\quad - P'_1 C^2_{y_2 y_2} y_1 + n P'_1 P'_2 y_1 + \delta C^2_{y_2 L} P'_2 y_2] < 0 \\ \partial y_2 / \partial s_{ent} &= \frac{1}{|M|} [(1 - \epsilon) C^2_{y_2 L} P'_1 y_1 - \delta(1 + \epsilon(n-1)) C^2_{LL} P'_2 y_2 \\ &\quad + n P'_1 P'_2 y_2 - C^1_{y_1 y_1} \underbrace{[P'_2 y_2 - \epsilon C^2_{y_2 L} y_1]}_{\text{Bedingung (3.10)}}] < 0 \\ \partial n / \partial s_{ent} &= \frac{1}{|M|} [\delta(1 + \epsilon(n-1))(C^2_{LL} n P'_2 - C^2_{y_2 y_2} C^2_{LL} + (C^2_{y_2 L})^2) \\ &\quad + (C^1_{y_1 y_1} - n P'_1)(n P'_2 - C^2_{y_2 y_2})] > 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \partial Y_1 / \partial s_{ent} &= \frac{1}{|M|} [n P'_2 \overbrace{(C^1_{y_1 y_1} y_1 + \delta C^2_{y_2 L} y_2)}^{\text{Bedingung (3.11)}} - C^1_{y_1 y_1} C^2_{y_2 y_2} y_1 \\ &\quad + \delta(1 - \epsilon) y_1 ((C^2_{y_2 L})^2 - C^2_{LL} C^2_{y_2 y_2} + C^2_{LL} n P'_2)] > 0 \\ \partial Y_2 / \partial s_{ent} &= \frac{1}{|M|} [n P'_1 \overbrace{(C^2_{y_2 y_2} y_2 + (1 - \epsilon) C^2_{y_2 L} y_1)}^A - C^1_{y_1 y_1} (C^2_{y_2 y_2} y_2 - n C^2_{y_2 L} y_1) \\ &\quad + \delta(1 + \epsilon(n-1)) y_2 ((C^2_{y_2 L})^2 - C^2_{LL} C^2_{y_2 y_2})] > 0 \end{aligned}$$

Wenn Bedingung (3.10) erfüllt ist, erhält man  $\partial y_1/\partial s_{ent} < 0$ ,  $\partial y_2/\partial s_{ent} < 0$  und  $\partial n/\partial s_{ent} > 0$ . Wenn Bedingung (3.11) erfüllt ist, ergibt sich  $\partial Y_1/\partial s_{ent} > 0$ .  $A$  ist für alle  $\epsilon$  positiv, falls Bedingung (3.12) erfüllt ist. Dann gilt  $\partial Y_2/\partial s_{ent} > 0$ .

### Beweis von Proposition 3:

Auflösen der Gleichung (3.28) nach  $\partial y_1/\partial s_{out}$ ,  $\partial y_2/\partial s_{out}$ ,  $\partial n/\partial s_{out}$ ,  $\partial Y_1/\partial s_{out}$  und  $\partial Y_2/\partial s_{out}$  bei konstantem  $s_{ent}$  und unter Verwendung der Bedingungen (3.10) - (3.14) ergibt:

$$\begin{aligned}
\partial y_1/\partial s_{out} &= \frac{1}{|M|} \delta \{ \epsilon C_L^2 [n P_2' - C_{y_2 y_2}^2] y_1 + [C_{y_2 y_2}^2 C_{LL}^2 - (C_{y_2 L}^2)^2] \epsilon y_1^2 \\
&\quad - \epsilon n y_1 P_2' \underbrace{[C_{LL}^2 y_1 + C_{y_2 L}^2 y_2]}_{\text{Bedingung (3.14)}} + P_2' y_2 \underbrace{[C_{y_2 y_2}^2 y_2 + C_{y_2 L}^2 y_1]}_B \} \\
\partial y_2/\partial s_{out} &= \frac{1}{|M|} [-\delta(1 + \epsilon(n - 1)) P_2' y_2 \underbrace{[C_{LL}^2 y_1 + C_{y_2 L}^2 y_2]}_{\text{Bedingung (3.14)}} \\
&\quad + C_{y_1 y_1}^1 \underbrace{[C_{y_2 L}^2 \epsilon y_1 - P_2' y_2]}_{\text{Bedingung (3.10)}} + \delta \epsilon C_L^2 [C_{y_2 L}^2 y_1 + (n - 1) P_2' y_2] < 0 \\
\partial n/\partial s_{out} &= \frac{1}{|M|} \{ [\delta \epsilon (n - 1) C_L^2 - C_{y_1 y_1}^1 y_1] [C_{y_2 y_2}^2 - n P_2'] \\
&\quad + \delta [1 + \epsilon(n - 1)] [-C_{y_2 y_2}^2 C_{LL}^2 + (C_{y_2 L}^2)^2] y_1 \\
&\quad + n P_2' \underbrace{[C_{LL}^2 y_1 + C_{y_2 L}^2 y_2]}_{\text{Bedingung (3.14)}} \} > 0 \\
\partial Y_1/\partial s_{out} &= \frac{1}{|M|} \{ \delta [(1 - \epsilon) [(C_{y_2 L}^2)^2 - C_{LL}^2 C_{y_2 y_2}^2] y_1^2 \\
&\quad + n P_2' \underbrace{[(1 - \epsilon) C_{LL}^2 y_1^2 + (2 - \epsilon) C_{y_2 L}^2 y_1 y_2 + C_{y_2 y_2}^2 y_2^2]}_D \\
&\quad - (C_{y_2 y_2}^2 - n P_2') y_1 \underbrace{(\delta \epsilon C_L^2 + C_{y_1 y_1}^1 y_1)}_{\text{Bedingung (3.13)}} \} > 0 \\
\partial Y_2/\partial s_{out} &= \frac{1}{|M|} \{ \delta \epsilon n C_L^2 \underbrace{[C_{y_2 L}^2 y_1 + C_{y_2 y_2}^2 y_2]}_{\text{Bedingung (3.12)}} \\
&\quad + \delta (1 + \epsilon(n - 1)) y_1 y_2 [(C_{y_2 L}^2)^2 - C_{LL}^2 C_{y_2 y_2}^2] \\
&\quad - C_{y_2 y_2}^2 y_2 \underbrace{(\delta \epsilon C_L^2 + C_{y_1 y_1}^1 y_1)}_{\text{Bedingung (3.13)}} \} > 0
\end{aligned}$$

Wenn  $\epsilon$  klein ist und  $B$  Bedingung (3.12) erfüllt, ist der Zähler negativ und  $\partial y_1/\partial s_{out} > 0$ . Bei steigendem  $\epsilon$  ist es möglich, dass  $\partial y_1/\partial s_{out} < 0$ , weil alle anderen Terme im Zähler positiv sind, wenn Bedingung (3.14) gilt. Wenn die Bedingungen (3.14) und (3.10) erfüllt sind, sind alle Zählerterme von  $\partial y_2/\partial s_{out}$  positiv und daher gilt  $\partial y_1/\partial s_{out} < 0$ . Wenn Bedingung (3.14) erfüllt ist, sind alle Zählerterme von  $\partial n/\partial s_{out}$  negativ und  $\partial n/\partial s_{out} > 0$ .



$D$  ist positiv für alle  $\varepsilon$ , falls Bedingung (3.12) erfüllt ist. Wenn außerdem Bedingung (3.13) gilt, erhält man  $\partial Y_1 / \partial s_{out} > 0$ . Schließlich gilt, wenn die Bedingungen (3.12) und (3.13) erfüllt sind,  $\partial Y_2 / \partial s_{out} > 0$ .

### Die Bedingungen erster Ordnung der Wohlfahrtsfunktion aus Kapitel 3.2.1:

Wenn es nur E- und S-Firmen gibt, lauten die Bedingungen erster Ordnung wie folgt:

$$W_{y_1^s} = P_1(Y_1) - C_{y_1^s}^1(y_1^s) + \delta[-C_L^2(y_2^s; L_s)(1 + \varepsilon(n_s - 1)) - n_e C_{L_e}^2(y_e; L_e)\varepsilon] = 0 \quad (3.29)$$

$$W_{y_e} = P_2(Y_2) - C_{y_e}^2(y_e, L_e) = 0 \quad (3.30)$$

$$W_{y_2^s} = P_2(Y_2) - C_{y_2^s}^2(y_2^s; L_s) = 0 \quad (3.31)$$

$$W_{n_s} = P_1(Y_1)y_1^s - C^1(y_1^s) - F \quad (3.32)$$

$$+ \delta[P_2(Y_2)y_2^s - C^2(y_2^s; L_s) - n_s C_{L_s}^2(y_2^s; L_s)\varepsilon y_1^s - n_e C_{L_e}^2(y_e; L_e)\varepsilon y_e - F] = 0$$

$$W_{n_e} = P_2(Y_2)y_e - C^2(y_e, L_e) - F = 0 \quad (3.33)$$

Wenn es nur X- und S-Firmen gibt, ergeben sich die folgenden Bedingungen erster Ordnung:

$$W_{y_1^s} = P_1(Y_1) - C_{y_1^s}^1(y_1^s) + \delta[-C_L^2(y_2^s; L)[1 + \varepsilon(n_s - 1)]] = 0 \quad (3.34)$$

$$W_{y_x} = P_1(Y_1) - C_{y_x}^1(y_x) + \delta[-C_L^2(y_2^s; L)\varepsilon n_s] = 0 \quad (3.35)$$

$$W_{y_2^s} = P_2(Y_2) - C_{y_2^s}^2(y_2^s; L) = 0 \quad (3.36)$$

$$W_{n_s} = P_1(Y_1)y_1^s - C^1(y_1^s) - F \quad (3.37)$$

$$+ \delta[P_2(Y_2)y_2^s - C^2(y_2^s; L) - n_s C_L^2(y_2^s; L)\varepsilon y_1^s - F] = 0$$

$$W_{n_x} = P_1(Y_1)y_x - C^1(y_x) - F + \delta[-n_s C_L^2(y_2^s; L)\varepsilon y_x] = 0 \quad (3.38)$$

**Beweis von Proposition 5:** Angenommen, später Marktzutritt sei optimal. Die Bedingung erster Ordnung des sozialen Optimums sind durch die Gleichungen (3.29) - (3.33) gegeben. In der dezentralisierten Volkswirtschaft ergibt sich die Nullgewinnbedingung und die Bedingung erster Ordnung einer S-Firma, die sowohl Outputsubventionen als auch eine Eintrittsprämie erhält, wie folgt:

$$P_1(Y_1)y_1^s - C^1(y_1^s) - F + s_{ent} + s_{out}y_1^s \quad (3.39)$$

$$+ \delta[P_2(Y_2)y_2^s - C^2(y_2^s, L_s) - F] = 0$$

$$P_1(Y_1) + s_{out} - C_{y_1^s}^1(y_1^s) - \delta C_L^2(y_2^s, L_s) = 0 \quad (3.40)$$

Ein Vergleich der Gleichungen (3.39) und (3.40) mit (3.34) und (3.38) ergibt (3.16) und (3.17). Da die später in den Markt eintretenden Firmen keine Externalität verursachen, ist auch keine Regulierung notwendig.

**Beweis von Proposition 6:** Angenommen, dass früher Marktaustritt optimal ist. Wegen Proposition 4 ist  $n_e$  in Gleichung (3.15) null.

Die Bedingungen erster Ordnung für das soziale Optimum sind durch die Gleichungen (3.34) - (3.38) gegeben. In einer dezentralisierten Volkswirtschaft mit einer Eintrittsprämie für die S-Firmen und Outputsubventionen  $s_{out}^s$  und  $s_{out}^x$  ergeben sich die Nullgewinnbedingungen und die Bedingungen erster Ordnung für die beiden Firmentypen wie folgt:

$$P_1(Y_1)y_1^s - C^1(y_1^s) - F + s_{out}^s y_1^s + s_{ent}^s \quad (3.41)$$

$$+ \delta [P_2(Y_2)y_2^s - C^2(y_2^s, L_s) - F] = 0$$

$$P_1(Y_1)y_x - C^1(y_x) - F + s_{out}^x y_x = 0 \quad (3.42)$$

$$P_1(Y_1) - C_{y_1^s}^1(y_1^s) + s_{out}^s - \delta C_{L_s}^2(y_2^s, L_s) = 0 \quad (3.43)$$

$$P_2(Y_2) - C_{y_2^s}^2(y_2^s, L_s) = 0 \quad (3.44)$$

$$P_1(Y_1) - C_{y_x}^1(y_x) - s_{out}^x = 0 \quad (3.45)$$

Dabei gilt, dass  $s_{out}^s$  durch (3.19),  $s_{ent}^s$  durch (3.20) und  $s_{out}^x$  durch (3.18) gegeben ist. Wenn diese Ausdrücke in die Gleichungen (3.41) - (3.45) substituiert werden, ergeben sich durch Umordnen die Bedingungen erster Ordnung der sozial optimalen Allokation (3.34) - (3.38).

**Beweis von Proposition 7:** Es sei angenommen, dass früher Marktaustritt optimal ist. Aufgrund von Proposition 4 ist  $n_e$  null in Gleichung (3.15). Die Bedingungen erster Ordnung für das soziale Optimum bezüglich  $n_s$ ,  $n_x$  und dem Output sind durch die Gleichungen (3.34) - (3.38) charakterisiert. In einer dezentralisierten Volkswirtschaft mit einer Eintrittssteuer, einer Verweilprämie und einer nicht-linearen konkaven Outputsubventionsfunktion in der ersten Periode ergeben sich die folgenden Nullgewinnbedingungen und Bedingungen erster Ordnung bezüglich des Outputs der X- und S-Firmen.

$$P_1(Y_1)y_1^s + ay_1^s - \frac{b}{2}(y_1^s)^2 - C^1(y_1^s) - T_{ent} - F \quad (3.46)$$

$$+ \delta [P_2(Y_2)y_2^s - C^2(y_2^s, L_s) + P_{stay} - F] = 0$$

$$P_1(Y_1)y_x + ay_x - \frac{b}{2}(y_x)^2 - C^1(y_x) - T_{ent} - F = 0 \quad (3.47)$$

$$P_1(Y_1) + a - by_1^s - C_{y_1^s}^1(y_1^s) - \delta C_{L_s}^2(y_2^s, L_s) = 0 \quad (3.48)$$

$$P_2(Y_2) - C_{y_2^s}^2(y_2^s, L_s) = 0 \quad (3.49)$$

$$P_1(Y_1) + a - by_x - C_{y_x}^1(y_x) = 0 \quad (3.50)$$

Dabei sind  $a$ ,  $b$ ,  $T_{ent}$  und  $P_{stay}$  durch (3.21), (3.22), (3.23) und (3.24) definiert. Substitution dieser Ausdrücke in die Gleichungen (3.46) - (3.50) ergibt unter Berücksichtigung der Eindeutigkeit des Gleichgewichts die Bedingungen erster Ordnung der sozial optimalen Allokation der Gleichungen (3.34) - (3.38). Aufgrund der Konkavität der Subventionsfunktion  $S_{out}(y_1)$  sind auch die Bedingungen zweiter Ordnung der Firmen erfüllt.

**Beweis von Proposition 8:** Ohne Verlust an Allgemeingültigkeit sei  $\tilde{L}_i = \gamma L_i$  mit  $i = e, s$  und  $\gamma \geq 0$ . Der Parameter  $\gamma$  spiegelt die Stärke des gesamten Lerneffekts (ob

privat oder öffentlich) wider. Wenn  $\gamma = 0$  ist, gibt es überhaupt keine Lerneffekte. Wenn  $\epsilon = 1$ , also bei vollständigen Spillover der Lerneffekte, gilt  $L_e = L_s$ , das heißt später eintretende Firmen haben dieselbe Kostenfunktion wie die S-Firmen. Der soziale Planer muss (kann) daher zwischen den beiden Firmentypen nicht unterscheiden. Gleiches gilt in der ersten Periode: Bei vollständigen Spillover gibt es auch keinen Unterschied zwischen X-Firmen und S-Firmen. Es reicht daher, sich die Gesamtfirmenanzahl  $n_1$  und  $n_2$  in den beiden Perioden anzuschauen. Wenn  $n_1 < n_2$  gibt es späten Marktzutritt, bei  $n_1 > n_2$  frühzeitigen Austritt. Es sei nun zunächst angenommen, dass sowohl  $\delta = 0$  und auch  $\gamma = 0$ , der Regulator also extrem kurzsichtig ist und auch keinerlei Lerneffekte vorliegen. Dann ist offensichtlich, dass bei gleicher Nachfrage auch die Firmenanzahl konstant sein muss, also  $n_1 = n_2$  ist. Das komparativ-statische Ergebnis einer Erhöhung von  $\gamma$  bei  $\delta = 0$  ergibt nun:

$$\frac{\partial n_1}{\partial \gamma} = 0 \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial n_2}{\partial \gamma} = \frac{-C_{\bar{L}}^2 C_{y_2 y_2}^2 + C_{\bar{L}}^2 n_2 P_2' - C_{y_2 \bar{L}}^2 n_2 P_2'}{-C_{y_2 y_2}^2 P_2' y_2} \begin{matrix} \geq 0 \\ < 0 \end{matrix} \quad (3.52)$$

Wenn nun gilt, dass  $-C_{\bar{L}}^2 C_{y_2 y_2}^2 + C_{\bar{L}}^2 n_2 P_2' - C_{y_2 \bar{L}}^2 n_2 P_2' > 0$ , steigt die Firmenanzahl in der zweiten Periode mit steigendem Lerneffekt, es gibt also späten Marktzutritt. Die komparativ-statischen Effekte bezüglich  $\delta$  zeigen nun, dass  $n_1$  steigt,  $n_2$  jedoch sowohl steigen als auch fallen kann. Weil aber die Funktionen stetig sind, muss für hinreichend kleines  $\delta$  gelten, dass in der zweiten Periode mehr Firmen im Markt sind.

### Beweis von Proposition 9

Stabilitätsbedingung:

Totales Ableiten der Bedingungen erster Ordnung der S- und X-Firmen sowie der Nullgewinnbedingungen nach den verschiedenen Subventionssätzen  $s_{ent}^s$ ,  $s_{out}^s$ ,  $s_{out}^x$  und  $s_{out}^{s,x}$  ergibt folgendes System:

$$M * \begin{pmatrix} \partial y_1^s / \partial s_{ent}^s \\ \partial y_2^s / \partial s_{ent}^s \\ \partial n_s / \partial s_{ent}^s \\ \partial y_x / \partial s_{ent}^s \\ \partial n_x / \partial s_{ent}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.53)$$

$$M * \begin{pmatrix} \partial y_1^s / \partial s_{out}^s \\ \partial y_2^s / \partial s_{out}^s \\ \partial n_s / \partial s_{out}^s \\ \partial y_x / \partial s_{out}^s \\ \partial n_x / \partial s_{out}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ -y_1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.54)$$

$$M * \begin{pmatrix} \partial y_1^s / \partial s_{out}^x \\ \partial y_2^s / \partial s_{out}^x \\ \partial n_s / \partial s_{out}^x \\ \partial y_x / \partial s_{out}^x \\ \partial n_x / \partial s_{out}^x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ -y_x \end{pmatrix} \quad (3.55)$$

$$M * \begin{pmatrix} \partial y_1^s / \partial s_{out}^{s,x} \\ \partial y_2^s / \partial s_{out}^{s,x} \\ \partial n_s / \partial s_{out}^{s,x} \\ \partial y_x / \partial s_{out}^{s,x} \\ \partial n_x / \partial s_{out}^{s,x} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ -y_1 \\ -1 \\ -y_x \end{pmatrix} \quad (3.56)$$

$M$  ist hier eine 5x5-Matrix:

$$\begin{pmatrix} n_s P_1' - C_{y_1^s y_1^s}^1 - \delta(1 + \epsilon(n_s - 1))C_{LL}^2 & -\delta C_{y_2^s L}^2 & P_1' y_1^s - \delta \epsilon C_{LL}^2 y_1^s & n_x P_1' - \delta \epsilon n_x C_{LL}^2 & P_1' y_x - \delta \epsilon C_{LL}^2 y_x \\ -(1 + \epsilon(n_s - 1))C_{y_2^s L}^2 & n_s P_2' - C_{y_2^s y_2^s}^2 & P_2' y_2^s - \epsilon C_{y_2^s L}^2 y_1^s & -\epsilon n_x C_{y_2^s L}^2 & -\epsilon y_x C_{y_2^s L}^2 \\ n_s P_1' y_1^s - \delta \epsilon(n_s - 1)C_L^2 & \delta n_s P_2' y_2^s & P_1'(y_1^s)^2 + \delta P_2'(y_2^s)^2 - \delta \epsilon C_L^2 y_1^s & n_x P_1' y_1^s - \delta \epsilon n_x C_L^2 & P_1' y_1^s y_x - \delta \epsilon C_L^2 y_x \\ n_s P_1' & 0 & P_1' y_1^s & P_1' n_x - C_{y_x y_x}^1 & P_1' y_x \\ n_s P_1' y_x & 0 & P_1' y_1^s y_x & P_1' y_x n_x & P_1' y_x^2 \end{pmatrix}$$

Für ein stabiles Gleichgewicht muss  $M$  negativ definit sein. Für die fünf Hauptminoren muss also gelten:  $M_1 < 0$ ,  $M_2 > 0$ ,  $M_3 < 0$ ,  $M_4 > 0$  und  $M_5 < 0$ .  $M_1$  und  $M_2$  folgen aus den Modellannahmen.  $M_3 < 0$ ,  $M_4 > 0$  und  $M_5 < 0$  folgen aus der Annahme, dass das Gleichgewicht stabil ist.

Auflösen der Gleichungen (3.53) - (3.56) nach den jeweiligen partiellen Ableitungen ergibt:

$$\frac{\partial y_1^s}{\partial s_{ent}^s} = \frac{1}{|M|} (-\delta C_{y_x y_x}^1 C_{y_2^s L}^2 P_1' P_2' y_2^s (y_x)^2) < 0 \quad (3.57)$$

$$\frac{\partial y_2^s}{\partial s_{ent}^s} = \frac{1}{|M|} [(C_{y_x y_x}^1 C_{y_1^s y_1^s}^1 P_1' P_2' y_2^s (y_x)^2) + (1 - \epsilon) \delta C_{y_x y_x}^1 C_{LL}^2 P_1' P_2' y_2^s (y_x)^2] < 0 \quad (3.58)$$

$$\frac{\partial y_x}{\partial s_{ent}^s} = \frac{0}{|M|} = 0 \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_s}{\partial s_{ent}^s} &= \frac{1}{|M|} [C_{y_1^s y_1^s}^1 C_{y_x y_x}^1 C_{y_2^s y_2^s}^2 P_1'(y_x)^2 - C_{y_1^s y_1^s}^1 C_{y_x y_x}^1 P_1' P_2' n_s (y_x)^2 \\ &+ (1 - \epsilon) C_{y_x y_x}^1 P_1'(y_x)^2 (C_{LL}^2 C_{y_2^s y_2^s}^2 - (C_{y_2^s L}^2)^2) \\ &- (1 - \epsilon) n_s C_{y_x y_x}^1 C_{LL}^2 n_s P_1' P_2' (y_x)^2] > 0 \end{aligned} \quad (3.60)$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial s_{ent}^s} = \frac{\partial n_s}{\partial s_{ent}^s} y_1^s + \frac{\partial y_1^s}{\partial s_{ent}^s} n_s + \frac{\partial n_x}{\partial s_{ent}^s} y_x + \frac{\partial y_x}{\partial s_{ent}^s} n_x = 0 \quad (3.61)$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial s_{ent}^s} = \frac{\partial n_s}{\partial s_{ent}^s} y_1^s + \frac{\partial y_1^s}{\partial s_{ent}^s} n_s \quad (3.62)$$

$$= \frac{1}{|M|} [C_{y_x y_x}^1 P_1' y_2^s (y_x)^2 (C_{y_1^s y_1^s}^1 C_{y_2^s y_2^s}^2 + (1 - \epsilon) \delta (C_{LL}^2 C_{y_2^s y_2^s}^2 - (C_{y_2^s L}^2)^2))] > 0$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial s_{ent}^s} = P_1' \frac{\partial Y_1}{\partial s_{ent}^s} = 0 \quad (3.63)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial s_{ent}^s} = P_2' \frac{\partial Y_2}{\partial s_{ent}^s} < 0 \quad (3.64)$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial s_{out}^s} = \frac{0}{|M|} = 0 \quad (3.65)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial s_{out}^s} = \frac{0}{|M|} = 0 \quad (3.66)$$

$$\frac{\partial y_x}{\partial s_{out}^s} = \frac{0}{|M|} = 0 \quad (3.67)$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial s_{out}^x} = -\frac{1}{P'_1} > 0 \quad (3.68)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial s_{out}^x} = \frac{1}{P'_1} < 0 \quad (3.69)$$

$$\frac{\partial y_x}{\partial s_{out}^x} = \frac{0}{|M|} = 0 \quad (3.70)$$

$$(3.71)$$

$$\frac{\partial Y_1}{\partial s_{out}^{s,x}} = -\frac{1}{P'_1} > 0 \quad (3.72)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial s_{out}^{s,x}} = \frac{1}{P'_1} < 0 \quad (3.73)$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial s_{out}^{s,x}} = \frac{-1}{|M|} \delta^2 \epsilon C_{y_x y_x}^1 P'_2 y_2^s y_x^2 [C_L^2 C_{y_2^s L}^2 + y_2 (C_{y_2^s y_2^s}^2 C_{LL}^2 - (C_{y_2^s L}^2)^2)] < 0 \quad (3.74)$$

$$\frac{\partial y_x}{\partial s_{out}^{s,x}} = \frac{0}{|M|} = 0 \quad (3.75)$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial s_{out}^{s,x}} = \frac{1}{|M|} \delta \epsilon C_{y_x y_x}^1 C_L^2 y_2^s (y_x)^2 (C_{y_1^s y_1^s}^1 C_{y_2^s y_2^s}^2 + \delta (C_{LL}^2 C_{y_2^s y_2^s}^2 - (C_{y_2^s L}^2)^2)) > 0 \quad (3.76)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial s_{out}^{s,x}} = P'_2 \frac{\partial Y_2}{\partial s_{out}^{s,x}} < 0 \quad (3.77)$$

### Beweis von Proposition 10:

Totales Ableiten der Bedingungen erster Ordnung der S- und E-Firmen sowie der Nullgewinnbedingungen nach der Eintrittsprämie  $s_{ent}$  ergibt folgendes System:

$$M * \begin{pmatrix} \partial y_1^s / \partial s_{ent} \\ \partial y_2^s / \partial s_{ent} \\ \partial n_s / \partial s_{ent} \\ \partial y_e / \partial s_{ent} \\ \partial n_e / \partial s_{ent} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.78)$$

$M$  ist erneut eine 5x5-Matrix:

$$\begin{pmatrix} n_s P'_1 - C_{y_1^s y_1^s}^1 - \delta(1 + \epsilon(n_s - 1)) C_{LL}^2 & -\delta C_{y_2^s L}^2 & P'_1 y_1^s - \delta \epsilon C_{LL}^2 y_1^s & 0 & 0 \\ -(1 + \epsilon(n_s - 1)) C_{y_2^s L}^2 & n_s P'_2 - C_{y_2^s y_2^s}^2 & n_e P'_2 & P'_2 y_e & \\ n_s P'_1 y_1^s - \delta \epsilon (n_s - 1) C_L^2 & \delta n_s P'_2 y_2^s & P'_1 (y_1^s)^2 + \delta P'_2 (y_2^s)^2 - \delta \epsilon C_L^2 y_1^s & \delta n_e P'_2 y_2^s & \delta P'_2 y_e y_2^s \\ -\epsilon n_s C_{y_e L_e}^2 & n_s P'_2 & P'_2 y_2^s - \epsilon C_{y_e L_e}^2 y_1^s & P'_2 n_e - C_{y_e y_e}^2 & P'_2 y_e \\ \epsilon n_s C_{L_e}^2 & n_s P'_2 y_e & P'_2 y_2^s y_e - \epsilon C_{L_e}^2 y_1^s & P'_2 y_e n_e & P'_2 y_e^2 \end{pmatrix}$$

Für ein stabiles Gleichgewicht muss  $M$  negativ definit sein. Für die fünf Hauptminoren muss also gelten:  $M_1 < 0$ ,  $M_2 > 0$ ,  $M_3 < 0$ ,  $M_4 > 0$  und  $M_5 < 0$ .  $M_1$  und  $M_2$  folgen aus

den Modellannahmen.  $M_3 < 0$ ,  $M_4 > 0$  und  $M_5 < 0$  folgen aus der Annahme, dass das Gleichgewicht stabil ist.

Auflösen des Gleichungssystems (3.78) nach den partiellen Ableitungen ergibt:

$$\frac{\partial Y_1}{\partial s_{ent}} = \frac{-1}{|M|} C_{y_e L_e}^2 P_2' y_1^s y_e^2 (C_{y_1^s y_1^s}^1 C_{y_2^s y_2^s}^2 + \delta(1 - \epsilon)(C_{y_2^s y_2^s}^2 C_{L_s L_s}^2 - (C_{y_2^s L_s}^2)^2) > 0 \quad (3.79)$$

$$\frac{\partial p_1}{\partial s_{ent}} = P_1' \frac{\partial Y_1}{\partial s_{ent}} < 0 \quad (3.80)$$

$$\frac{\partial Y_2}{\partial s_{ent}} = \frac{-1}{|M|} \epsilon C_{L_e}^2 C_{y_e L_e}^2 y_1^s y_e (C_{y_1^s y_1^s}^1 C_{y_2^s y_2^s}^2 + \delta(1 - \epsilon)(C_{y_2^s y_2^s}^2 C_{L_s L_s}^2 - (C_{y_2^s L_s}^2)^2) > 0 \quad (3.81)$$

$$\frac{\partial p_2}{\partial s_{ent}} = P_2' \frac{\partial Y_2}{\partial s_{ent}} < 0 \quad (3.82)$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial s_{ent}} = \frac{1}{|M|} C_{y_e L_e}^2 P_2' y_1^s y_e [\delta \epsilon y_e (C_{L_s L_s}^2 C_{y_2^s y_2^s}^2 - (C_{y_2^s L_s}^2)^2) + (\delta \epsilon C_{L_e}^2 C_{y_2^s L_s}^2 - C_{y_2^s y_2^s}^2 P_1' y_e)] < 0 \quad (3.83)$$

$$\frac{\partial n_s}{\partial s_{ent}} = \frac{-1}{|M|} C_{y_e L_e}^2 P_2' y_e \quad (3.84)$$

$$*[\delta y_e (1 + \epsilon(n_s - 1))(C_{L_s L_s}^2 C_{y_2^s y_2^s}^2 - (C_{y_2^s L_s}^2)^2) + \delta \epsilon C_{L_e}^2 C_{y_2^s L_s}^2 n_s + C_{y_2^s y_2^s}^2 y_e (C_{y_1^s y_1^s}^1 - n_s P_1')] > 0$$

# Kapitel 4

## Lerneffekte bei Cournotwettbewerb

In Kapitel 3 habe ich das soziale Optimum für eine Industrie ermittelt, die sich steigenden Grenzkosten, Fixkosten (einmalig oder in beiden Perioden) und Lerneffekten mit Spillover gegenübersteht. Ich habe dann untersucht, wie das Marktergebnis ohne Regulierung und wie die optimale Regulierung bei vollkommenem Wettbewerb mit freiem Markteintritt aussieht. Die Annahme des vollkommenen Wettbewerbs möchte ich in diesem Kapitel aufgeben und gehe nun davon aus, dass die Firmen - bei weiterhin freiem Marktzutritt - miteinander im Cournotwettbewerb stehen. Neu im Vergleich zur bisherigen Literatur, die ich in Abschnitt 2.1.2 skizziert habe, ist zum einen, dass ich steigende Grenzkosten unterstelle sowie gleichzeitig Spillover und freien Marktzutritt zulasse. Für die zwei Fälle von ein- und zweimaligen Fixkosten untersuche ich wie im vorigen Kapitel das Firmenverhalten sowie die optimale Politik des Regulators.

Zusätzlich zu den weiterhin gültigen Annahmen an die Kosten- und die Nachfragefunktionen aus Kapitel 3 nehme ich nun noch an, dass die Nachfragefunktion nicht zu konvex ist:<sup>1</sup>

$$P_t'' y_t + P_t' < 0 \quad (4.1)$$

### 4.1 Einmalige Fixkosten

In diesem Abschnitt untersuche ich den Fall, dass die Fixkosten  $F$  nur einmalig anfallen und daher, wie in Kapitel 3 erläutert, die Firmen entweder in beiden oder in keiner Periode produzieren. Es gibt also nur S-Firmen.

---

<sup>1</sup>Diese Annahme ist notwendig, um das Vorzeichen eines in diesem Kapitel ermittelten strategischen Effekts bestimmen zu können.

### 4.1.1 Gleichgewichtskonzept und Firmenverhalten

Fudenberg und Tirole (1983) haben darauf hingewiesen, dass man zwischen zwei Gleichgewichtskonzepten unterscheiden muss. Zum einen kann man annehmen, dass es den Firmen möglich ist, sich im Vorhinein auf ihre Produktionsmengen in beiden Perioden festzulegen und damit nicht ihre beste Reaktion in der zweiten Periode auf die Kostenstrukturen - und damit der Produktionsmengen - der anderen Firmen vorhersehen. Zum anderen kann man annehmen, dass die Firmen ihre und die Entscheidungen der anderen Firmen in der zweiten Periode durchaus antizipieren und die Mengenentscheidung für die zweite Periode auch erst in der zweiten Periode treffen; wir erhalten dann ein teilspielperfektes Gleichgewicht. Ich werde im Folgenden annehmen, dass die Firmen die strategischen Effekte berücksichtigen, das heißt, ich betrachte die teilspielperfekten Gleichgewichte. Zu Vergleichszwecken werde ich allerdings auch die nicht-teilspielperfekten Gleichgewichte betrachten. Obwohl ich annehme, dass die Firmen sich nicht in der ersten Periode auf ihre Produktionsmengen festlegen können oder wollen, nehme ich gleichwohl an, dass der Regulator sich bereits in der ersten Periode bezüglich seiner Subventions- oder Steuerpolitik in der zweiten Periode festlegen kann. Das bedeutet, dass nicht untersuche, wie Firmen mit ihrer Produktionsmenge in der ersten Periode die Regulierungspolitik in der zweiten Periode strategisch beeinflussen können. Leahy und Neary (1999) haben diese Möglichkeit in ihrem Handelsmodell mit Lerneffekten analysiert.

Unter Vorwegnahme der optimalen Politik, die ich in Abschnitt 4.1.2 entwickle, nehme ich an, dass der Regulator Outputsubventionen  $s_1^{out}$  und  $s_2^{out}$  in der ersten und zweiten Periode sowie eine Markteintrittsprämie  $s_{ent}$  zahlt. Bei einer solchen Politik ergibt sich für Firma  $i$  folgende Gewinngleichung:

$$\pi_i = (P_1(Y_1) + s_1^{out})y_{1,i} - C^1(y_{1,i}) - F + s^{ent} + \delta[(P_2(Y_2) + s_2^{out})y_{2,i} - C^2(y_{2,i}; L_i)] \quad (4.2)$$

Nachdem der Regulator sich auf seine Politik festgelegt hat, ist die Spielstruktur für die Firmen wie folgt: In der ersten Periode entscheiden die Firmen, ob sie in den Markt eintreten sollen oder nicht, und entscheiden dann gleichzeitig, welche Outputmenge sie in der ersten Periode produzieren wollen. Durch die Wahl ihrer Produktionsmenge legen die Firmen auch fest, wieviel sie lernen wollen.

Das Spiel kann durch Rückwärtsinduktion gelöst werden. In der zweiten Periode setzen die Firmen Grenzkosten gleich Grenzerlös. Die Bedingung erster Ordnung und damit die Nash-Gleichgewichtsbedingung für die zweite Periode lautet daher:

$$\pi_{y_{2,i}} = P_2'(Y_2)y_{2,i} + P_2(Y_2) + s_2^{out} - C_{y_{2,i}}^2(y_{2,i}; L_i) = 0 \quad (4.3)$$

In der ersten Periode maximieren die Firmen ihre Gewinne unter der Nebenbedingung 4.3, wodurch sie ihren Einfluss auf die Produktionsmengen in der zweiten Periode berücksich-



tigen. Wir können das Maximierungsproblem daher als Lagrangemaximierungsproblem schreiben, wobei die Lagrangefunktion  $\Lambda_i$  wie folgt gegeben ist:

$$\Lambda_i = \pi_i + \lambda \pi_{y_2,i} + \sum_{j \neq i}^n \mu_j \pi_{y_2,j} \quad (4.4)$$

Wenn wir dieses Maximierungsproblem für jede Firma unter Ausnützung der Tatsache lösen, dass im Gleichgewicht wegen der Symmetrie der Firmen sich alle Firmen gleich verhalten müssen, und die Terme entsprechend umstellen, erhalten wir die folgende Gleichung (Herleitung im Kapitelanhang):

$$P_1 + P'_1 y_1 + s_1^{out} = C_{y_1}^1 + \delta C_L^2 + E, \quad (4.5)$$

wobei  $E$  der strategische Effekt ist, der wie folgt definiert ist

$$E = \frac{\delta C_{y_2 L}^2 (n-1) P'_2 y_2 [(1-2\epsilon) P'_2 + \epsilon C_{y_2 y_2}^2 + (1-\epsilon) P''_2 y_2]}{(C_{y_2 y_2}^2 - P'_2)(C_{y_2 y_2}^2 - (n+1) P'_2 - n P''_2 y_2)} \quad (4.6)$$

Die Firmen verhalten sich also strategisch, da sie den Grenzerlös der ersten Periode gleich den Nettogrenzkosten plus dem strategischen Effekt setzen. Die Nettogrenzkosten bestehen aus den Grenzkosten der ersten Periode und dem privaten Grenzlernerneffekt, also der Kostensenkung der Produktion in der zweiten Periode, die durch das Lernen (den Output) in der ersten Periode ausgelöst wird. Der strategische Effekt erklärt sich durch den Einfluss, den die Outputentscheidungen jeder Firma in der ersten Periode auf die Grenzkosten und den Output der Wettbewerber in der zweiten Periode haben. Weil es keine Markteintrittsschranken gibt, werden schließlich genau so viele Firmen im Markt sein, dass die Gewinne null sind:

$$\pi = (P_1(Y_1) + s_1^{out}) y_1 - C^1(y_1) - F + s^{ent} + \delta [(P_2(Y_2) + s_2^{out}) y_2 - C^2(y_2; L)] = 0 \quad (4.7)$$

Man beachte, dass der strategische Effekt nicht nur aufgrund der Spillover ausgelöst wird. Selbst bei lediglich privatem Lernen ( $\epsilon = 0$ ) werden Firmen strategisch agieren, wie bereits Fudenberg and Tirole (1983) gezeigt haben. Da die Firmen mit ihrer privaten Lernentscheidung ihre Kosten in der zweiten Periode beeinflussen, können sie damit auch ihre Maximierungsbedingung strategisch beeinflussen.

Unter der Annahme, dass die Nachfragefunktion nicht zu konvex ist, können wir das Vorzeichen des strategischen Effekts  $E$  in Abhängigkeit von lediglich  $\epsilon$ , der Spilloverrate, bestimmen:

**Proposition 11** *Falls Bedingung (4.1) gilt, ist der strategische Effekt  $E$  dann und nur dann positiv (negativ, null), wenn  $\epsilon > (<, =) \frac{P'_2 + P''_2 y_t}{2P'_2 + P''_2 y_t - C_{y_2 y_2}^2}$ .*

Der strategische Effekt ist damit für rein privates Lernen ( $\epsilon = 0$ ) negativ und für vollständig öffentliches Lernen ( $\epsilon = 1$ ) positiv. Dies bedeutet, dass für  $E < 0$  der normale strategische Cournoteffekt  $P'_1 y_1$  reduziert wird, jedoch für  $E > 0$  (und damit viel Spillover) der Cournoteffekt noch verstärkt wird. Folglich werden wir bei hauptsächlich privatem Lernen eine Preissetzung beobachten, die näher an den Preisen bei vollkommenem Wettbewerb liegt. Dies bestätigt ein Ergebnis von Leahy und Nearys (1999), die in ihrem Oligopolhandelsmodell einen negativen strategischen Lerneffekt mit privaten Lerneffekten gefunden haben. Schließlich gilt, dass je kleiner  $\delta$  ist, um so kleiner fällt auch der strategische Effekt  $E$  aus. Bei vollkommen myopischen Firmen ist auch  $E = 0$ .

### 4.1.2 Die optimale Politik bei Cournotwettbewerb

In dem bisher beschriebenen Modell beobachten wir drei verschiedene Arten von Marktversagen. Erstens beobachten wir in beiden Perioden Marktmacht. Zweitens beobachten wir öffentliches Lernen, das zu suboptimalen Outputentscheidungen und einer suboptimalen Firmenanzahl im Markt führt, wie ich bereits in Kapitel 3 gezeigt habe. Drittens gibt es hier nun noch den strategischen Effekt  $E$ . Bekanntlich führt Cournotwettbewerb mit freiem Markteintritt zu übermäßigem Markteintritt und zu geringerem Output jeder einzelnen Firma. Wie wir gesehen haben, kann der strategische Effekt diese Unvollkommenheiten vergrößern oder verkleinern. Die sozial optimale Allokation, die ich bereits in Abschnitt 3.1.2 charakterisiert habe, kann nun mit folgenden drei Instrumenten erreicht werden. In beiden Perioden müssen Outputsubventionen  $s_1^{out}$  und  $s_2^{out}$  gezahlt werden und zusätzlich noch eine Markteintrittsprämie  $s^{ent}$ . Durch Vergleich der Bedingungen (3.2) - (3.4) des sozialen Optimums mit den Bedingungen erster Ordnung der Firmen (4.5), (4.3) und der Nullgewinnbedingung der Firmen (4.7) zeigt sich, dass der Regulator die sozial optimale Allokation mit Hilfe folgender drei Instrumente erreichen kann:

$$s_1^{out} = -P'_1(Y_1^*)y_1^* - \delta C_{L^*}^2(y_2^*; L^*)\epsilon(n^* - 1) + E \stackrel{\leq}{=} 0 \quad (4.8)$$

$$s_2^{out} = -P'_2(Y_2^*)y_2^* > 0 \quad (4.9)$$

$$s^{ent} = \underbrace{[P'_1(Y_1^*)(y_1^*)^2]}_{<0} + \underbrace{\delta P'_2(Y_2^*)(y_2^*)^2}_{<0} \underbrace{[-\delta C_{L^*}^2(y_2^*; L^*)\epsilon y_1^*]}_{>0} - \underbrace{E y_1^*}_{\stackrel{\leq}{=} 0} \stackrel{\leq}{=} 0 \quad (4.10)$$

Mit  $y_1^*$ ,  $L^*$ , etc. bezeichne ich wieder die sozial optimalen Mengen. Der erste Term der Outputsubvention in der ersten Periode  $s_1^{out}$ , gegeben durch Gleichung (4.8), internalisiert die Marktmacht in der ersten Periode, der zweite Term die Spillover und der dritte Term den strategischen Lerneffekt. Weil die ersten beiden Terme positiv sind, ist  $s_1^{out}$  normalerweise auch positiv. Theoretisch ist zwar auch denkbar, dass  $s_1^{out} < 0$ , dass also der Output der ersten Periode besteuert werden sollte, falls  $E < 0$  und  $E$  außerdem die beiden negativen Effekte dominiert. Dies scheint allerdings relativ unwahrscheinlich, da

sich keine Beispiele finden ließen, in denen  $E$  auch nur annähernd die beiden anderen Effekte ausgeglichen hat. Die Outputsubvention der zweiten Periode (4.9) internalisiert die Marktmacht der zweiten Periode und ist positiv. Die Markteintrittsprämie  $s^{ent}$  kann in vier Terme zerlegt werden. Die ersten beiden Terme sind negativ und gleichen den üblichen Cournoteffekt aus, der zu übermäßigem Markteintritt führt. Die Spillover induzieren zu geringen Markteintritt, daher ist der dritte Term in Gleichung (4.10) positiv. Der strategische Effekt  $E$  kann wie erwähnt sowohl negativ als auch positiv sein. Da die ersten drei Terme in Gleichung (4.10) unterschiedliche Vorzeichen haben, könnten sich die Effekte zufälligerweise gegenseitig aufheben, so dass auch ohne Regulierung die optimale Firmenanzahl im Markt ist, dass also  $s^{ent} = 0$  optimal ist.  $s^{ent}$  muss also auch keine Markteintrittsprämie, sondern kann auch eine Eintrittssteuer sein.

Die Ergebnisse fasse ich in der folgenden Proposition zusammen:

**Proposition 12** *In einem Markt, in dem Firmen im Cournotwettbewerb mit freiem Markteintritt stehen und sowohl private als auch öffentliche Lerneffekte existieren, kann der Regulator die sozial optimale Allokation durch Einführung einer Outputsubvention oder -steuer in der ersten Periode  $s_1^{out}$ , durch eine Outputsubvention in der zweiten Periode  $s_2^{out}$  und einer Markteintrittsprämie oder -steuer  $s^{ent}$  erreichen, wobei  $s_1^{out}$ ,  $s_2^{out}$  und  $s^{ent}$  durch die Gleichungen (4.8) - (4.10) definiert sind.*

Abgesehen von den Termen in den Gleichungen (4.8) und (4.10), die sich aufgrund der öffentlichen Lerneffekte ergeben, ist das Budget des Regulators für die zur Internalisierung der strategischen Effekte benötigten Instrumente ausgeglichen. Daraus folgt, dass der Regulator für rein privates Lernen, also  $\epsilon = 0$ , das soziale Optimum mit einem ausgeglichenen Budget erreichen kann, da dann  $s_1^{out}y_1^* + \delta s_2^{out}y_2^* - s^{ent} = 0$  ist.

Die vorangegangenen Ergebnisse werden durch das Beispiel 8 veranschaulicht. Ich vergleiche hier die Wohlfahrt, die Produktionsmengen, die Preise und die Firmenanzahl für zwei unterschiedliche Spilloverraten für vier verschiedene Allokationsmechanismen, nämlich das soziale Optimum, teilspielperfekten Cournotwettbewerb, nicht-teilspielperfekten Cournotwettbewerb mit bindender Mengenfestlegung zu Beginn und vollkommenen Wettbewerb.

**Beispiel 8** *Es sei  $P_t = 100 - Y_t$ ,  $F = 10$ ,  $\delta = 1$ ,  $C^1(y_1) = 2y_1^2$ ,  $C^2(y_2) = (y_2^2 - \alpha L)^2 + y_2^2$  und  $\alpha = 0,02$ . Wir erhalten dann für  $\epsilon = 0,1$  bzw.  $\epsilon = 0,7$  die Ergebnisse aus Tabelle 4.1. Die entsprechenden Steuern und Subventionen, die nötig sind, um im teilspielperfekten Gleichgewicht die sozial optimale Allokation zu erreichen, sind durch  $s_1^{out} = 2,36$ ,  $s^{ent} = -5,93$  und  $s_2^{out} = 1,73$  für  $\epsilon = 0,7$  sowie durch  $s_1^{out} = 1,91$ ,  $s^{ent} = -5,05$  und  $s_2^{out} = 1,59$  für  $\epsilon = 0,1$  gegeben. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Wohlfahrt im*

Tabelle 4.1: Vergleich verschiedener Allokationsmechanismen

	$\epsilon = 0.7$				$\epsilon = 0.1$			
	SO	TPGG	NTPGG	VW	SO	TPGG	NTPGG	VW
$y_1$	1,698	1,3768	1,3798	1,692	1,591	1,29538	1,29504	1,589
$y_2$	1,732	1,4134	1,4160	1,737	1,592	1,30022	1,29992	1,595
$n$	55,3	67,61	67,48	55,1	59,1	72,234	72,251	59,0
$p_1$	6,15	6,913	6,895	6,75	5,99	6,429	6,432	6,30
$p_2$	4,28	4,444	4,456	4,32	5,93	6,080	6,079	5,95
$Y_1$	93,8	93,087	93,105	93,2	940	93,571	93,568	93,7
$Y_2$	95,72	95,556	95,544	95,69	94,07	93,920	93,921	94,05
$E$		+0,0399				-0,005		
$W$	8925,6	8898,05	8898,58	8925,4	8812,92	8788,19	8788,13	8812,87

Abkürzungen: SO = Soziales Optimum, TPGG = teilspielperfektes Gleichgewicht, NTPGG = nicht-teilspielperfektes Gleichgewicht, VW = Vollkommener Wettbewerb, W = Wohlfahrt

*teilspielperfekten Gleichgewicht höher (niedriger) als im nicht-teilspielperfekten Gleichgewicht ist, wenn  $E < 0$  ( $E > 0$ ).*

### 4.1.3 Eine Bemerkung zur Spilloverrate

In allen Modellen dieser Arbeit nehme ich an, dass die Spilloverrate exogen ist und vom Regulator nicht beeinflusst werden kann. Der Regulator kann daher die Wohlfahrt nur verbessern, indem er mittels der eben beschriebenen Subventionspolitik die sozial optimale Allokation für einen gegebenen Spilloverparameter erreicht. Es könnte nun aber durchaus sein, dass der Regulator in der Realität Möglichkeiten hat, die Spilloverrate zu erhöhen, sei es, dass er Unternehmen zwingt, ihre Produktionsanlagen für Besucher zu öffnen oder sei es, dass er den Austausch unter Managern und Ingenieuren verschiedener Firmen fördert. Dies kann unter Umständen unter Wohlfahrtgesichtspunkten wesentlich besser sein als bei einer gegebenen Spilloverrate die sozial-optimale Allokation zu erreichen, wie sich auch in Beispiel 8 zeigt:<sup>2</sup> Die Wohlfahrt ist für  $\epsilon = 0,7$  in allen Fällen höher als für  $\epsilon = 0,1$ . Selbst wenn sich das Marktgleichgewicht für eine bestimmte Spilloverrate nicht im sozialen Optimum einstellt (z.B. das teilspielperfekte Gleichgewicht für  $\epsilon = 0,7$ ) kann aufgrund der niedrigeren Gesamtkosten für alle Firmen durch die Spillover die Wohlfahrt dennoch höher als im sozialen Optimum mit einer niedrigeren Spilloverrate sein (wie hier für  $\epsilon = 0,1$ ).

<sup>2</sup>Spence (1981) erhält für etwas andere Modellannahmen dasselbe Ergebnis. Wie in Abschnitt 2.1.2 erwähnt, zeigen Ghemawat und Spence (1985), dass in der Regel eine höhere Spilloverrate wohlfahrtssteigernd ist.

## 4.2 Fixkosten in beiden Perioden - später Markteintritt und früher Marktaustritt

### 4.2.1 Modellerweiterung

Im Folgenden gehe ich nun davon aus, dass in beiden Perioden Fixkosten entstehen. Wie in Kapitel 3 nehme ich an, dass die Fixkosten in beiden Perioden gleich sind, also  $F_1 = F_2 = F$ . Erneut bezeichne ich die Firmen, die in beiden Perioden produzieren, als S-Firmen, diejenigen, die nur in der ersten Periode produzieren, als X-Firmen und die, die nur in der zweiten Periode produzieren, als E-Firmen. Die Notation der Mengen und Firmen erfolgt ebenfalls analog zu Abschnitt 3.2. Da die Wohlfahrt unabhängig von der Marktform ist, ist diese weiterhin durch Gleichung (3.15) charakterisiert und die Bedingungen erster Ordnung des sozialen Optimums durch die Gleichungen (3.29) - (3.38) definiert.

### 4.2.2 Später Markteintritt

#### Das Gleichgewichtskonzept und das Firmenverhalten

Wenn später Markteintritt optimal und ein Teil des Lernens privat ist ( $\epsilon \neq 1$ ), wird der Wissensbestand für E-Firmen von dem der S-Firmen verschieden sein. Die Kostenfunktionen und ihre strategische Outputreduktion sind daher ebenfalls unterschiedlich. S-Firmen haben geringere variable Kosten und produzieren daher mehr als E-Firmen. Unter Vorwegnahme der (beziehungsweise einer möglichen) optimalen Politik, die ich in Abschnitt 4.2.2 diskutiere, soll es dem Regulator möglich sein, in beiden Perioden Outputsubventionen  $s_1^{out}$  und  $s_2^{out}$  zu zahlen. Weiter kann dieser eine Markteintrittsgebühr (oder Prämie)  $s_1^{ent}$  in der ersten Periode sowie eine zweistufige Markteintrittsgebühr  $T$  verlangen. Die zweistufige Gebühr  $T$  bewirkt, dass Firmen ihren wahren Typ offenbaren.

Mit diesen Regulierungsinstrumenten ergibt sich für eine S-Firma  $i$  die folgende Gewinngleichung:

$$\begin{aligned} \pi_i^s = & P_1(Y_1)y_{1,i}^s - C^1(y_{1,i}^s) - F + s_1^{out}y_{1,i}^s + s_1^{ent} \\ & + \delta[P_2(Y_2)y_{2,i}^s - C^2(y_{2,i}^s; L_{s,i}) - F + s_2^{out}y_{2,i}^s - T] \end{aligned} \quad (4.11)$$

Die Gewinngleichung einer E-Firma  $k$  lautet:

$$\pi_k^e = P_2(Y_2)y_{e,k} - C^2(y_{e,k}; L_{e,k}) - F + s_2^{out}y_{e,k} - T \quad (4.12)$$

Ein Gleichgewicht mit freiem Marktzutritt ist dann gegeben, wenn die Gewinne aller Firmen gleich null sind.

Erneut löse ich das Spiel mit Hilfe von Rückwärtsinduktion. Die Bedingungen erster Ordnung der zweiten Periode lauten:

$$\pi_{y_{2,s,i}}^s = P_2'(Y_2)y_{2,i}^s + P_2(Y_2) + s_2^{out} - C_{y_{2,i}^s}^2(y_{2,i}^s; L_{s,i}) = 0 \quad \text{für } i = 1, \dots, n_s \quad (4.13)$$

$$\pi_{y_{e,k}}^e = P_2'(Y_2)y_{e,k} + P_2(Y_2) + s_2^{out} - C_{y_{e,k}}^2(y_{e,k}; L_{e,k}) = 0 \quad \text{für } k = 1, \dots, n_e \quad (4.14)$$

Bei gegebener Firmenanzahl maximieren die S-Firmen ihre Gewinne unter Berücksichtigung ihres Einflusses auf die Produktionsmengen der zweiten Periode. Wie in Abschnitt 4.1 löse ich das Maximierungsproblem mit Hilfe einer Lagrangefunktion. Die Lagrangefunktion  $\Lambda_i$  ist gegeben durch:

$$\Lambda_{i,s} = \pi_i^s + \lambda \pi_{y_{2,i}^s}^s + \sum_{j \neq i}^{n_s} \mu_j \pi_{y_{2,j}^s}^s + \sum_{k=1}^{n_e} \gamma_k \pi_{y_{e,k}}^e \quad (4.15)$$

Die Bedingungen erster Ordnung von  $\Lambda_i$  bezüglich  $y_{1,i}^s$ ,  $y_{2,i}^s$ ,  $y_{2,j}^s$ ,  $y_{e,k}$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$  und  $\gamma$  finden sich im Anhang. Ähnlich wie in Abschnitt (4.1) erhalte ich durch Auflösen und Umstellen eine Gleichung, die das symmetrische Gleichgewichtsverhalten der S-Firmen in der ersten Periode darstellt (Details im Kapitelanhang):

$$P_1 + P_1' y_1^s + s_1^{out} = C_{y_1^s}^1 + \delta C_{L_s}^2 + E_e \quad (4.16)$$

Der strategische Lerneffekt ist hier durch  $E_e$  gegeben. Die ausführliche Formel findet sich in Gleichung (4.70) im Kapitelanhang.  $E_e$  sieht zwar komplizierter aus als  $E$  (der strategische Effekt, falls es weder späten Markteintritt noch frühen Marktaustritt gibt), unterscheidet sich allerdings nur hinsichtlich des zusätzlichen strategischen Einfluss auf die E-Firmen. Der strategische Effekt hängt nicht von den Spillover-Effekten ab. Selbst bei rein privatem Lernen haben Firmen einen Anreiz sich strategisch zu verhalten, da die Firmen mit ihrer privaten Lernentscheidung in der ersten Periode ihre Kostenstruktur und damit auch ihre Zielfunktion in der zweiten Periode verändern.

## Die optimale Politik

Ich möchte nun Regulierungsmöglichkeiten vorstellen, die bei Cournotwettbewerb zur sozial optimalen Allokation führen. Es zeigt sich, dass der Regulator (wie in Abschnitt 3.2.2) einen Mechanismus finden muss, der Firmen unterschiedlichen Typs dazu bringt, unterschiedliche Instrumente zu wählen, damit die sozial optimale Allokation erreicht wird. Ich werde zunächst die Regulierung vorstellen, bei der der Regulator zwischen Firmen diskriminieren kann und ihre Instrumentenwahl einschränken kann. Danach zeige ich eine Regulierungsalternative auf, bei der die Firmen aus dem Instrumentenmenü die Instrumente freiwillig so wählen, dass sich die sozial optimale Allokation ergibt.

Da in der ersten Periode nur S-Firmen aktiv sind, ergibt sich hier noch kein Unterschied in der Regulierung. Um das Cournotverhalten, die Spillover und den strategischen Lerneffekt in der ersten Periode zu internalisieren, zeigt sich durch einen Vergleich von (4.16) und (3.29), dass der Regulator eine Outputsubvention  $s_1^{out}$  benötigt. Die sozial optimalen Outputniveaus bezeichne ich mit  $y_1^{s*}, y_e^*$  usw.

$$s_1^{out} = -P_1'(Y_1^*)y_1^{s*} - \delta\epsilon[C_L^2(y_2^{s*}; L_s^*)(n_s^* - 1) + n_e^*C_L^2(y_e^*, L_e^*)] + E_e \stackrel{\leq}{=} 0 \quad (4.17)$$

In der zweiten Periode ergibt sich nun das Problem, dass bei unvollständigen Spillover zwei unterschiedliche Firmentypen mit unterschiedlichen Kostenstrukturen im Markt aktiv sind. Weil E-Firmen höhere variable Kosten haben, ist zu erwarten, dass diese im Gleichgewicht weniger Output als S-Firmen produzieren. Wenn sie weniger produzieren, ist auch ihre strategische Outputreduzierung geringer. Der marginale strategische Anreiz der E-Firmen unterscheidet sich also von dem der S-Firmen. Die marginalen Subventionssätze, die den Firmen gezahlt werden müssen, um eine sozial optimale Allokation zu ermöglichen, sind daher:

$$S_2'(y_2^{s*}) = -P_2'(Y_2^*)y_2^{s*} \quad (4.18)$$

$$S_2'(y_e^*) = -P_2'(Y_2^*)y_e^* \quad (4.19)$$

An und für sich kann der Regulator die unterschiedlichen Firmentypen voneinander unterscheiden, da diese in verschiedenen Perioden beitreten. Er könnte daher die sozial optimale Allokation erreichen, in dem er lineare Outputsubventionen, die den optimalen Grenzsabventionssätzen (4.18) und (4.19) entsprechen, und außerdem eine Eintrittsprämie (oder Gebühr)  $\tilde{s}_1^{ent}$  für S-Firmen zahlt sowie eine Eintrittsgebühr  $t_2^{ent}$  verlangt, die die E-Firmen in der zweiten Periode entrichten müssen.

$$\tilde{s}_1^{ent} = y_1^{s*} \underbrace{[P_1'(Y_1^*)y_1^{s*}]_{<0}}_{<0} \underbrace{-\delta C_{L_s^*}^2(y_2^{s*}; L_s^*)\epsilon]_{>0}}_{>0} + \underbrace{\delta P_2'(Y_2^*)(y_2^{s*})^2}_{<0} - \underbrace{E_e y_1^{s*}}_{\geq 0} \stackrel{\leq}{=} 0 \quad (4.20)$$

$$t_2^{ent} = \underbrace{-P_2'(Y_2^*)(y_e^*)^2}_{>0} \quad (4.21)$$

In den Gleichungen (4.11) - (4.16) habe ich bereits die Instrumente antizipiert, die für die Regulierung ohne Diskriminierung benötigt werden. Wenn wir diese durch die Instrumente ersetzen, die durch die Gleichungen (4.17) - (4.21) gegeben sind, zeigt sich durch Vergleichen von (4.11), (4.12), (4.13), (4.14) und (4.16) mit (3.29) - (3.33), dass die sozial optimale Allokation erreicht wird.

Es ist allerdings denkbar, dass es rechtlich wiederum nicht möglich ist, unterschiedlichen Firmen unterschiedliche Outputsubventionen zu zahlen. Wenn die Firmen zwischen den unterschiedlichen Outputsubventionen frei wählen dürften, würden natürlich alle Firmen

den höheren Subventionssatz wählen, was zu einer suboptimalen Allokation führen würde. Eine Lösungsmöglichkeit besteht dann darin, ein Regulierungsmenü aus Subventionen und Gebühren einzuführen, bei dem die Firmen freiwillig so ihre Subventionen und Gebühren wählen, dass das Ergebnis ihres privaten Optimierungskalküls zu einer Allokation führt, die mit der sozial optimalen übereinstimmt. Das folgende Regulierungsmenü führt nun zu einem teilspielperfekten Nashgleichgewicht, das gleichzeitig sozial optimal ist:

- i. In der ersten Periode erhalten die Firmen eine einheitliche Outputsubvention  $s_1^{out}$  definiert durch (4.17) und eine Markteintrittsprämie beziehungsweise -gebühr  $s_1^{ent}$ , die wie folgt definiert ist:

$$s_1^{ent} = y_1^{s*} \left[ \underbrace{P_1'(Y_1^*) y_1^{s*}}_{<0} \underbrace{- \delta C_{L_s^*}^2(y_2^{s*}; L_s^*) \epsilon}_{>0} \right] - \underbrace{E_e y_1^{s*}}_{\leq 0} \stackrel{\leq}{\geq} 0 \quad (4.22)$$

- ii. In der zweiten Periode erhalten alle Firmen eine einheitliche Subvention  $s_2^{out}$  und zahlen darüberhinaus eine zweistufige Gebühr  $T$ , die wie folgt definiert sind:

$$s_2^{out} = -P_2'(Y_2^*) y_2^{s*} \quad (4.23)$$

$$T = \begin{cases} -P_2'(Y_2^*) y_2^{s*} y_e^* & \text{wenn } y_2 \leq y_e^* \\ -P_2'(Y_2^*) (y_2^{s*})^2 & \text{wenn } y_2 > y_e^* \end{cases} \quad (4.24)$$

Beweis: Es sei angenommen, dass alle Firmen die sozial optimalen Mengen produzieren. Es muss nun gezeigt werden, dass es weder für S- noch für E-Firmen einen Anreiz gibt, von dieser Strategie abzuweichen. Mit dieser Regulierungspolitik sind die Bedingungen erster Ordnung der S-Firmen bezüglich  $y_1^s$  und  $y_2^s$  und ihre Gewinne gleich null. Ein Abweichen von dieser Strategie würde zu Verlusten führen. Wenn die S-Firmen ihren Output auf  $y_e^*$  reduzieren würden, würde das zwar zu einer Einsparung bei der Gebühr  $T$  in Höhe von  $-P_2'(Y_2^*) y_2^{s*} (y_2^{s*} - y_e^*)$  führen; es würde sich allerdings nicht lohnen, da sich die Outputsubventionen in gleicher Höhe verringern würden. Die Nullgewinnbedingung der E-Firmen ist ebenfalls erfüllt. Allerdings ist die Bedingung erster Ordnung hinsichtlich  $y_e$  nicht gleich null, sondern positiv, wenn  $y_e^*$  produziert wird. Folglich gibt es keinen Anreiz, weniger zu produzieren. Es lohnt aber auch nicht, mehr zu produzieren, weil die E-Firmen eine höhere Gebühr  $T$  zu zahlen haben, sobald  $y_2 > y_e^*$ . E-Firmen würden dann Verluste machen. Es folgt, dass keine Firma einen Anreiz hat, von der sozial optimalen Strategie abzuweichen.

Mit Hilfe von Abbildung 4.1 kann diese Argumentation veranschaulicht werden. S-Firmen erhalten insgesamt Outputsubventionen in Höhe von  $A+B+C+D+E+F=s_2^{out} y_2^{s*}$  und zahlen eine Eintrittsgebühr von  $T = -P_2'(Y_2^*) (y_2^{s*})^2$ . Die E-Firmen erhalten insgesamt Outputsubventionen in Höhe von  $A+B+F$  und zahlen eine Gebühr  $T = -P_2'(Y_2^*) y_2^{s*} y_e^*$ .



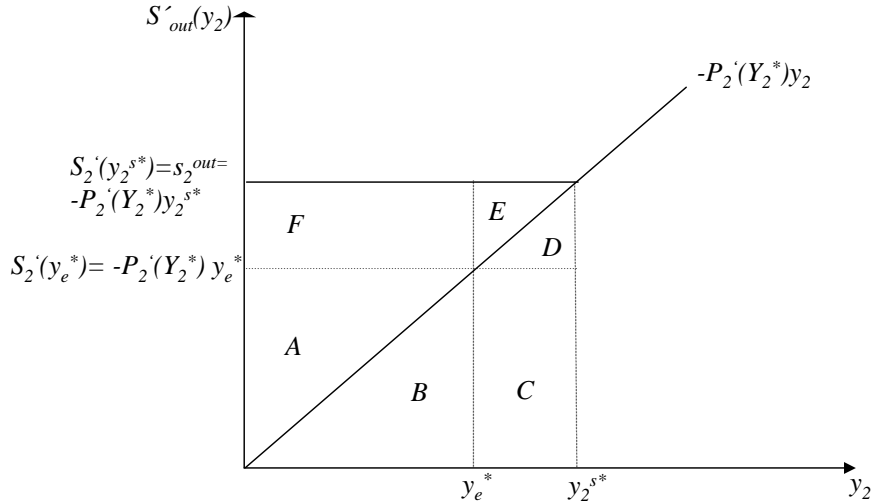


Abbildung 4.1: Die optimalen Outputsubventionen und -gebühren in der zweiten Periode

Mehr als  $y_e^*$  zu produzieren würde zu sofortigen zusätzlichen Kosten von  $C + D + E$  führen. Dies lohnt daher nicht.

Diese Ergebnisse fasse ich in der folgenden Proposition zusammen:

**Proposition 13** *In einem Markt mit freiem Marktzutritt, in dem Firmen im Cournotwettbewerb stehen, Fixkosten in beiden Perioden anfallen, privates und öffentliches Lernen vorhanden und später Marktzutritt optimal ist, kann der Regulator,*

- i. *falls es rechtlich möglich ist, zwischen Firmen zu diskriminieren, die sozial optimale Allokation mit Hilfe folgender Instrumente erreichen: einer Outputsubvention in der ersten Periode  $s_1^{out}$ , linearen Outputsubventionen in der zweiten Periode entsprechend (4.18) und (4.19) sowie Eintrittsgebühren  $\tilde{s}_1^{ent}$ ,  $t_2^{ent}$ , wobei  $s_1^{out}$ ,  $\tilde{s}_1^{ent}$  und  $t_2^{ent}$  durch (4.17), (4.20) und (4.21) gegeben sind.*
- ii. *falls Diskriminierung rechtlich nicht möglich ist, die sozial optimale Allokation mit Hilfe folgender Instrumente erreichen: einer Outputsubvention in der ersten Periode  $s_1^{out}$ , einer Eintrittsprämie (oder Gebühr) in der ersten Periode  $s_1^{ent}$ , einer Outputsubvention in der zweiten Periode  $s_2^{out}$  und einer zweistufigen fixen Steuer  $T$ , wobei  $s_1^{out}$ ,  $s_1^{ent}$ ,  $s_2^{out}$  und  $T$  durch (4.17), (4.22), (4.23) und (4.24) gegeben sind.*

In Beispiel 9 zeige ich, dass später Markteintritt bei Cournotwettbewerb ohne Regulierung in einem teilspielperfektes Gleichgewicht ebenso möglich ist wie im sozialen Optimum.

**Beispiel 9** *Es sei  $P_t = a - bY_t$ ,  $F = 10$ ,  $\delta = 1$ ,  $C^1(y_1) = 2y_1^2$ ,  $C^2(y_2) = (y_2 - \alpha L)^2 + y_2^2$ . Wir erhalten dann die Ergebnisse in Tabelle 4.2.*

Tabelle 4.2: Später Markteintritt im teilspielperfekten Marktgleichgewicht

	Später Markteintritt, $\epsilon = 0.9, a = 10, b = 1/9, \alpha = 1/15$									
	$y_1$	$y_2$	$y_e$	$n_s$	$n_e$	$p_1$	$p_2$	$Y_1$	$Y_2$	$W$
<i>TPGG</i>	2.21	2.22	2.21	4.38	4.00	8.92	7.93	9.70	18.60	24.4
<i>SO</i>	2.24	2.44	2.43	10.02	0.95	7.51	7.03	22.41	26.73	194.1

Bemerkungen: SO = Soziales Optimum, TPGG = Teilspielperfektes Gleichgewicht, W = Wohlfahrt

Die großen Wohlfahrtsunterschiede zwischen dem sozialen Optimum und dem teilspielperfekten Nash-Gleichgewicht in Beispiel 9 verdeutlichen, dass der Regulator mit Hilfe der optimalen Regulierung die Wohlfahrt auch bei gegebener Spilloverrate unter Umständen deutlich erhöhen kann.

### 4.2.3 Früher Marktaustritt

#### Gleichgewichtskonzept und Firmenverhalten

Im folgenden Kapitel betrachten wir nun den Fall, dass einige Firmen den Markt vorzeitig verlassen. Der Lerneffekt der S-Firmen hängt dann sowohl von der Produktion in der ersten Periode der S- als auch der X-Firmen ab, das heißt, dass  $L = y_1^s + \epsilon(n_s - 1)y_1^s + \epsilon n_x y_x$  ist. Weil in der zweiten Periode nur noch S-Firmen im Markt sind, ist der strategische Effekt äquivalent zum Fall mit einmaligen Fixkosten und lediglich S-Firmen in beiden Perioden. Der Unterschied ergibt sich durch die Präsenz der X-Firmen in der ersten Periode. Bei Annahme von Symmetrie für die beiden Firmentypen erhalten wir das folgende Gleichungssystem, das das teilspielperfekte Gleichgewicht bei freiem Markteintritt repräsentiert. Erneut antizipieren wir eine optimale Politik, bei der der Regulator eine Outputsubvention gemäß der Funktion  $S(y_1)$  und eine lineare Outputsubvention  $s_2^{out}$  in der zweiten Periode zahlt, eine Eintrittssteuer  $T_{ent}$  in der ersten Periode verlangt und eine Verweilprämie  $SP$  für S-Firmen in der zweiten Periode zahlt. Die Nullgewinnbedingungen der X- und S-Firmen ergeben sich dann als:

$$\begin{aligned} \pi^s &= P_1(Y_1)y_1^s - C^1(y_1^s) - F + S_1(y_1^s) - T_{ent} \\ &+ \delta[P_2(Y_2)y_2^s - C^2(y_2^s; L) - F + s_2^{out}y_2^s + SP] = 0, \end{aligned} \quad (4.25)$$

$$\pi^x = P_1(Y_1)y_x - C^1(y_x) - F + S_1(y_x) - T_{ent} = 0. \quad (4.26)$$

Die Bedingungen erster Ordnung der X-Firmen sind:

$$\pi_{y_x}^x = P_1' y_x + P_1 - C_{y_x}^1 + S_1'(y_x) = 0 \quad (4.27)$$

Die Bedingungen erster Ordnung der Lagrangefunktion für die S-Firmen entsprechen - abgesehen von den Regulierungsinstrumenten - den Bedingungen erster Ordnung in Kapitel

4.1.1:

$$P'_1 y_1^s + P_1 + S'_1(y_1^s) - C_{y_1^s}^1 - \delta C_L^2 - \lambda C_{y_2^s L}^2 - (n_s - 1)\mu C_{y_2^s L}^2 \epsilon = 0 \quad (4.28)$$

$$\lambda(P_2'' y_2^s + 2P_2' - C_{y_2^s y_2^s}^2) + (n_s - 1)\mu(P_2'' y_2^s + P_2') = 0 \quad (4.29)$$

$$\delta P_2' y_2^s + \lambda(P_2'' y_2^s + P_2') + \mu(P_2'' y_2^s + 2P_2' - C_{y_2^s y_2^s}^2) \quad (4.30)$$

$$+(n_s - 2)\mu(P_2'' y_2^s + P_2') = 0$$

$$\pi_{y_2^s} = P_2' y_2^s + P_2 - C_{y_2^s}^2 + s_2^{out} = 0 \quad (4.31)$$

Durch Auflösen von (4.29) und (4.30) nach  $\lambda$  und  $\mu$  und Einsetzen in (4.28) erhalten wir:

$$P_1 + P_1' y_1^s + S'_1(y_1^s) = C_{y_1^s}^1 + \delta C_{L_s}^2 + E \quad (4.32)$$

Der strategische Effekt  $E$  ist der gleiche wie in Kapitel 4.1.1.

## Die optimale Politik

Die optimale Politik im Falle frühen Marktaustritts ist komplizierter als bei spätem Marktzutritt. Aus Kapitel 3 wissen wir, dass der Regulator bei perfektem Wettbewerb eine konkave Outputsubventionsfunktion braucht, falls er zwischen unterschiedlichen Firmentypen nicht diskriminieren kann. Der Grund besteht darin, dass X- und S-Firmen unterschiedliche Spillover-Effekte für die zweite Periode produzieren, da die S-Firmen auch den privaten Lerneffekt berücksichtigen.

Allerdings ist es hier notwendig, in der Subventionsfunktion noch den strategischen Cournoteffekt und den strategischen Lerneffekt der S-Firmen zu berücksichtigen. Ich verwende der Einfachheit halber eine quadratische Outputsubventionsfunktion. Ich nehme an, dass  $a > 0$  und, für Konkavität, dass  $b > 0$  ist.

$$S(y_1) = ay_1 - \frac{b}{2}y_1^2, \quad (4.33)$$

mit

$$a = \frac{E y_x^* + \delta \epsilon C_L^2(y_2^{s*}, L^*)(n_s^* y_1^{s*} - (n_s^* - 1)y_x^*)}{y_x^* - y_1^{s*}} \quad (4.34)$$

$$b = P_1'(Y_1^*) + \frac{E + \delta \epsilon C_L^2(y_2^{s*}, L^*)}{y_x^* - y_1^{s*}} \quad (4.35)$$

Anders als in Proposition 7 folgen hier  $a > 0$  und  $b > 0$  nicht aus den Modellannahmen. Es gibt also Parameterkonstellationen, für die diese Regulierung ungeeignet ist. Mit den sozial optimalen Outputniveaus nimmt die Grenzüberschussfunktion die folgenden Werte an:

$$S'_1(y_1^{s*}) = -\delta \epsilon (n_s^* - 1) C_L^2(y_2^{s*}, L^*) - P_1'(Y_1^*) y_1^{s*} + E \quad (4.36)$$

$$S'_1(y_x^*) = -\delta \epsilon n_s^* C_L^2(y_2^{s*}, L^*) - P_1'(Y_1^*) y_x^* \quad (4.37)$$

In der zweiten Periode zahlt der Regulator eine konstante Outputsubvention:

$$s_2^{out} = -P_2'(Y_2^*)y_2^{s*} \quad (4.38)$$

Außerdem verlangt der Regulator eine Eintrittssteuer:

$$T_{ent} = \underbrace{\frac{1}{2}P_1'(Y_1^*)(y_x^*)^2}_{<0} - \underbrace{\frac{(y_x^*)^2 E}{2(y_x^* - y_1^{s*})}}_{\leq 0} + \underbrace{\frac{-\delta \epsilon C_L^2(y_2^{s*}, L^*)(y_x^*)^2}{2(y_x^* - y_1^{s*})}}_{<0} \quad (4.39)$$

S-Firmen erhalten in der zweiten Periode noch eine Verweilprämie  $SP$ :

$$SP = \underbrace{-\frac{y_x^* - y_1^{s*}}{2\delta}}_{>0} \left[ \underbrace{P_1'(Y_1^*)}_{<0} - \underbrace{E}_{\leq 0} \right] + \underbrace{\epsilon C_L^2(y_2^{s*}, L^*)(y_x^* - y_1^{s*})}_{>0} + \underbrace{P_2'(Y_2^*)(y_2^{s*})^2}_{<0} \quad (4.40)$$

Aufgrund der gegenläufigen Effekte könnte  $T_{ent}$  auch eine Markteintrittsprämie und  $SP$  eine Steuer sein.

Wir können diese Ergebnisse in der folgenden Proposition zusammenfassen:

**Proposition 14** *In einem Markt mit freiem Marktzutritt, in dem die Firmen im Cournotwettbewerb stehen, Fixkosten in beiden Perioden anfallen, Lerneffekte mit Spillover-Effekten existieren und früher Marktaustritt optimal ist, kann der Regulator die sozial optimale Allokation, falls  $b > 0$  ist, mit Hilfe einer Outputsubventionsfunktion  $S_1(y_1)$  in der ersten Periode, einer konstanten Outputsubvention in der zweiten Periode  $s_2^{out}$  einer Eintrittssteuer  $T_{ent}$  in der ersten und einer Verweilprämie  $SP$  in der zweiten Periode erreichen, wobei  $S_1(y_1)$ ,  $s_2^{out}$ ,  $T_{ent}$  und  $SP$  durch (4.33) und (4.38) - (4.40) definiert sind.*

Diese Politik ist allerdings nur dann möglich, wenn  $b > 0$  ist, die Outputsubventionsfunktion also tatsächlich konkav ist. Falls  $b < 0$  ist, weil in  $b$  beispielsweise  $P_1'$  den hinteren Term dominiert, ist die Subventionsfunktion konvex. Dies kann dazu führen, dass die Firmen unter Umständen gerne unendlich viel produzieren würden, da die Subventionen stetig ansteigen und dies möglicherweise schneller als die Kosten. Wie im Falle von frühem Marktaustritt könnte der Regulator allerdings auch die sozial optimale Allokation herbeiführen, wenn es ihm erlaubt ist, zwischen einzelnen Firmen zu diskriminieren. Wir müssen dafür die Politikinstrumente aus Proposition 14 durch  $s_{out}^x$ ,  $s_{1,out}^s$ ,  $s_{ent}^s$ ,  $t_{out}^x$  und  $s_{2,out}^s$  ersetzen.  $s_{out}^x$ ,  $s_{1,out}^s$ ,  $s_{2,out}^s$  sind Outputsubventionen für die verschiedenen Typen in den unterschiedlichen Perioden sind,  $s_{ent}^s$  ist eine Eintrittsprämie für S-Firmen und  $t_{out}^x$  eine Eintrittssteuer für X-Firmen. Das Resultat aus Kapitel 3 mit vollständigem Wettbewerb ändert sich, weil Terme, die den Cournotwettbewerb internalisieren, hinzukommen. Durch Vergleichen der Verhaltensgleichungen der Firmen mit den Bedingungen des sozia-

len Optimums (3.34) - (3.38) erhält man folgende optimalen Steuern und Subventionen:

$$s_{out}^x = -P_1' y_{x*} - \delta \epsilon n_s^* C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) \quad (4.41)$$

$$s_{1,out}^s = -P_1' y_1^{s*} - \delta \epsilon (n_s^* - 1) C_L^2(y_2^{s*}, L_s^*) + E \quad (4.42)$$

$$s_{ent}^s = P_1'(y_1^{s*})^2 - \delta \epsilon C_L^2 y_1^{s*} - E y_1^{s*} + \delta P_2'(y_2^{s*})^2 \quad (4.43)$$

$$t_{out}^x = P_1'(y_{x*})^2 \quad (4.44)$$

$$s_{2,out}^s = -P_2' y_2^{s*} \quad (4.45)$$

Im folgenden Beispiel zeige ich, dass früher Marktaustritt tatsächlich ein mögliches Marktergebnis in einem unregulierten Markt ist, in dem die Firmen im Cournotwettbewerb stehen und das teilspielperfekte Gleichgewicht spielen.

**Beispiel 10** Es sei  $P_t = a - bY_t$ ,  $F = 10$ ,  $\delta = 1$ ,  $C^1(y_1) = 2y_1^2$ ,  $C^2(y_2^s) = (y_2^s - \alpha L)^2 + (y_2^s)^2$ . Für  $\epsilon = 0, 1$ ,  $a = 300$ ,  $b = 1$  und  $\alpha = 0, 02$  erhalten wir die Ergebnisse aus Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3: Vorzeitiger Marktaustritt im teilspielperfekten Gleichgewicht

Vorzeitiger Marktaustritt, $\epsilon = 0, 1$ , $a = 300$ , $b = 1$ , $\alpha = 0, 02$										
	$y_1^s$	$y_2^s$	$y_x$	$n_s$	$n_x$	$p_1$	$p_2$	$Y_1$	$Y_2$	$W$
SO	2,25	2,28	2,24	128,2	1,52	8,10	7,87	291,9	292,1	85.026,8
TPGG	1,84	1,86	1,83	157,1	1,25	9,13	8,06	290,9	292,0	84.917,2

Bemerkungen: SO = Soziales Optimum, TPGG = Teilspielperfektes Gleichgewicht, W = Wohlfahrt

Es ist außerdem auch möglich, dass im sozialen Optimum andere Firmentypen als im unregulierten Markt aktiv sind. Im folgenden Beispiel zeigt sich, dass es sozial optimal sein kann, dass Firmen den Markt vorzeitig verlassen, es im unregulierten Markt hingegen keine X-Firmen gibt, sondern nur später eintretende E-Firmen.

**Beispiel 11** Es sei  $P_t = a - bY_t$ ,  $F = 10$ ,  $\delta = 1$ ,  $C^1(y_1) = 2y_1^2$ ,  $C^2(y_2^s) = (y_2^s - \alpha L)^2 + (y_2^s)^2$ . Für  $\epsilon = 0, 9$ ,  $a = 16$ ,  $b = 1/9$  und  $\alpha = 0, 05$  erhalten wir die Ergebnisse aus Tabelle 4.4.

Tabelle 4.4: Früher Marktaustritt im sozialen Optimum, aber später Marktzutritt im unregulierten Markt

$\epsilon = 0, 9$ , $a = 16$ , $b = 1/9$ , $\alpha = 0, 05$												
	$y_1^s$	$y_2^s$	$y_x$	$y_e$	$n_s$	$n_x$	$n_e$	$p_1$	$p_2$	$Y_1$	$Y_2$	$W$
SO	2,24	3,07	2,24	0	28,4	1,03	0	8,69	6,33	65,7	87,0	644,5
TPGG	2,15	2,94	0	2,93	29,5	0	0,08	8,95	6,34	63,5	86,9	643,2

Bemerkungen: SO = Soziales Optimum, TPGG = Teilspielperfektes Gleichgewicht, W = Wohlfahrt

## 4.3 Zusammenfassung

Wenn die Firmen miteinander im Cournot-Wettbewerb stehen, braucht der Regulator nun mindestens drei Instrumente, um alle externen Effekte zu internalisieren. Zusätzlich zu den Spillover-Effekten müssen hier auch noch die strategischen Effekte internalisiert werden. Im teilspielperfekten Cournotgleichgewicht gibt es nicht nur strategische Effekte innerhalb einer Periode. Die Firmen antizipieren vielmehr in der ersten Periode auch den Einfluss ihrer Outputentscheidung auf Kosten und Mengen der zweiten Periode. Der daraus resultierende strategische Effekt kann abhängig von den Nachfrage- und Kostenfunktionen sowohl positiv als auch negativ sein. Der normale strategische Cournoteffekt innerhalb einer Periode, der zu einem Outputrückgang jeder einzelnen Firma führt, kann daher also sowohl verstärkt als auch gedämpft werden. Falls die Fixkosten einmalig sind, benötigt der Regulator Outputsubventionen in der ersten und zweiten Periode sowie eine Markteintrittsprämie (bzw. -steuer) um die sozial optimale Allokation zu erzielen.

Wie auch schon bei vollkommenem Wettbewerb kann auch für Cournot-Wettbewerb gezeigt werden, dass keine natürliche Tendenz zur Marktkonzentration besteht; es kann vielmehr nicht nur zu frühem Marktaustritt sondern auch zu spätem Markteintritt kommen und damit zu einem Anstieg der Firmenzahl in der zweiten Periode. Eine Regulierung, die auch bei Cournot-Wettbewerb zur optimalen Allokation führt, ist jedoch recht kompliziert, wenn eine offene Diskriminierung in der Subventionierung von Firmen unterschiedlichen Typs nicht zugelassen ist. Dies liegt daran, dass sowohl bei frühem Marktaustritt als auch spätem Marktzutritt in der ersten beziehungsweise zweiten Periode Firmen im Markt aktiv sind, die unterschiedliche Marktunvollkommenheiten auslösen. Ich habe gezeigt, dass Mechanismen gefunden werden können, die zu einer freiwilligen Wahl unterschiedlicher Subventionen der unterschiedlichen Typen und damit zu einer sozial optimalen Allokation führen. Allerdings wird auch deutlich, dass die Implementierung dieser Mechanismen recht komplex ist und daher für die Regulierung möglicherweise ungeeignet.

## 4.4 Anhang

### Herleitung von Gleichung 4.5:

Die Bedingungen erster Ordnung von  $\Lambda_i$  bezüglich  $y_{1,i}$ ,  $y_{2,i}$ ,  $y_{2,j}$ ,  $\lambda$  und  $\mu$  lauten unter erneuter Verwendung der Schreibvereinfachung  $P'_1 = P'_1(Y_1)$ :

$$\Lambda_{y_{1,i}} = P'_1 y_{1,i} + P_1 + s_1^{out} - C_{y_{1,i}}^1 - \delta C_{L_i}^2 - \lambda C_{y_{2,i}L}^2 - \sum_{j \neq i}^n \mu_j C_{y_{2,j}L_i}^2 \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.46)$$

$$\Lambda_{y_{2,i}} = \lambda(P_2'' y_{2,i} + 2P_2' - C_{y_{2,i}y_{2,i}}^2) + \sum_{j \neq i}^n \mu_j (P_2'' y_{2,j} + P_2') \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.47)$$

$$\begin{aligned} \Lambda_{y_{2,j}} &= \delta P_2' y_{2,i} + \lambda(P_2'' y_{2,i} + P_2') + \mu_j (P_2'' y_{2,j} + 2P_2' - C_{y_{2,j}y_{2,j}}^2) \\ &+ \sum_{k \neq i,j}^n \mu_k (P_2'' y_{2,k} + 2P_2') \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{for } j \neq i \end{aligned} \quad (4.48)$$

$$\Lambda_\lambda = \pi_{y_{2,i}} \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.49)$$

$$\Lambda_{\mu_j} = \pi_{y_{2,j}} \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{for } j \neq i \quad (4.50)$$

Gleichungen (4.48) und (4.50) stehen für  $(n-1)$  Gleichungen für alle  $j \neq i$  und weil es  $n$  Firmen gibt, gelten (4.46) - (4.50)  $n$ -mal. Aufgrund von Symmetrie verhalten sich allerdings im Gleichgewicht alle Firmen identisch, so dass wir folgende Gleichgewichtsbedingungen erhalten:

$$P'_1 y_1 + P_1 + s_1^{out} - C_{y_1}^1 - \delta C_L^2 - \lambda C_{y_2 L}^2 - (n-1) \mu C_{y_2 L}^2 \epsilon = 0 \quad (4.51)$$

$$\lambda(P_2'' y_2 + 2P_2' - C_{y_2 y_2}^2) + (n-1) \mu (P_2'' y_2 + P_2') = 0 \quad (4.52)$$

$$\delta P_2' y_2 + \lambda(P_2'' y_2 + P_2') + \mu(P_2'' y_2 + 2P_2' - C_{y_2 y_2}^2) \quad (4.53)$$

$$\begin{aligned} &+ (n-2) \mu (P_2'' y_2 + P_2') = 0 \\ &\pi_{y_2} = 0 \end{aligned} \quad (4.54)$$

Da so viele Firmen in den Markt eintreten, dass die Gewinne genau null sind, gilt ferner:

$$\pi = P_1(Y_1) y_1 - C^1(y_1) - F + \delta [P_2(Y_2) y_2 - C^2(y_2; L)] = 0 \quad (4.55)$$

Durch Auflösen der Gleichungen (4.52) und (4.53) nach  $\lambda$  und  $\mu$  und Einsetzen der Variablen in Gleichung (4.51) erhalten wir Gleichung (4.5)

$$P_1 + P'_1 y_1 + s_1^{out} = C_{y_1}^1 + \delta C_L^2 + E, \quad (4.56)$$

**Die Bedingungen erster Ordnung von  $\Lambda_i$  im Falle von spätem Marktzutritt bezüglich  $y_{1,i}^s$ ,  $y_{2,i}^s$ ,  $y_{2,j}^s$ ,  $y_{e,k}$ ,  $\lambda$ ,  $\mu$  und  $\gamma$ :**

$$\begin{aligned}\Lambda_{y_1^s, i} &= P_1' y_{1,i}^s + P_1 - C_{y_1^s}^1 - \delta C_{L_{i,s}}^2 - \lambda C_{y_{2,i}^s L_s}^2 + s_1^{out} \\ &\quad - \sum_{j \neq i}^{n_s} \mu_j C_{y_{2,j}^s L_{j,s}}^2 \epsilon - \sum_k^{n_e} \gamma_k C_{y_{e,k} L_{k,e}}^2 \epsilon \stackrel{!}{=} 0\end{aligned}\quad (4.57)$$

$$\begin{aligned}\Lambda_{y_2^s, i} &= \lambda(P_2'' y_{2,i}^s + 2P_2' - C_{y_{2,i}^s y_{2,i}^s}^2) \\ &\quad + \sum_{j \neq i}^{n_s} \mu_j (P_2'' y_{2,j}^s + P_2') + \sum_k^{n_e} \gamma_k (P_2'' y_{e,k} + P_2') \stackrel{!}{=} 0\end{aligned}\quad (4.58)$$

$$\begin{aligned}\Lambda_{y_2^s, j} &= \delta P_2' y_{2,i}^s + \lambda(P_2'' y_{2,i}^s + P_2') + \mu_j (P_2'' y_{2,j}^s + 2P_2' - C_{y_{2,j}^s y_{2,j}^s}^2) \\ &\quad + \sum_{h \neq i, j}^{n_s} \mu_h (P_2'' y_{2,h}^s + 2P_2') + \sum_k^{n_e} \gamma_k (P_2'' y_{e,k} + 2P_2') \stackrel{!}{=} 0\end{aligned}\quad (4.59)$$

$$\begin{aligned}\Lambda_{y_{e,k}} &= \delta P_2' y_{e,k} + \lambda(P_2'' y_{e,k} + P_2') + \gamma_k (P_2'' y_{e,k} + 2P_2' - C_{y_{e,k} y_{e,k}}^2) \\ &\quad + \sum_i^{n_s} \mu_i (P_2'' y_{2,i}^s + 2P_2') + \sum_{i \neq k}^{n_e} \gamma_i (P_2'' y_{e,i} + 2P_2') \stackrel{!}{=} 0\end{aligned}\quad (4.60)$$

$$\Lambda_\lambda = \pi_{y_{2,i}^s} \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.61)$$

$$\Lambda_{\mu_j} = \pi_{y_{2,j}^s} \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.62)$$

$$\Lambda_{\gamma_k} = \pi_{y_{e,k}} \stackrel{!}{=} 0 \quad (4.63)$$

Erneut gibt es eigentlich  $(n_s - 1)$  Gleichungen wie (4.59) und (4.62) für alle  $j \neq i$  sowie  $n_e$  Gleichungen wie (4.60) und (4.63). Im Gleichgewicht verhalten sich aber alle Firmen eines Typs identisch, so dass sich die folgenden Bedingungen erster Ordnung für  $\Lambda_i$  ergeben:

$$P_1' y_1^s + P_1 - C_{y_1^s}^1 - \delta C_{L_s}^2 + s_1^{out} - \lambda C_{y_2^s L_s}^2 \quad (4.64)$$

$$-(n_s - 1)\mu C_{y_2^s L_s}^2 \epsilon - n_e \gamma C_{y_e L_e}^2 \epsilon = 0$$

$$\lambda(P_2'' y_2^s + 2P_2' - C_{y_2^s y_2^s}^2) + (n_s - 1)\mu(P_2'' y_2^s + P_2') \quad (4.65)$$

$$+ n_e \gamma (P_2'' y_e + P_2') = 0$$

$$\delta P_2' y_2^s + \lambda(P_2'' y_2^s + P_2') + \mu(P_2'' y_2^s + 2P_2' - C_{y_2^s y_2^s}^2) \quad (4.66)$$

$$+ (n_s - 2)\mu(P_2'' y_2^s + P_2') + n_e \gamma (P_2'' y_e + P_2') = 0$$

$$\delta P_2' y_2^s + \lambda(P_2'' y_2^s + P_2') + \gamma(P_2'' y_e + 2P_2' - C_{y_e y_e}^2) \quad (4.67)$$

$$+ (n_s - 1)\mu(P_2'' y_2^s + P_2') + (n_e - 1)\gamma(P_2'' y_e + P_2') = 0$$

$$\pi_{y_2^s}^s = 0 \quad (4.68)$$

$$\pi_{y_e}^e = 0 \quad (4.69)$$

Durch Auflösen von (4.65) - (4.67) nach  $\lambda$ ,  $\mu$  und  $\gamma$  und einsetzen in Gleichung (4.64) erhalten wir Gleichung (4.16). Der strategische Effekt  $E^e$  ist nun

$$E^e = \frac{Z}{N}. \quad (4.70)$$



Der Zähler  $Z$  und der Nenner  $N$  sind wie folgt gegeben:

$$\begin{aligned}
Z = & \delta P_2' y_2^s (C_{y_e L_e}^2 \epsilon n_e (C_{y_2^s y_2^s}^2 - P_2') (C_{y_2^s y_2^s}^2 - 2P_2' - P_2'' y_2^s)) \\
& + C_{y_e y_e}^2 C_{y_2^s L_s}^2 (n_s - 1) (P_2' + P_2'' y_2^s + \epsilon (C_{y_2^s y_2^s}^2 - 2P_2' - P_2'' y_2^s)) \\
& + C_{y_2^s L_s}^2 [P_2' (-P_2' (n_s + n_e - 1) \\
& + (n_s - 1) (\epsilon (2P_2' + P_2'' y_2 + C_{y_2 y_2}^2 P_2') - P_2'' y_2) \\
& - n_e P_2'' y_e - C_{y_2 y_2}^2 (P_2' + P_2'' y_e))]
\end{aligned} \tag{4.71}$$

$$\begin{aligned}
N = & (C_{y_2^s y_2^s}^2 - P_2') [C_{y_e y_e}^2 (C_{y_2^s y_2^s}^2 - (n_s + 1) P_2' - n_s P_2'' y_2^s) \\
& - C_{y_2^s y_2^s}^2 ((n_e + 1) P_2' + n_e P_2'' y_e) \\
& + P_2' ((n_e + 1) P_2' + n_s P_2' + P_2'' (n_s y_2^s + n_e y_e))]
\end{aligned} \tag{4.72}$$

# Kapitel 5

## Optimale Regulierung bei Lerneffekten im Windkraftsektor

### 5.1 Einleitung

Im folgenden Kapitel verwende ich die Erkenntnisse über Lerneffekte im vollkommenen Wettbewerb aus Kapitel 3, um Aussagen über die optimale Regulierung des Windkraftsektors (und damit analog auch des Solarenergiesektors) zu treffen. Der optimalen Regulierung stelle ich die aktuelle Regulierung in Deutschland gegenüber und frage dann, wie unter der Restriktion, dass die Subventionierung von Windstrom das einzige Regulierungsinstrument des sozialen Planers ist, eine zweitbeste Regulierung aussieht.

#### 5.1.1 Politischer Hintergrund

Mit Wirkung zum 1. Januar 1991 hat der Deutsche Bundestag im Jahr 1990 das „Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz (Stromeinspeisungsgesetz)“ (Bundesgesetzblatt 1990) beschlossen. Die zwei wichtigen Punkte des Gesetzes sind, dass die Elektrizitätsversorgungsunternehmen verpflichtet wurden, Strom aus erneuerbaren Energien abzunehmen und diesen entsprechend der Vergütungsregelung zu vergüten. Bei Strom aus Windkraft (und Solarkraft) wurde der Vergütungssatz auf 90% des Durchschnittserlös' der Stromabgabe des vorvergangenen Jahres an die Letztverbraucher festgelegt. Bei einem Endverbraucherstrompreis von beispielsweise 10 ct/kWh im vorletzten Jahr würde der Vergütungssatz für Windkraft in diesem Jahr also 9 ct/kWh betragen. Das bedeutet, dass die Vergütungshöhe nicht unabhängig von den Stromkosten konventioneller Energieformen sowie natürlich auch des Wettbewerbs im Letztverbrauchermarkt war. Hemmelskamp und Jörg (1999) errechnen damit eine Vergütungshöhe von etwa 17 Pf/kWh in den frühen neunziger Jahren.

Weil aufgrund der Liberalisierung des deutschen Strommarkts der Durchschnittserlös beim Letzverbraucher sank und damit eine Verringerung der Förderung erneuerbarer Energien einherging, wurde im Jahr 2000 das „Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien“ (Bundesgesetzblatt (2000)), kurz EEG, beschlossen. Ziel des Gesetzes ist, „im Interesse des Klima- und Umweltschutzes eine nachhaltige Entwicklung der Energieversorgung zu ermöglichen“ und damit „den Anteil Erneuerbarer Energien am gesamten Energieverbrauch bis zum Jahr 2010 mindestens zu verdoppeln“. Unter erneuerbaren Energien wird hier neben Windkraft unter anderem auch Solarenergie, Wasserkraft, Biomasse und Geothermie aufgeführt. Die zwei entscheidenden Punkte des Gesetzes sind die Abnahme- und Vergütungspflicht sowie die Festlegung der Vergütungshöhe. Abnahme- und Vergütungspflicht bedeuten wie beim Stromeinspeisegesetz, dass der jeweils nächst gelegene Netzbetreiber verpflichtet ist, Strom aus erneuerbaren Energien in seinem Netz aufzunehmen und zu vergüten. Der Vergütungssatz für Windkraft ist nicht einheitlich für jeden Standort. Es gilt vielmehr, dass Windstrom nur in den ersten fünf Jahren (bei Neuanlagen) standortunabhängig mit 9,1 ct/kWh vergütet wird. Danach sinkt die Förderung je nach Standortgüte ab. Die besten Standorte (mehr als 150 % Stromproduktion im Vergleich zu einem Referenzertrag) erhalten dann beispielsweise nur noch 6,19 ct/kWh. Insgesamt wird die Vergütung über einen Zeitraum von 20 Jahren garantiert.<sup>1</sup> Die jeweiligen Vergütungssätze fallen für neuinstallierte Anlagen jedes Jahr um 1,5 %. Zusätzlich zu neuen Anlagen kommen auch Altanlagen in den Genuss der Vergütung und zwar für volle 20 Jahre ab dem Jahr 2000; allerdings wird der Vergütungshöchstsatz von 9,1 ct/kWh über einen kürzeren Zeitraum gezahlt. Interessant ist auch, dass die Anlagenbetreiber zwar die Kosten für den Netzanschluss selbst tragen müssen, die Netzbetreiber aber die Kosten für einen etwaigen notwendigen Ausbau des Netzes aufgrund der zusätzlichen Einspeisung tragen müssen. Um Ungleichbehandlung von Netzbetreibern mit geringer und hoher Abnahmeverpflichtung zu vermeiden, gibt es für die Netzkosten wie auch für die Vergütungskosten Ausgleichsregelungen zwischen den Netzbetreibern.

Außer in Deutschland wurde Windenergie in den letzten Jahren unter anderem auch in Dänemark, Spanien oder Großbritannien subventioniert, wobei die jeweiligen Förderinstrumente variieren.<sup>2</sup>

Außer der Zielsetzung zum Klimaschutz beizutragen, gab es eine Reihe von Nebenzielen

---

<sup>1</sup>Majd und Pindyck (1989) zeigen, dass Unsicherheit über die Preisentwicklung die Bereitschaft in Lernen zu investieren senkt. Weil aufgrund der langen Vergütungszeit für die Firmen weitgehend Sicherheit - abgesehen von politischen Änderungen - über die zukünftige Preisentwicklung besteht, entfällt hier dieses Argument.

<sup>2</sup>Olivecrona (1995) gibt einen Überblick über die Förderung in Dänemark bis 1995, Morthorst (1999) und die Danish Energy Authority (1999) bis zum Jahr 1999, Hemmelskamp und Hohmeyer (1999) vergleichen die Förderpolitiken in Dänemark, Großbritannien und Deutschland. Die Internationale Energieagentur gibt auf ihrer Homepage „Global Renewable Energy Policies and Measures Database“ (2006) einen knappen Überblick über Fördersysteme in über hundert Ländern der Welt.

beziehungsweise Nebenerfolgen, die mit dem EEG erreicht werden sollten. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit nennt im Erfahrungsbericht zum EEG (2002) die Erhöhung der Versorgungssicherheit und deutscher Exportchancen sowie die Schaffung neuer Arbeitsplätze.<sup>3</sup> Ebenfalls wird gesagt, dass die Förderung mittel- bis langfristig noch notwendig sein würde, bis die erneuerbaren Energien wettbewerbsfähig seien. Implizit schwingt darin die Hoffnung mit, dass durch Forschung und Entwicklung sowie durch zusätzliche Produktion (also Lerneffekte) die Kosten sinken könnten. Deutlicher wird die Internationale Energieagentur (2000), die fordert, dass die Regierungen wegen der Lerneffekte im Bereich der erneuerbaren Energien die „Lerninvestitionen“ der Firmen subventionieren sollten.

Während ich die möglichen Effekte auf die Versorgungssicherheit, Arbeitsmarkt oder Exportchancen nicht modelliere, beziehe ich in das Modell in Abschnitt 5.2 explizit die Möglichkeit von Lerneffekten mit ein.

### 5.1.2 Struktur des deutschen Strom- und Windenergiesektors

Der deutsche Strommarkt ist durch drei Wertschöpfungsstufen gekennzeichnet, die Stromproduktion in den Kraftwerken, die Stromübertragung durch die Netzbetreiber und die Stromversorgung der Endkunden durch die Stromanbieter. Alle drei Wertschöpfungsstufen werden von vier großen vertikal integrierten Energieversorgungsunternehmen dominiert (E.ON, RWE, Vattenfall und EnBW). Neben dem EEG waren wichtige regulatorische Änderungen in den letzten Jahren zum einen die Liberalisierung des Strommarkts 1998 (Bundesgesetzblatt 1998), also die Wahlfreiheit der Endkunden, die Einführung des  $CO_2$ -Emissionsmarkts auf EU-Ebene 2005 (Bundesgesetzblatt 2004) sowie die Entflechtung von Netzbetrieb und Stromerzeugung 2005 (Bundesgesetzblatt 2005), die gewährleisten soll, dass ein Netzbetreiber nicht die Stromproduzenten aus dem eigenen Konzern bevorzugt behandelt. Die rund 600 TWh Strom, die 2004 produziert wurden, stammen zu jeweils etwa einem Viertel aus Kern-, Braunkohle- und Steinkohlekraftwerken, zu jeweils rund 5 % aus Wind- und Wasserkraft und zu rund 15 % aus Gas-, Öl- und anderen Kraftwerken (Strategie & Kennzahlen (2005) der E.ON AG).

Im Modell in Abschnitt 5.2 treffe ich einige vereinfachende Annahmen. Ich nehme an, dass die Kraftwerksbetreiber ihren Strom direkt an die Endkunden vertreiben und dabei im vollkommenem Wettbewerb stehen. Ich schließe im Modell also aus, dass Kraftwerksbetreiber Oligopolmacht in der Stromerzeugung haben und als Netzbetreiber durch ihre vertikal integrierte Struktur Marktmacht ausüben, was aufgrund der realen Gegebenhei-

---

<sup>3</sup>Wobei im Bericht zugegeben wird, dass mögliche negative Arbeitsplatzeffekte in anderen Sektoren aufgrund höherer Strompreise nicht berücksichtigt worden sind.

ten durchaus nicht unplausibel wäre. Ich werde weiter annehmen, dass es alternativ zur Windenergie nur eine weitere konventionelle Energieform gibt, die einen Schadstoff, insbesondere  $CO_2$  emittiert. Die fossilen Energieformen (Kohle, Gas, Öl) kommen jedoch in der Realität zusammen nur auf rund 65 % der Gesamtstromerzeugung. Insbesondere die Produktion von Nuklearstrom vernachlässige ich daher in meinem Modell.

Die Erzeugung des Windstroms erfolgt in Windenergieanlagen durch viele kleine Betreiber. Im Jahr 2002 wurden (siehe Abbildung 5.1) nur etwa 7 % der Windanlagen, gemessen in installierter Leistung, von Energieversorgungsunternehmen betrieben. Der große Rest wurde durch Private (meist Landwirte), Betriebsgesellschaften (kommerzielle Gesellschaften, meist GmbH), Betreibergemeinschaften (private Gemeinschaften, meist GbR) oder Firmen (meist lokale Gewerbebetriebe wie Hotels) betrieben. Man kann al-

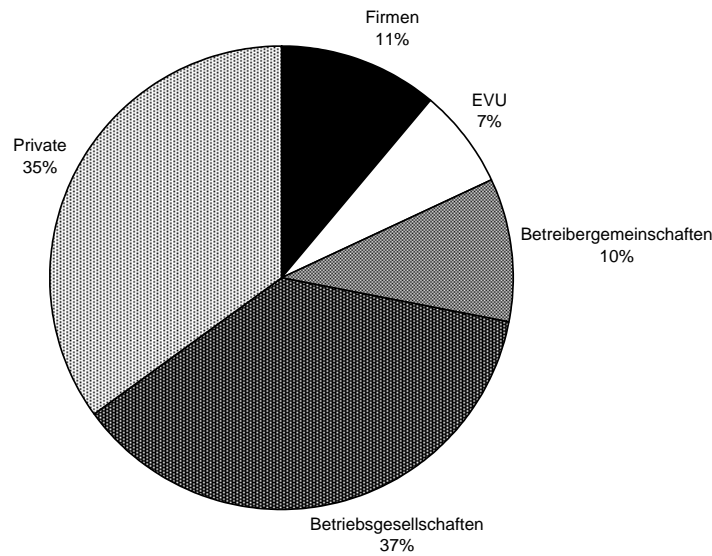


Abbildung 5.1: WEA-Betreiber 2002. Quelle: Windenergie Report Deutschland 2002, ISET.

so realistischerweise davon ausgehen, wie ich es im Modell machen werde, dass einzelne Betreiber von Windenergieanlagen keinerlei Marktmacht besitzen.

Ein besonderes Merkmal der Windstromerzeugung ist ihre große Abhängigkeit vom Standort. Weil insbesondere in Küstennähe der Wind am stärksten und regelmäßigsten weht, war zum Ende des Jahres 2004 knapp die Hälfte der in Deutschland installierten Anlagen in den drei Küstenländern Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern zu finden (Bundesverband Windenergie (1999 - 2005)). An den günstigsten Standorten kann nach Berechnungen von Durstewitz und Hoppe-Kilper (2002) aufgrund von Zahlen aus 2002 zu Kosten von etwas über 5 ct/kWh produziert werden.<sup>4</sup> Ich werde die Standortabhängigkeit im Modell mittels eines Standortparameters berücksichtigen.

<sup>4</sup>Ich gehe sogar davon aus, dass an den besten Standorten wie Hedwigenkoog in Dithmarschen (Schleswig-Holstein) mit Volllaststunden von rund 3000 h/a bereits zu 3,5 ct/kWh produziert werden kann. Die Annahmen bei dieser Berechnung sind: Enercon E-40 mit 600 kW installierter Leistung, Li-

Die Windstromproduzenten beziehen ihre Anlagen von Windenergieanlagenherstellern. Dieser Markt wird von deutschen (Enercon, REpower) und dänischen Herstellern (Vestas) dominiert. In Deutschland hat sich in den letzten Jahren ein Markt mit wenigen dominierenden Herstellern entwickelt. Haben im Jahr 2000 die fünf größten Hersteller zusammen einen Marktanteil von 77.4 % erzielt, vereinen 2004 die größten drei Hersteller bereits einen Marktanteil von 81 % auf sich wie aus Abbildung 5.2 hervorgeht. Mit Hilfe von

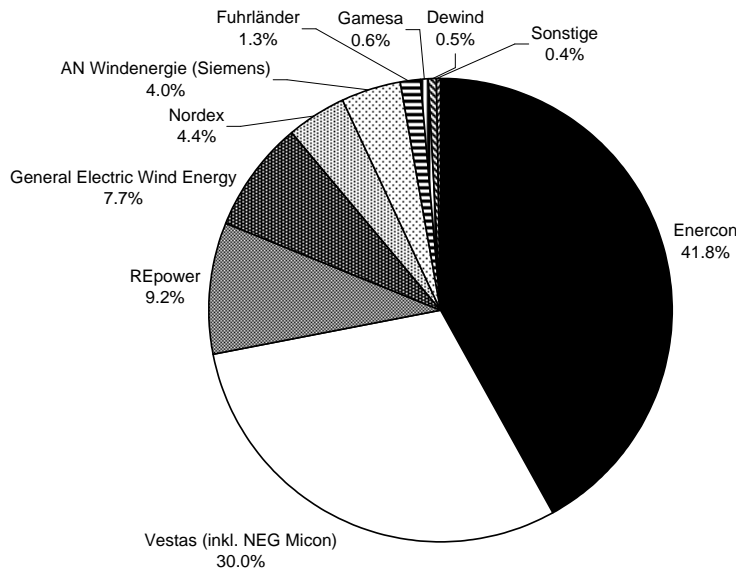


Abbildung 5.2: WEA-Hersteller-Marktanteile in Deutschland 2004. Quelle: Windenergie 2005, Bundesverband Windenergie.

Daten von BTM-Consult (1997 - 2003), einer dänischen Energieberatungsfirma, kann ich den Herfindahl-Index der Marktkonzentration messen. Für Deutschland standen mir leider nur für die Jahre 2000 - 2004 konkrete Daten zur Verfügung, so dass ich den Index für den gesamten Untersuchungszeitraum nur weltweit berechnen konnte (Tabelle 5.1). Es zeigt sich weltweit eine tendenzielle Zunahme der Marktkonzentration. Insbesondere ist das Niveau vor 1997 niedriger als ab 1997. Der Grund dürfte die Fusion der Nordtank Energy Group mit Micon zu NEG Micon im Jahr 1997 sein. Die Marktkonzentration

Tabelle 5.1: Herfindahl-3-Index der drei größten Firmen weltweit

1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
0,051	0,051	0,069	0,062	0,056	0,093	0,088	0,081	0,078	0,098	0,104	0,114

Quelle: „World Market Update“ 1997 - 2003 von BTM Consult, eigene Berechnungen.

in Deutschland dürfte im Untersuchungszeitraum tendenziell höher gelegen haben, da in  


---

 stenpreis von 550.000 Euro, zusätzliche Installationskosten 110.000 Euro, Wartung und Instandhaltung 3 % der Investitionskosten pro Jahr, Lebensdauer 20 Jahre, Realzins 3 %, Rendite von 5 % auf das eingesetzte Kapital, Verhältnis Eigenkapital/Fremdkapital 50/50. Bei den Annahmen über Zusatz- und Wartungskosten folge ich den Angaben der Danish Energy Authority (1999).

den Jahren 2000 - 2003 der Wert von 0.11 auf 0.18 anwuchs, also deutlich über den weltweiten Werten lag. Für 2004 ergibt sich für Deutschland (siehe auch Abbildung 5.2) ein Herfindahl-3-Index von bereits 0,27.

Aufgrund dieser Informationen mag man geneigt sein, auf dem Markt für Windenergieanlagen Marktmacht und Oligopolverhalten der Firmen zu vermuten. Mit Marktmacht und Oligopolverhalten sollten Firmengewinne einhergehen. Allerdings sind die drei an der Börse notierten Aktiengesellschaften Vestas, REpower und Nordex 2004 alle in die Verlustzone gerutscht, was eher für einen wettbewerbsintensiven Markt spricht. Ich gehe jedenfalls im Modell hier auch aus Gründen der analytischen Vereinfachung davon aus, dass auf dem WEA-Markt vollkommener Wettbewerb herrscht.

In der bisherigen Literatur zu Lerneffekten im Windenergiebereich, die ich ausführlicher in Abschnitt 6.5 vorstelle und diskutiere, wurden insbesondere Lerneffekte im Bereich der Windenergieanlagenproduktion untersucht und gefunden. Ich nehme daher im folgenden Modell an, dass Lerneffekte in der WEA-Produktion möglich sind, nicht jedoch in der Windstromproduktion.

## 5.2 Das Modell

Wir betrachten nun eine vertikale Industriestruktur. Im vorgelagerten Sektor gibt es  $n$  Firmen, die Windenergieanlagen (WEA) produzieren. Diese Firmen verkaufen die WEA an nachgelagerte Unternehmen, die Anlagenbetreiber. Die Anlagenbetreiber produzieren mit den WEA Strom und verkaufen diesen an die Stromkonsumenten. Ich nehme an, dass im Strommarkt vollkommene Konkurrenz herrscht und außer Windstrom auch Strom von fossilen Energieträgern angeboten wird. Vereinfachend nehme ich an, dass es nur Kohlekraftwerke gibt. Unterschiedliche Typen von konventionellen Kraftwerken wie Gas- oder Atomkraftwerke würden die Analyse lediglich verkomplizieren, weil wir dann unterschiedliche externe Effekte für unterschiedliche Kraftwerkstypen annehmen müssten (unterschiedliche  $CO_2$ -Emissionen oder externe Effekte durch Strahlung oder Endlagerung von Brennstäben), ohne aber zusätzliche Erkenntnisse in den Modellaussagen gewinnen zu können.

Die Technologien der beiden Sektoren können durch Kostenfunktionen dargestellt werden.  $\Gamma(\cdot)$  sei die Kostenfunktion der WEA-Produzenten und  $C(\cdot)$  die der Anlagenbetreiber. Die Kohlekraftwerke produzieren Strom - im Folgenden kurz „Kohlestrom“ - zu konstanten Grenzkosten  $\xi$  und stoßen proportional zum Output Schadstoffe aus, zum Beispiel  $CO_2$ . Im Gegensatz dazu nehme ich an, dass von der Windstromproduktion keine externen Effekte ausgehen, obwohl auch hier mit von Seht (2003) argumentiert werden könnte,

dass es externe Effekte wie Vogelschlag oder Lärmemissionen gibt. Ich denke jedoch, dass diese Effekte wesentlich geringer als die der  $CO_2$ -Emissionen sind. Die externen Effekte des Kohlestroms können daher auch als Differenz zwischen den externen Effekten von Windstrom (normiert auf Null) und Kohlestrom aufgefasst werden.

Um nun die Lerneffekte zu modellieren, nehme ich analog zum Modell in Kapitel 3 an, dass es zwei Perioden  $t = 1, 2$  gibt. Gelernt wird nur im vorgelagerten Sektor bei den WEA-Produzenten.  $y_t$  sei der Output des typischen symmetrischen WEA-Produzenten in der Periode  $t$ . Die Produktionskosten ohne Erfahrung in Periode 1 sind dann  $\Gamma^1(y_1)$  und entsprechend sind  $\Gamma^2(y_2, L)$  die Produktionskosten mit Erfahrung in Periode 2.  $L$  ist der Lernparameter, für den  $L = y_1 + \epsilon(n - 1)y_1$  gilt, wobei  $0 \leq \epsilon \leq 1$ . Wie in den bisherigen Modellen hängen die Lerneffekte von der eigenen Produktion und der aggregierten Produktion der  $(n - 1)$  anderen Firmen ab, die mit dem Spilloverparameter  $\epsilon$  gewichtet wird, wobei bei  $\epsilon = 0$  die Lerneffekte privat und bei  $\epsilon = 1$  öffentlich sind.

Die Kostenfunktion  $\Gamma$  soll folgende Bedingungen erfüllen:  $\Gamma_{y_t}^t > 0$  und  $\Gamma_{y_t y_t}^t > 0$ , das heißt, die Grenzkosten sind positiv und monoton steigend in beiden Perioden. Weiter gilt, dass  $\Gamma_L^2 < 0$  und  $\Gamma_{y_2 L}^2 < 0$  ist, dass also Lernen beziehungsweise die Produktion in der ersten Periode (ob nun in der eigenen Firma oder in anderen Firmen) sowohl die Kosten als auch die Grenzkosten senkt. Allerdings nehme ich auch an, dass der marginale Lerneffekt mit steigendem Lernen sinkt, dass also  $\Gamma_{LL}^2 > 0$  gilt. Es soll schließlich gelten, dass  $\Gamma^2$  konvex ist, also dass  $\Gamma_{LL}^2 \Gamma_{y_2 y_2}^2 - [\Gamma_{y_2 L}^2]^2 > 0$  gilt. Um freien Marktzutritt zu ermöglichen nehme ich an, dass die WEA-Produzenten Fixkosten haben. Im Gegensatz zu Kapitel 3 untersuche ich hier nur den Fall einmaliger Fixkosten. Fragen von Markteintritt und -austritt zwischen Periode 1 und 2 stellen sich hier also nicht und stehen hier auch nicht im Fokus der Fragestellung. Die Firmen werden entweder in beiden oder keiner der beiden Perioden produzieren.

Die Anlagenbetreiber, also die nachgelagerten Firmen, produzieren  $q_t$  Einheiten Strom in der Periode  $t$ . Ich nehme an, dass es ein Kontinuum von nachgelagerten Firmen innerhalb des Intervalls  $[0, \infty]$  gibt.  $\tilde{x} \in [0, \infty]$  kann dann sowohl als ein spezifischer Anlagenbetreiber, aber auch als ein firmenspezifischer Parameter wie die Standortwahl interpretiert werden. Dieser Standortparameter beeinflusst die Kosten eines Anlagenbetreibers. Je höher  $\tilde{x}$  ist, um so größer sind sowohl die Gesamtkosten als auch die Grenzkosten der Produktion beziehungsweise anders herum gesagt: je kleiner  $\tilde{x}$  ist, um so besser ist der Standort der Windenergieanlage. Auf diese Weise ist die Beobachtung in der Realität, dass dieselbe Windanlage an der Küste produktiver als im Inland ist, im Modell abgebildet. Folglich gilt dann für die Kostenfunktionen der Anlagenbetreiber  $C^t(q_t, \tilde{x})$ , dass  $C_{q_t}^t > 0, C_{q_t q_t}^t > 0, C_{\tilde{x}}^t > 0, C_{q_t \tilde{x}}^t > 0$ , also dass die Grenzkosten positiv und zunehmend sowohl in der Produktionsmenge als auch im Standortparameter sind. Wie bei den WEA-



Produzenten soll auch hier gelten, dass die Kostenfunktionen konvex sind, dass also auch gilt, dass  $C_{\tilde{x}\tilde{x}}^t > 0$  und  $C_{\tilde{x}\tilde{x}}^t C_{q_t q_t}^t - [C_{q_t \tilde{x}}^t]^2 > 0$ . Bei diesen Annahmen liegt der Einwand nahe, dass die Windstärke und Winddauer und damit die Produktionsmenge keineswegs eine Entscheidungsvariable des Produzenten, sondern vielmehr exogen gegeben sei. Dennoch spricht für die hier getroffenen Annahmen, dass zum einen Windenergieanlagen gewartet werden müssen. Nicht ausreichend gewartete Anlagen haben häufigere Stillstandszeiten. Insofern wird indirekt der Output wieder zu einer Entscheidungsvariable. Zum anderen ist eine derartige Kapazitätsschranke nur eine extreme Form von ansteigenden Grenzkosten. In diesem Fall betragen sie zunächst null (der Input Wind ist kostenlos vorhanden und jede beliebige Menge zwischen null und Volllast kann produziert werden) und steigen dann auf unendlich, wenn die Kapazitätsgrenze, also Volllast erreicht wird.

Die Anlagenbetreiber sollen jeweils nur eine WEA kaufen können. Mit  $x_t$  bezeichne ich den Grenzanlagenbetreiber, der gerade noch in der Periode  $t$  produziert.<sup>5</sup> Aufgrund der Annahmen  $C_{\tilde{x}}^t > 0, C_{q_t \tilde{x}}^t > 0$  ist es effizient, dass alle Firmen mit einem besseren Standort ( $\tilde{x} < x_t$ ) als der Grenzanlagenbetreiber produzieren. Analog gilt in einer dezentralisierten Volkswirtschaft ebenso, dass es sich für alle Firmen mit  $\tilde{x} < x_t$  lohnt zu produzieren. Folglich gilt für die Gesamtanlagenzahl:

$$x_t = n y_t \tag{5.1}$$

Der Gesamtoutput der WEA-Produzenten entspricht also jeweils der gesamten installierten Anlagenanzahl in einer Periode. Aufgrund der Asymmetrie der Anlagenbetreiber bezeichne ich den Stromoutput der Firma  $\tilde{x}$  mit  $q_t(\tilde{x})$ . Abgesehen von der größeren Realitätsnähe gibt es auch einen technischen Grund für die Asymmetrie. Wenn alle Anlagenbetreiber identisch wären, hätten sie (egal ob mit oder ohne Regulierung) entweder alle höhere oder niedrigere Durchschnittskosten als die Kohlekraftwerke. Folglich würden auch entweder alle oder gar keine Anlagenbetreiber in den Markt eintreten. Am Strommarkt gäbe es nur einen Sektor, der Strom anbieten würde (abgesehen vom unwahrscheinlichen Fall, dass die Kosten genau gleich wären), nämlich der mit den niedrigeren Kosten. Stetige komparativ-statische Effekte wären so nicht möglich. Die gesamte Stromproduktionsmenge in Periode  $t$  sei

$$Q_t = \int_0^{x_t} q_t(\tilde{x}) d\tilde{x} + k_t, \tag{5.2}$$

wobei  $k_t$  der Output der Kohlekraftwerke ist.

Die Stromnachfrage sei durch eine fallende inverse Nachfragefunktion gegeben:

$$p_t = P_t(Q_t). \tag{5.3}$$

---

<sup>5</sup>An dieser Stelle sollte darauf hingewiesen werden, dass die Anlagenbetreiber in jeder Periode eine neue Windanlage kaufen müssen. Es mag realistischer erscheinen, auch Anlagenbetreiber zuzulassen, die mit derselben Anlage in beiden Perioden produzieren. Erneut würde das Modell dadurch lediglich komplizierter, ohne dass zusätzliche Aussagekraft gewonnen würde.

Für diese gilt  $P'_t(Q_t) < 0$ . Der Ausstoß von Schadstoffen, der bei der Stromproduktion  $k_t$  in den Kohlekraftwerken entsteht, verursacht Schäden, die von der Gesellschaft mit Hilfe der Schadensfunktion  $D_t(k_t)$  bewertet werden, wobei gilt, dass  $D'_t(k_t) > 0$  und  $D''_t(k_t) \geq 0$ . Die Wohlfahrtsfunktion  $W$  ergibt sich dann als Summe dieser Bestandteile:

$$W = \int_0^{Q_1} P_1(Q)dQ - \int_0^{x_1} C^1(q_1, x)dx - n\Gamma^1(y_1) - nF - \xi k_1 - D_1(k_1) \quad (5.4)$$

$$+ \delta \left[ \int_0^{Q_2} P_2(Q)dQ - \int_0^{x_2} C^2(q_2, x)dx - n\Gamma^2(y_2; L) - \xi k_2 - D_2(k_2) \right]$$

$\delta$  ist der soziale und private Diskontfaktor, die hier wie in Kapitel 3 als identisch angenommen werden.

### 5.3 Das soziale Optimum

Der soziale Planer maximiert die gesellschaftliche Wohlfahrtsfunktion nach  $q_t, k_t, y_t$  sowie der optimalen Anzahl von WEA-Produzenten  $n$ . Die Bedingungen erster Ordnung sind durch die folgenden Gleichungen gegeben.<sup>6</sup>

$$W_{q_1} = P_1(Q_1) - C^1_{q_1}(q_1, \tilde{x}) \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{für alle } \tilde{x} \leq x_1 \quad (5.5)$$

$$W_{q_2} = P_2(Q_2) - C^2_{q_2}(q_2, \tilde{x}) \stackrel{!}{=} 0 \quad \text{für alle } \tilde{x} \leq x_2 \quad (5.6)$$

$$W_{k_1} = P_1(Q_1) - \xi - D'_1(k_1) \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.7)$$

$$W_{k_2} = P_2(Q_2) - \xi - D'_2(k_2) \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.8)$$

$$W_{y_1} = P_1(Q_1)q_1(x_1) - C^1(q_1, x_1) - \Gamma^1_{y_1}(y_1) - \delta[\Gamma^2_L(y_2; L) + \Gamma^2_L(y_2; L)\epsilon(n-1)] \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.9)$$

$$W_{y_2} = P_2(Q_2)q_2(x_2) - C^2(q_2, x_2) - \Gamma^2_{y_2}(y_2; L) \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.10)$$

$$W_n = [P_1(Q_1)q_1 - C^1(q_1, x_1)]y_1 - \Gamma^1(y_1) - F - \delta[\Gamma^2(y_2; L) + n\Gamma^2_L(y_2; L)\epsilon y_1] + \delta[P_2(Q_2)q_2 - C^2(q_2, x_2)]y_2 \stackrel{!}{=} 0 \quad (5.11)$$

Die Interpretation der Gleichungen ist wie folgt: (5.5) und (5.6) sagen nichts anderes, als dass die marginale Zahlungsbereitschaft für Strom gleich den Grenzkosten der Windstromproduktion sein sollte. Bei der Stromproduktion in Kohlekraftwerken muss hingegen gelten, dass die marginale Zahlungsbereitschaft für Strom gleich den Grenzkosten der Produktion plus dem (negativen) Grenzscha-den der Stromproduktion ist (Gleichungen (5.7) und (5.8)). Die optimale Produktionsmenge von Windenergieanlagen durch die WEA-Produzenten in beiden Perioden ist durch die beiden Gleichungen (5.9) und (5.10)

<sup>6</sup>Die partiellen Ableitungen bezeichne ich erneut vereinfachend mit  $W_{q_1}$  anstatt  $\frac{\partial W}{\partial q_1}$ .

gegeben, die optimale Anzahl an WEA-Produzenten wird durch Gleichung (5.11) festgelegt. Da die Anzahl der Anlagenbetreiber in beiden Perioden gemäß Gleichung (5.1) das Produkt aus WEA-Produzenten und deren Output ist, ergibt sich die Anzahl der Anlagenbetreiber ebenfalls aus den Gleichungen (5.9), (5.10) und (5.11).

## 5.4 Optimale Regulierung bei vollkommenem Wettbewerb

In diesem Abschnitt untersuche ich nun, wie der Regulator das soziale Optimum bei vollkommenem Wettbewerb erreichen kann. Insbesondere gehe ich hier davon aus, dass der Regulator keinerlei „politischen“ Beschränkungen hinsichtlich seiner Instrumentenwahl unterliegt. Spulber (1985) zeigt, dass auch bei freiem Marktzutritt in einem Markt mit vollkommenem Wettbewerb die sozial optimale Allokation mit einer Pigousteuer erreicht werden kann. Petrakis, Rasmusen und Roy (1997) haben gezeigt, dass bei vollkommenem Wettbewerb und privatem Lernen die Lerneffekte vollständig internalisiert werden und daher kein Eingriff des Regulators notwendig ist. Wenn hingegen Lerneffekte öffentlich werden, es also Spillover gibt, so habe ich in Kapitel 3 gezeigt, dass der Regulator mit einer Output- und einer Markteintrittssubvention die sozial optimale Allokation erreichen kann. Die Kombination dieser zwei Ergebnisse liefert folgende Proposition:

**Proposition 15** *In dem oben beschriebenen Modell mit Verschmutzung, privaten und öffentlichen Lerneffekten sowie einer endogenen Firmenanzahl kann die sozial optimale Allokation mit einer Pigou-Steuer auf Kohlestrom, also Strom aus Kohlekraftwerken,  $\tau_t = D'_t(k_t)$ , einer Outputsubvention für WEA-Anlagen in der ersten Periode von  $s_{out} = -\delta\epsilon(n-1)\Gamma_L^2$  und einer Markteintrittssubvention in Höhe von  $s_{ent} = -\delta\epsilon\Gamma_L^2 y_1$  für die WEA-Produzenten erreicht werden.*

*Beweis:* Es sei  $\tau_t$  die Steuer auf den Kohlestrom in Periode  $t$ . Der Gewinn der Kohlekraftwerke  $\pi_t^k$  ergibt sich dann wie folgt:

$$\pi_t^k = p_t k_t - \xi k_t - \tau_t k_t \quad \text{für } t = 1, 2 \quad (5.12)$$

Der Preis einer WEA, der vom Anlagenbetreiber an die WEA-Produzenten in Periode  $t$  gezahlt werden muss, sei  $b_t$ . Der Gewinn  $\pi_t^{ab}$  des Anlagenbetreibers ist dann:

$$\pi_t^{ab} = p_t q_t - C^t(q_t, \tilde{x}) - b_t \quad \text{für } t = 1, 2 \text{ und alle } \tilde{x} \leq x_t \quad (5.13)$$

Mit der Outputsubvention  $s_{out}$  und der Markteintrittsprämie  $s_{ent}$  ist der Gewinn  $\pi^P$  des WEA-Produzenten gegeben durch:

$$\pi^P = b_1 y_1 - \Gamma^1(y_1) + s_{out} y_1 + s_{ent} - F + \delta[b_2 y_2 - \Gamma^2(y_2; L)] \quad (5.14)$$

Aufgrund der Annahme, dass alle Firmen Preisnehmer sind, ergeben sich die Bedingungen erster Ordnung wie folgt:

$$p_t = \xi + \tau_t \quad \text{für } t = 1, 2 \quad (5.15)$$

$$p_t = C_{q_t}^t(q_t, \tilde{x}) \quad \text{für } t = 1, 2 \text{ und alle } \tilde{x} \leq x_t \quad (5.16)$$

$$b_1 = \Gamma_{y_1}^1(y_1) + \delta\Gamma_L^2(y_2; L) - s_{out} \quad (5.17)$$

$$b_2 = \Gamma_{y_2}^2(y_2; L) \quad (5.18)$$

Aufgrund der Null-Gewinn-Bedingung bei freiem Marktzutritt gilt ferner:

$$p_t q_t - C^t(q_t, x_t) - b_t = 0 \quad \text{für } t = 1, 2 \quad (5.19)$$

$$b_1 y_1 - \Gamma^1(y_1) - F + s_{out} y_1 + s_{ent} + \delta[b_2 y_2 - \Gamma^2(y_2; L)] = 0 \quad (5.20)$$

Ein Vergleich der Gleichungen (5.15) - (5.20) mit den Gleichungen des sozialen Optimums (5.5) - (5.11) zeigt nun, dass mit  $\tau_t = D'_t$  sowie  $s_{out} = -\delta\epsilon(n-1)\Gamma_L^2$  und  $s_{ent} = -\delta\epsilon\Gamma_L^2 y_1$  die sozial optimale Allokation erreicht werden kann. Wenn Lernen nur privater Natur ist, bedeutet dies insbesondere, dass keinerlei Subventionierung sowohl der WEA-Produzenten als auch der Anlagenbetreiber notwendig ist, wenn eine Pigou-Steuer erhoben wird.

## 5.5 Zweitbeste Regulierung falls Pigou-Steuern (politisch) nicht möglich sind

Die im vorangegangenen Kapitel vorgestellte Regulierung ist nun aber aus politischen Gründen oftmals nicht möglich beziehungsweise schwer durchzusetzen. In Deutschland gibt es eine umweltpolitisch nicht ganz konsistente Regulierung, da einerseits der Kohleabbau immer noch subventioniert wird, andererseits eine Stromsteuer existiert (Bundesgesetzblatt (1999)), die nur auf konventionellen Strom (fossil und nuklear) erhoben wird, weil erneuerbare Energien weitgehend steuerbefreit sind; jedoch gelten für Großabnehmer wiederum ermäßigte Steuersätze. Seit 2005 wird zudem durch den europäischen Emissionshandel versucht, den Schadstoffausstoß zu internalisieren (Bundesgesetzblatt (2004)). Angesichts der Vielzahl der Instrumente scheint allerdings eine optimale Besteuerung gemäß der Pigou-Regel nicht vorzuliegen. Eine etwaige Subventionierung der WEA-Produzenten ist ebenfalls nicht durchzusetzen, da dies gegen geltendes Wettbewerbsrecht der EU (EG-Vertrag, Artikel 87) verstoßen würde.<sup>7</sup> Wie in Abschnitt 5.1.1 dargelegt, wird in Deutschland der Windstrom subventioniert, was man auch als eine indirekte Subventionierung

<sup>7</sup>Ein allenfalls denkbarer Ausnahmetatbestand wäre Artikel 87, 3c. Dort heißt es: „Mit dem gemeinsamen Markt vereinbar sind Beihilfen zur Förderung der Entwicklung gewisser Wirtschaftszweige [...], soweit sie die Handelsbedingungen nicht in einer Weise verändern, die dem gemeinsamen Interesse zuwiderläuft.“

der WEA-Produktion sehen kann, weil dadurch die Nachfrage nach Windenergieanlagen gestärkt wird. Häufig wird dabei argumentiert, dass die Windstromsubventionierung zwei positive Effekte habe: Einmal werde „dreckiger“ Kohlestrom durch „sauberen“ Strom ersetzt und zum anderen werde durch die Windstromsubventionierung die Nachfrage nach Windenergieanlagen stimuliert und durch die höhere Produktion Lerneffekte und Innovationen gefördert. Im Folgenden soll diesen Behauptungen nachgegangen und das Modell insofern verändert werden, als das einzige Politikinstrument, das der Regulator verändern kann, eine Subvention auf den Output von Windstrom ist. In den folgenden Abschnitten 5.5.1 und 5.5.2 gehe ich zunächst davon aus, dass in der Produktion der WEA lediglich privat gelernt wird, also dass  $\epsilon = 0$  ist.

Die Bedingungen erster Ordnung (5.15) zur Gewinnmaximierung der Kohlekraftwerke bleiben unverändert. Dies bedeutet, dass es weiterhin möglich ist, dass eine Steuer (oder Subvention) auf Kohlestrom erhoben wird, diese aber nicht optimal sein muss und vor allem vom Regulator nicht geändert werden kann. Die Gewinngleichung und Bedingungen erster Ordnung für die WEA-Produzenten, Gleichungen (5.17), (5.18) und (5.20), ändern sich insofern als die Subventionen  $s_{out}$  und  $s_{ent}$  wegfallen. Die Gewinngleichung und Bedingungen erster Ordnung für die Anlagenbetreiber ändern sich auch, nur dass hier nun auch Subventionszahlungen  $\sigma_t$  an die Windkraftbetreiber möglich sein sollen. Die Bedingungen erster Ordnung lauten daher

$$p_t + \sigma_t = C_{q_t}^t(q_t, \tilde{x}) \quad \text{für } t = 1, 2 \text{ und alle } \tilde{x} \leq x_t \quad (5.21)$$

Die Nullgewinnbedingung ist nun:

$$p_t q_t - C^t(q_t, x_t) - b_t + \sigma_t q_t = 0 \quad \text{für } t = 1, 2 \quad (5.22)$$

### 5.5.1 Komparative Statik bei Lerneffekten ohne Spillover-Effekte

Für den Regulator stellt sich jetzt die Frage, was für Auswirkungen eine Subventionierung des Windstroms auf Preise und Mengen in den betroffenen Märkten haben wird. Wenn die Gleichungen (5.1), (5.2), (5.3), (5.15), (5.17), (5.18), (5.21), (5.22) und (5.20) nach den Politikvariablen  $\sigma_t$  (und zum Vergleich auch nach  $\tau_t$ ) differenziert werden und wir annehmen, dass die Lerneffekte rein privat sind ( $\epsilon = 0$ ) können wir die komparativ-statischen Effekte ermitteln. Einige Effekte können jedoch nur eindeutig bestimmt werden, wenn wir annehmen, dass die folgenden Bedingungen erfüllt sind, die den Bedingungen (3.11), (3.12) und (3.14) aus Kapitel 3 entsprechen:

$$\Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 + \delta \Gamma_{y_2 L}^2 y_2 \geq 0 \quad (5.23)$$

$$\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2 + \Gamma_{y_2 L}^2 y_1 \geq 0 \quad (5.24)$$

$$\Gamma_{LL}^2 y_1 + \Gamma_{y_2 L}^2 y_2 \geq 0 \quad (5.25)$$

**Proposition 16** *Unter der Annahme, dass Steuern und Subventionen derart festgelegt sind, dass sowohl Anlagenbetreiber als auch Kohlekraftwerke simultan im Markt tätig sind und Strom produzieren und dass es nur private Lerneffekte gibt, gilt:*

i. *Eine Erhöhung der Subvention auf Windstrom in einer Periode (bei konstanten anderen Politikinstrumenten) führt zu:*<sup>8</sup>

$$\frac{\partial x_t}{\partial \sigma_t} > 0, \frac{\partial x_{t-1}}{\partial \sigma_t} > 0, \frac{\partial k_t}{\partial \sigma_t} < 0, \frac{\partial k_{t-1}}{\partial \sigma_t} < 0, \frac{\partial q_t}{\partial \sigma_t} > 0, \frac{\partial q_{t-1}}{\partial \sigma_t} = 0, \frac{\partial b_t}{\partial \sigma_t} > 0, \frac{\partial b_{t-1}}{\partial \sigma_t} < 0, \frac{\partial p_t}{\partial \sigma_t} = 0, \frac{\partial p_{t-1}}{\partial \sigma_t} = 0, \frac{\partial Q_t}{\partial \sigma_t} = 0 \text{ und } \frac{\partial Q_{t-1}}{\partial \sigma_t} = 0.$$

*Wenn ferner Bedingung (5.24) erfüllt ist (nicht erfüllt ist), ist  $\frac{\partial y_t}{\partial \sigma_t} > 0 (< 0)$ .*

*Wenn Bedingung (5.23) erfüllt ist, gilt außerdem  $\frac{\partial y_t}{\partial \sigma_{t-1}} > 0$  und  $\frac{\partial n}{\partial \sigma_t} > 0$ .*

ii. *Eine Erhöhung der Steuer auf Kohlestrom in einer Periode (bei konstanten anderen Politikinstrumenten) führt zu:*

$$\frac{\partial x_t}{\partial \tau_t} > 0, \frac{\partial x_{t-1}}{\partial \tau_t} > 0, \frac{\partial k_t}{\partial \tau_t} < 0, \frac{\partial k_{t-1}}{\partial \tau_t} < 0, \frac{\partial q_t}{\partial \tau_t} > 0, \frac{\partial q_{t-1}}{\partial \tau_t} = 0, \frac{\partial b_t}{\partial \tau_t} > 0, \frac{\partial b_{t-1}}{\partial \tau_t} < 0, \frac{\partial p_t}{\partial \tau_t} = 1, \frac{\partial p_{t-1}}{\partial \tau_t} = 0, \frac{\partial Q_t}{\partial \tau_t} < 0 \text{ und } \frac{\partial Q_{t-1}}{\partial \tau_t} = 0.$$

*Wenn ferner Bedingung (5.24) erfüllt ist (nicht erfüllt ist), ist  $\frac{\partial y_t}{\partial \tau_t} > 0 (< 0)$ .*

*Wenn Bedingung (5.23) erfüllt ist, gilt außerdem  $\frac{\partial y_t}{\partial \tau_{t-1}} > 0$  und  $\frac{\partial n}{\partial \tau_t} > 0$ .*

iii. *Eine simultane Erhöhung von identischen Subventionen auf Windstrom in beiden Perioden (bei konstanten anderen Politikinstrumenten) führt zu:*

$$\frac{\partial x_t}{\partial \sigma} > 0, \frac{\partial k_t}{\partial \sigma} < 0, \frac{\partial q_t}{\partial \sigma} > 0, \frac{\partial y_t}{\partial \sigma} \leq 0, \frac{\partial p_t}{\partial \sigma} = 0, \frac{\partial Q_t}{\partial \sigma} = 0 \text{ und } \frac{\partial b_1}{\partial \sigma} \frac{\partial b_2}{\partial \sigma} < 0 \text{ mit } \frac{\partial b_1}{\partial \sigma} > 0$$

*dann und nur dann, wenn  $\frac{y_2}{q_2(x_2)} C_{\bar{x}}^2 > \frac{y_1}{q_1(x_1)} C_{\bar{x}}^1$ .*

*Wenn die Bedingungen (5.24) und (5.25) gelten, ist außerdem  $\frac{\partial n}{\partial \sigma} > 0$ .*

Der Beweis findet sich im Anhang.

Die meisten Ergebnisse sind nicht sonderlich überraschend. Wie zu erwarten war, sinkt bei einer Erhöhung der Windstromsubvention (oder der Kohlestromsteuer) der Output der Kohlekraftwerke in beiden Perioden und es steigt der Output sowohl von Windstrom als auch von Windenergieanlagen in beiden Perioden. Eine Subventionserhöhung hat keinen Effekt auf den Strompreis und den Gesamtstromoutput in beiden Perioden, da der Strompreis aufgrund des vollkommenen Wettbewerbs auf dem Strommarkt allein durch die Grenzkosten  $\xi$  der Kohlestromproduzenten bestimmt wird. Das bedeutet natürlich, dass ich davon ausgehe, dass die Subvention nicht so hoch ist, dass der Kohlestrom komplett vom Markt verdrängt wird. Eine Erhöhung der Kohlestromsteuer erhöht hingegen den Strompreis in derselben Periode und reduziert die produzierte Strommenge in derselben Periode. Preis und Output der jeweils anderen Periode bleiben gleich. Eine Erhöhung

<sup>8</sup>-t steht für die jeweils andere Periode.

der Subvention (und der Steuer) in einer Periode führt zu einem erhöhten Windstromoutput jedes einzelnen Anlagenbetreibers in derselben Periode und zu keiner Veränderung in der anderen Periode.

Bemerkenswert ist hingegen, dass ein Anstieg der Subvention (Steuer) in einer Periode zu einem Anstieg der Preise für Windenergieanlagen in derselben Periode, aber gleichzeitig zu einem Preisrückgang in der anderen Periode führt. Die Intuition für diesen Effekt ist, dass durch die Subvention die Nachfrage nach WEA steigt, wegen der steigenden Grenzkosten aber nur zu höheren Preisen befriedigt werden kann. Durch die höhere Produktion in der ersten Periode gibt es aber größere Lerneffekte und dadurch niedrigere Kosten in der zweiten Periode, was zu niedrigeren Preisen der Windkraftanlagen führt. Bei einer simultanen Erhöhung der Subvention in beiden Perioden kann der Effekt jedoch in beide Richtungen gehen.

Schließlich zeigt sich, dass eine Subventions-(Steuer-)erhöhung sowohl zu einem Anstieg als auch Rückgang sowohl der Anzahl der WEA-Produzenten als auch deren Output führen kann. Der Gesamtoutput an WEA muss allerdings steigen.

### 5.5.2 Zweitbeste Subventionen ohne Spillover-Effekte

Wenn wir nun also annehmen, dass es aus politischen Gründen nicht möglich ist, eine optimale Pigou-Steuer auf Kohlestrom zu erheben, aber bereits eine suboptimale Steuer (Subvention) auf Kohlestrom existiert (mit dem Spezialfall  $\tau_t = 0$ ), kann eine „zweitbeste“ Subvention auf Windstrom berechnet werden. Der Regulator optimiert nun die Wohlfahrtsfunktion bezüglich der Subventionssätze  $\sigma_t$ . Mit Hilfe der Verhaltensgleichungen (5.15), (5.17), (5.18), (5.21), (5.22) und (5.20) erhält man den zweitbesten Subventionssatz (Beweis siehe Kapitelanhang):

$$\sigma_t = D'_t(k_t) - \tau_t \quad (5.26)$$

Für den Spezialfall, dass die Steuer auf Kohlestrom gleich null ist, also  $\tau_t = 0$ , ist der optimale Subventionssatz für Windstrom genau gleich dem Grenzschaten der Kohle. Für den Fall, dass zufälligerweise tatsächlich die Pigou-Steuer auf Kohle erhoben wurde, ist die optimale Subvention gleich null wie ja schon in Kapitel 5.4 gezeigt wurde.

**Proposition 17** *i. In dem oben beschriebenen Modell mit Verschmutzung, privaten Lerneffekten, einer endogenen Firmenanzahl und der Restriktion, dass der Regulator nur den Subventionssatz für Windstrom verändern kann, kann der Regulator eine zweitbeste Allokation mit Hilfe des Steuersatzes  $\sigma_t = D'_t(k_t) - \tau_t$  erreichen.*

*ii. Wenn die Emissionssteuer geringer als der Grenzschaten ist, sind  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  positiv.*

- iii. Der Subventionsatz der ersten Periode sollte dann und nur größer als in der zweiten Periode sein ( $\sigma_1 \geq \sigma_2$ ), wenn  $D'_1(k_1) - \tau_1 \geq D'_2(k_2) - \tau_2$ , also wenn die Differenz aus Grenzscha­den und suboptimaler Steuer in der ersten Periode größer ist.
- iv. Für den Sonderfall eines konstanten Grenzscha­dens und konstanter Steuersätze gilt  $\sigma_1 = \sigma_2$  für alle Produktionsmengen von  $k_t$ .<sup>9</sup>

Diese Ergebnisse sind mit Blick auf Gleichung (5.26) offensichtlich. Bemerkenswert ist an dieser Stelle, dass Proposition 17 iv verdeutlicht, dass die zweitbest-optimalen Subventionssätze bei privatem Lernen auf Seiten der WEA-Produzenten keinerlei ansteigendes oder abfallendes zeitliches Profil haben. Genau dies ist aber, wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, bei den aktuellen Vergütungssätzen für erneuerbare Energien der Fall.

Denkbar wäre es auch, dass der gleiche Subventionssatz für mehrere Jahre gilt (von vornherein festgelegt). Dann ist es von Interesse, die zweitbeste einheitliche Subvention zu berechnen. Dabei stellt sich heraus, dass dieser Subventionssatz, der in beiden Perioden gleich sein muss, gegeben ist durch (Beweis siehe Kapitelanhang):

$$\sigma = \frac{[D'_1(k_1) - \tau_1] \frac{\partial k_1}{\partial \sigma} + \delta [D'_2(k_2) - \tau_2] \frac{\partial k_2}{\partial \sigma}}{\frac{\partial k_1}{\partial \sigma} + \delta \frac{\partial k_2}{\partial \sigma}} \quad (5.27)$$

Wie nicht anders zu erwarten, ist auch diese Subvention positiv unter Berücksichtigung der komparativ statischen Effekte aus Proposition 16 iii, also dass  $\frac{\partial k_t}{\partial \sigma} < 0$ , und unter der Annahme, dass die Steuersätze nicht größer als der Grenzscha­den sind.<sup>10</sup> Der Subventionssatz ist ein gewichteter Mittelwert aus den beiden optimalen Subventionssätzen von Gleichung (5.26). Bei konstantem Grenzscha­den und konstanter Steuer entspricht der einheitliche Subventionssatz wieder den Perioden-Subventionssätzen.

Schließlich kann man sich fragen, wie der optimale Subventionssatz verändert werden sollte, wenn sich die exogen vorgegebene Steuer ändert:

**Proposition 18** *Unter der Annahme, dass der Grenzscha­den konstant ist, bedingt eine Emissionssteuererhöhung von  $\tau_t$  eine Senkung des zweitbesten Subventionssatzes  $\sigma_t$  um denselben Betrag.*

Beweis:

$$\frac{\partial \sigma_t}{\partial \tau_t} = D_t'' \frac{\partial k_t}{\partial \tau_t} - 1 = -1 \quad \text{für} \quad D_t'' = 0. \quad (5.28)$$

<sup>9</sup>Im Falle von  $CO_2$  ist die Annahme konstanter Grenzscha­den näherungsweise relativ plausibel.

<sup>10</sup>Das mag auf den ersten Blick als selbstverständlich erscheinen, allerdings sind im Hinblick auf den europäischen Zertifikatemarkt da Zweifel angebracht. Der Zertifikatspreis an der Strombörse EEX in Leipzig lag im Verlauf des Jahres 2005 und zu Beginn von 2006 zum Teil deutlich über 20 Euro pro Tonne  $CO_2$  - beispielsweise bei 25,95 Euro am 31. Januar 2006 - und damit über dem Wert, der in einigen Schätzungen für den Grenzscha­den einer Tonne  $CO_2$  ermittelt worden ist. Nordhaus und Boyer (2000) berechnen beispielsweise einen optimalen Steuersatz von 9 Euro je Tonne  $CO_2$  im Jahr 2005.



Aus Proposition 18 folgt, dass die zweitbeste Subvention bei einer Emissionssteuer von null betragsmäßig gleich der erstbesten Emissionssteuer ist. Durch einfaches Umformen der Bedingungen erster Ordnung und der Nullgewinnbedingungen erhält man außerdem folgendes Ergebnis (Beweis im Kapitelanhang):

**Proposition 19** *Unter der Annahme, dass der Grenzscha-den konstant ist, ist in einem Regime mit zweitbesten Subventionssätzen die Kohlestromproduktion und damit auch der Umweltscha-den höher als im sozialen Optimum. Die Windstromproduktion hingegen ist genauso hoch wie im sozialen Optimum.*

Es stellt sich nun die Frage, ob angesichts dieser Erkenntnisse die derzeitigen deutschen Subventionszahlungen dem zweitbesten Subventionssatz entsprechen. Moderne Gas- und Dampfkraftwerke emittieren etwa  $0.4 \text{ kg } CO_2/\text{kWh}$  (Deutsche Emissionshandelsstelle 2005). Die wahre Höhe des Grenzscha-dens einer Tonne  $CO_2$  ist in der Literatur umstritten.<sup>11</sup> Zu Vergleichszwecken nehme ich hier die relativ extremen Werte von 5 und 100 Euro pro Tonne  $CO_2$ . Wenn wir von 5 Euro/Tonne  $CO_2$  ausgehen, ergibt sich in modernen Kraftwerken ein Grenzscha-den von  $0.4 \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kWh}} * 5 \frac{\text{Euro}}{\text{ton } CO_2} = 0.2 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$ . Bei einem Grenzscha-den von 100 Euro/Tonne  $CO_2$  kommt man auf  $4 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$ . Selbst unter der Annahme des hohen Grenzscha-dens und der zusätzlichen Annahme, dass fossile Energie nicht besteuert wird - entgegen der europäischen Realität mit dem  $CO_2$ -Zertifikatehandel - sollte die zweitbeste Subvention nicht höher als  $4 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$  sein. Wenn wir von Produktionskosten der fossilen Stromerzeugung von  $3 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$  ausgehen, ergeben sich in der Summe  $7 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$ . Die derzeitige Einspeisevergütung von durchschnittlich in etwa  $8 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}}$  ist daher auf jeden Fall zu hoch, sollten lediglich private Lerneffekte vorliegen.

### 5.5.3 Komparative Statik bei Lerneffekten mit Spillover-Effekten

Wenn Lerneffekte mit Spillover existieren, ändern sich die komparativ-statischen Ergebnisse, die wir für rein privates Lernen gewonnen haben. Insbesondere sind weniger Effekte eindeutig bestimmbar. Differenzieren der Gleichungen (5.1), (5.2), (5.3), (5.15), (5.17), (5.18), (5.21), (5.22) und (5.20) nach  $\sigma_t$  unter der Annahme, dass Spillover möglich sind, also  $0 \leq \epsilon \leq 1$ , führt zu den Ergebnissen in Proposition 20. Um die Vorzeichen eindeutig zu bestimmen, formuliere ich zwei weitere Bedingung, wobei Bedingung (5.29) der

<sup>11</sup>Tol (2005) gibt einen Überblick über bisherige Studien. Die Schwankungsbreite ist enorm, der Median liegt bei 14 Euro/Tonne  $CO_2$ , der Mittelwert bei 93 Euro/Tonne  $CO_2$ . Die Differenz zwischen den beiden Werten liegt an einigen wenigen extrem hohen Schätzungen (bis zu 800 Euro/Tonne  $CO_2$ ), die den Mittelwert nach oben treiben.

Bedingung (3.13) entspricht und Bedingung (5.30) die Bedingung (5.24) verschärft:

$$\delta\epsilon\Gamma_L^2 + \Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 \geq 0 \quad (5.29)$$

$$\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2 (n-1) + \Gamma_{y_2 L}^2 y_1 n \geq 0 \quad (5.30)$$

**Proposition 20** *Unter der Annahme, dass Steuern und Subventionen derart festgelegt sind, dass sowohl Anlagenbetreiber als auch Kohlekraftwerke simultan im Markt tätig sind und Strom produzieren und es Lerneffekte mit Spillover gibt, gilt:*

$$\frac{\partial p_t}{\partial \sigma_t} = 0, \frac{\partial p_t}{\partial \sigma_{-t}} = 0, \frac{\partial Q_t}{\partial \sigma_t} = 0, \frac{\partial Q_t}{\partial \sigma_{-t}} = 0, \frac{\partial q_t}{\partial \sigma_t} > 0 \text{ und } \frac{\partial q_t}{\partial \sigma_{-t}} = 0.$$

Falls die Bedingungen (5.24) und (5.29) erfüllt sind, gilt:  $\frac{\partial x_1}{\partial \sigma_1} > 0$ ,  $\frac{\partial x_1}{\partial \sigma_2} > 0$  und  $\frac{\partial b_1}{\partial \sigma_2} < 0$ ,  $\frac{\partial k_1}{\partial \sigma_1} < 0$  und  $\frac{\partial k_1}{\partial \sigma_2} < 0$ .

Falls Bedingung (5.30) erfüllt ist, gilt auch:  $\frac{\partial x_2}{\partial \sigma_1} > 0$ ,  $\frac{\partial b_2}{\partial \sigma_1} < 0$  und  $\frac{\partial k_2}{\partial \sigma_1} < 0$ .

Die Effekte für die Outputmengen der einzelnen WEA-Produzenten  $y_t$  und die Firmenanzahl  $n$  der WEA-Produzenten sowie  $\frac{\partial b_t}{\partial \sigma_t}$ ,  $\frac{\partial x_2}{\partial \sigma_2}$ ,  $\frac{\partial k_2}{\partial \sigma_2}$  sind unbestimmt.

Beweis siehe Anhang.

Weil die Grenzkosten der Kohlestromproduzenten unverändert bleiben, ändert sich auch bei Existenz von Spillover-Effekten nichts am Strommarkt; Preis und Menge bleiben gleich. Wie bei privaten Lerneffekten steigt der Output einer Windanlage in der Periode, in der die Subvention ansteigt, und bleibt in der anderen gleich. Alle anderen Effekte sind aufgrund der Modellannahmen nicht mehr eindeutig bestimmbar. Mit zusätzlichen Bedingungen zeigt sich aber, dass der Output an WEA tendenziell steigen und der Kohlestromoutput fallen dürfte. Die Preise fallen tendenziell in der Periode, in der die Subvention nicht erhöht wird.

### 5.5.4 Zweitbeste Subventionen mit Spillover-Effekten

Bei Existenz von Lern-Spillover sollte die zweitbeste Subvention nicht nur den Schaden durch die  $CO_2$ -Emissionen, sondern auch die externen Effekte der Spillover internalisieren. Die zweitbest-optimale Subvention besteht dann aus zwei Termen, wobei der zweite Term die Lerneffekte internalisiert (Herleitung analog zum Fall mit rein privaten Lerneffekten):

$$\sigma_t = D'_t(k_t) + \frac{\epsilon n \Gamma_L^2 [((n-1) \frac{\partial y_1}{\partial \sigma_t} + y_1 \frac{\partial n}{\partial \sigma_t}) \frac{\partial k_{-t}}{\partial \sigma_{-t}} - ((n-1) \frac{\partial y_1}{\partial \sigma_{-t}} + y_1 \frac{\partial n}{\partial \sigma_{-t}}) \frac{\partial k_{-t}}{\partial \sigma_t}]}{\frac{\partial k_t}{\partial \sigma_t} \frac{\partial k_{-t}}{\partial \sigma_{-t}} - \frac{\partial k_t}{\partial \sigma_{-t}} \frac{\partial k_{-t}}{\partial \sigma_t}} \quad (5.31)$$

Die Ergebnisse der komparativ-statischen Analyse des vorigen Abschnitts lassen jedoch keine Schlussfolgerung über das Vorzeichen des zweiten Terms zu. Intuitiv würde man

natürlich annehmen, dass die Spillover-Effekte dazu führen sollten, dass die Subvention der vorgelagerten Industrie höher sein sollte beziehungsweise, wenn wir vom Grenzscha-den absehen, tatsächlich eine Subvention und keine Steuer sein sollte. Wenn die direkten Effekte einer Subventionserhöhung größer als die indirekten wären (also zum Beispiel  $\frac{\partial x_1}{\partial \sigma_1} > \frac{\partial x_2}{\partial \sigma_1}$ ), wäre auch das Vorzeichen eindeutig bestimmbar. Dies ist jedoch nicht zwin-gend der Fall.

## 5.6 Zusammenfassung

Ich habe in diesem Kapitel zeigen können, dass die derzeitige deutsche Regulierung des Windkraftmarkts (und damit analog der Solarenergie) nicht optimal ist. Um das soziale Optimum zu erreichen, müsste vielmehr der Schadstoff mit einer Pigou-Steuer internali-siert werden und - aber nur, falls Spillover vorliegen - die Windanlagenherstellern sub-ventioniert werden. Ähnlich hatte bereits der wissenschaftliche Beirat (2004) des Bundes-wirtschaftsministeriums argumentiert, der wegen der Einführung des europäischen Emis-sionshandels die Abschaffung des EEG vorgeschlagen hat. Der Beirat hält es allerdings für möglich, dass Lerneffekte ein Grund für die Subventionierung sein könnten, lehnt diese aber im gleichen Atemzug ab, da sonst alle möglichen jungen Industrien gefördert werden müssten.

Wenn die Wohlfahrt nur über eine Subventionierung des Windstroms verändert wer-den kann, sollte bei dieser zweitbesten Regulierung im Falle rein privater Lerneffekte die Subvention genau der Differenz zwischen einer bestehenden suboptimalen Steuer und dem Grenzscha-den entsprechen. Bei Spillover-Effekten enthält die zweitbeste Subvention noch einen weiteren Term. Überraschenderweise kann ich mit Hilfe der Modellannahmen das Vorzeichen dieses Terms nicht bestimmen. Dass die Subvention bei Spillover-Effekten zwingend höher sein sollte als bei lediglich privaten Lerneffekten, kann daher nicht gefol-gert werden. Wenn es Spillover gibt, können ebenfalls wenig generelle Aussagen über die Auswirkungen der Subventionierung auf Preise und Mengen der WEA-Betreiber und Her-steller getroffen werden. Allgemein gilt lediglich, dass der Output jedes WEA-Betreibers ansteigen wird.

Für den konkreten Fall der Regulierung in Deutschland konnte ich zeigen, dass die zweitbeste Subventionierung des Windstroms selbst unter der Annahme eines hohen Grenz-schadens und ohne  $CO_2$ -Emissionshandel zu hoch wäre. Die derzeitige Einspeisevergütung von rund 8 ct/kWh sollte also zwingend reduziert werden. Allenfalls sehr hohe Spillover könnten die derzeitige Subventionshöhe noch rechtfertigen. Ob es solche Spillover jedoch überhaupt gibt, diskutiere ich in Kapitel 7.

## 5.7 Anhang

### Die komparativ-statische Analyse bei privaten Lerneffekten:

Da die komparativ-statische Analyse hier für den Fall privater Lerneffekte durchgeführt wurde, gilt also  $L = y_1$ . Entsprechend schreibe ich für die Ableitung nach den Lerneffekten  $y_1$  statt  $L$ .

Beweis von Proposition 16: Differenzieren der Verhaltensgleichungen und Vereinfachung unter Verwendung des Envelopetheorems ergibt:

$$\frac{\partial x_t}{\partial \sigma_t} = y_t \frac{\partial n}{\partial \sigma_t} + n \frac{\partial y_t}{\partial \sigma_t} \quad (5.32)$$

$$\frac{\partial x_{-t}}{\partial \sigma_t} = y_{-t} \frac{\partial n}{\partial \sigma_t} + n \frac{\partial y_{-t}}{\partial \sigma_t} \quad (5.33)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \sigma_t} = \int_0^{x_t} \frac{\partial q_t(\tilde{x})}{\partial \sigma_t} d\tilde{x} + q_t \frac{\partial x_t}{\partial \sigma_t} + \frac{\partial k_t}{\partial \sigma_t} \quad (5.34)$$

$$\frac{\partial Q_{-t}}{\partial \sigma_t} = \int_0^{x_{-t}} \frac{\partial q_{-t}(\tilde{x})}{\partial \sigma_t} d\tilde{x} + q_{-t} \frac{\partial x_{-t}}{\partial \sigma_t} + \frac{\partial k_{-t}}{\partial \sigma_t} \quad (5.35)$$

$$\frac{\partial p_t}{\partial \sigma_t} = P'_t(Q_t) \frac{\partial Q_t}{\partial \sigma_t} \quad (5.36)$$

$$\frac{\partial p_{-t}}{\partial \sigma_t} = P'_{-t}(Q_{-t}) \frac{\partial Q_{-t}}{\partial \sigma_t} \quad (5.37)$$

$$P'_t(Q_t) \frac{\partial Q_t}{\partial \sigma_t} = 0 \quad (5.38)$$

$$P'_{-t}(Q_{-t}) \frac{\partial Q_{-t}}{\partial \sigma_t} = 0 \quad (5.39)$$

$$\frac{\partial q_t}{\partial \sigma_t} = \frac{1}{C_{q_t q_t}^t(q_t, \tilde{x})} > 0 \quad (5.40)$$

$$\frac{\partial q_{-t}}{\partial \sigma_t} = 0 \quad (5.41)$$

$$\frac{\partial b_t}{\partial \sigma_t} = q_t - C_{x_t}^t(q_t, x_t) \frac{\partial x_t}{\partial \sigma_t} \quad (5.42)$$

$$\frac{\partial b_{-t}}{\partial \sigma_t} = -C_{x_{-t}}^{-t}(q_{-t}, x_{-t}) \frac{\partial x_{-t}}{\partial \sigma_t} \quad (5.43)$$

$$\frac{\partial b_t}{\partial \sigma_t} y_1 + \delta \frac{\partial b_{-t}}{\partial \sigma_t} y_2 = 0 \quad (5.44)$$

$$\frac{\partial b_t}{\partial \sigma_t} = \Gamma_{y_1 y_1}^1 \frac{\partial y_1}{\partial \sigma_t} + \delta [\Gamma_{y_1 y_1}^2 \frac{\partial y_1}{\partial \sigma_t} + \Gamma_{y_1 y_2} \frac{\partial y_2}{\partial \sigma_t}] \quad (5.45)$$

$$\frac{\partial b_{-t}}{\partial \sigma_t} = \Gamma_{y_2 y_2}^2 \frac{\partial y_2}{\partial \sigma_t} + \Gamma_{y_2 y_1}^2 \frac{\partial y_1}{\partial \sigma_t} \quad (5.46)$$

Im Folgenden habe ich einige Schreibvereinfachungen gewählt:

$$A = \Gamma_{y_1 y_1}^2 \Gamma_{y_2 y_2}^2 - (\Gamma_{y_1 y_2}^2)^2 > 0$$

$$B = \Gamma_{y_1 y_1}^2 y_1^2 + 2\Gamma_{y_1 y_2}^2 y_1 y_2 + \Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2^2 > 0$$

$$D = C_{x_2}^2 y_2^2 \delta (\Gamma_{y_2 y_2}^2 \Gamma_{y_1 y_1}^1 + \delta A) + C_{x_1}^1 [y_1^2 \delta A + C_{x_2}^2 n \delta B + y_1^2 \Gamma_{y_1 y_1}^1 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 + n C_{x_2}^2)] > 0$$

$A$ ,  $B$  und  $D$  sind aufgrund der Modellannahmen allesamt positiv. Auflösen der 15 Gleichungen (5.32) - (5.46) ergibt:

$$\frac{\partial y_1}{\partial \sigma_1} = \frac{C_{x_2}^2 q_1 y_2 \delta \overbrace{(\Gamma_{y_2 y_1}^2 y_1 + \Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2)}^{\text{Bedingung (5.24)}}}{D} > 0 \quad (5.47)$$

$$\frac{\partial y_2}{\partial \sigma_1} = \frac{-C_{x_2}^2 q_1 y_2 [\Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 + \delta \overbrace{(\Gamma_{y_2 y_1}^2 y_2 + \Gamma_{y_1 y_1}^2 y_1)}^{\text{Bedingung (5.23)}}]}{D} > 0 \quad (5.48)$$

$$\frac{\partial b_1}{\partial \sigma_1} = \frac{C_{x_2}^2 q_1 y_2^2 \delta (\Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2 + \delta A)}{D} > 0 \quad (5.49)$$

$$\frac{\partial b_2}{\partial \sigma_1} = \frac{-C_{x_2}^2 q_1 y_1 y_2 (\Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2 + \delta A)}{D} < 0 \quad (5.50)$$

$$\frac{\partial n}{\partial \sigma_1} = \frac{q_1 (\Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 + C_{x_2}^2 n) + \delta [y_1 A + C_{x_2}^2 n \overbrace{(\Gamma_{y_1 y_1}^2 y_1 + \Gamma_{y_2 y_1}^2 y_2)}^{\text{Bedingung (5.23)}}])}{D} > 0 \quad (5.51)$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial \sigma_1} = \frac{q_1 [\Gamma_{y_1 y_1}^1 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 + C_{x_2}^2 n y_1^2) + \delta (y_1^2 A + C_{x_2}^2 n B)]}{D} > 0 \quad (5.52)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial \sigma_1} = \frac{q_1 y_1 y_2 (\Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2 + \delta A)}{D} > 0 \quad (5.53)$$

Da der Gesamtoutput von einer Subventionsänderung unberührt bleibt ( $\frac{\partial Q_t}{\partial \sigma_t} = 0$  und  $\frac{\partial Q_{-t}}{\partial \sigma_t} = 0$ ), ergibt sich:

$$\frac{\partial k_t}{\partial \sigma_1} < 0 \quad (5.54)$$

Die komparativ-statischen Ergebnisse für  $\sigma_2$  sind symmetrisch. Die komparativ-statischen Ergebnisse für  $\tau_t$  sind im Prinzip genau gleich außer:

$$\frac{\partial p_t}{\partial \tau_t} = 1 \quad (5.55)$$

$$\frac{\partial Q_t}{\partial \tau_t} = \frac{1}{P'_t(Q_t)} \quad (5.56)$$

Die komparativ-statischen Ergebnisse einer einheitlichen Subvention  $\sigma$  lauten wie folgt:

$$P'_t(Q_t) \frac{\partial Q_t}{\partial \sigma} = 0 \quad (5.57)$$

$$\frac{\partial Q_1}{\partial \sigma} = \int_0^{x_t} \frac{\partial q_t(\tilde{x})}{\partial \sigma} d\tilde{x} + q_t \frac{\partial x_t}{\partial \sigma} + \frac{\partial k_t}{\partial \sigma} = 0 \quad (5.58)$$

$$\frac{\partial p_t}{\partial \sigma} = P'_t(Q_t) \frac{\partial Q_t}{\partial \sigma} = 0 \quad (5.59)$$

$$\frac{\partial q_t}{\partial \sigma} = \frac{1}{C_{q_t q_t}^t(q_t, \tilde{x})} > 0 \quad (5.60)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_1}{\partial \sigma} &= \frac{1}{N} [-\Gamma_{y_1 y_1}^1 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 + C_{x_2}^2 n) q_1 y_1^1 - \delta^2 A q_2 y_1 y_2 \\ &\quad + \delta (-A q_1 y_1^2 - C_{x_2}^2 B n q_1 - \Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2 q_2 y_1)] > 0 \end{aligned} \quad (5.61)$$

$$\frac{\partial x_2}{\partial \sigma} = \frac{1}{N} [-(\delta A + \Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2) y_2 (q_1 y_1 + \delta q_2 y_2) - C_{x_1}^1 n q_2 (\Gamma_{y_1 y_1}^1 + \delta B)] > 0 \quad (5.62)$$

$$\frac{\partial y_1}{\partial \sigma} = \frac{1}{N} \left[ \overbrace{\delta (C_{x_1}^1 q_2 y_1 - C_{x_2}^2 q_1 y_2)}^{\geq 0} \overbrace{(\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2 + \Gamma_{y_2 L}^2 y_1)}^{\text{Bedingung (5.24)}} \right] \geq 0 \quad (5.63)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial y_2}{\partial \sigma} &= \frac{1}{N} \left[ -\delta \overbrace{(C_{x_1}^1 q_2 y_1 - C_{x_2}^2 q_1 y_2)}^{\geq 0} \overbrace{(\Gamma_{LL}^2 y_1 + \Gamma_{y_2 L}^2 y_2)}^{\text{Bedingung (5.25)}} \right. \\ &\quad \left. + \Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 \overbrace{(C_{x_2}^2 q_1 y_2 - C_{x_1}^1 q_2 y_1)}^{\geq 0} \right] \geq 0 \end{aligned} \quad (5.64)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n}{\partial \sigma} &= \frac{1}{N} \left[ -\delta (A + \Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2) (q_1 y_1 + \delta q_2 y_2) - C_{x_2}^2 \Gamma_{y_1 y_1}^1 n q_1 y_1 \right. \\ &\quad \left. - \delta C_{x_1}^1 n q_2 \overbrace{(\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2 + \Gamma_{y_2 L}^2 y_1)}^{\text{Bedingung (5.24)}} - \delta C_{x_2}^2 n q_1 \overbrace{(\Gamma_{LL}^2 y_1 + \Gamma_{y_2 L}^2 y_2)}^{\text{Bedingung (5.25)}} \right] > 0 \end{aligned} \quad (5.65)$$

$$\frac{\partial b_1}{\partial \sigma} = \frac{1}{N} \left[ \overbrace{\delta (C_{x_1}^1 q_2 y_1^2 - C_{x_2}^2 q_1 y_1 y_2)}^{\geq 0} (\delta A + \Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2) \right] \geq 0 \quad (5.66)$$

$$\frac{\partial b_2}{\partial \sigma} = \frac{1}{N} \left[ \overbrace{(-C_{x_1}^1 q_2 y_1^2 + C_{x_2}^2 q_1 y_1 y_2)}^{\geq 0} (\delta A + \Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2) \right] \geq 0 \quad (5.67)$$

Der Nenner  $N$  ist negativ und ist wie folgt definiert:

$$N = -(C_{x_1}^1 y_1^2 + \delta C_{x_2}^2 y_2^2) (\delta A + \Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2) - C_{x_1}^1 C_{x_2}^2 n (\Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1^2 + B) < 0 \quad (5.68)$$

**Berechnung der zweitbesten Subventionssätze  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  bei privaten Lern-effekten:**

Die Bedingung erster Ordnung der Wohlfahrtsfunktion bei Ableitung nach  $\sigma_1$  lautet:

$$\begin{aligned}
W_{\sigma_1} = & (P_1(Q_1) - \xi - D_{k_1}^1(k_1)) \frac{\partial k_1}{\partial \sigma_1} + \delta(P_2(Q_2) - \xi - D_{k_2}^2(k_2)) \frac{\partial k_2}{\partial \sigma_1} \quad (5.69) \\
& + P_1(Q_1) \int_0^{x_1} \frac{\partial q_1(\tilde{x})}{\partial \sigma_1} d\tilde{x} - \int_0^{x_1} C_{q_1}^1(q_1, \tilde{x}) \frac{\partial q_1(\tilde{x})}{\partial \sigma_1} d\tilde{x} \\
& + \delta(P_2(Q_2) \int_0^{x_2} \frac{\partial q_2(\tilde{x})}{\partial \sigma_1} d\tilde{x} - \int_0^{x_2} C_{q_2}^2(q_2, \tilde{x}) \frac{\partial q_2(\tilde{x})}{\partial \sigma_1} d\tilde{x}) \\
& + (P_1(Q_1)q_1 - C^1(q_1, x_1) - \Gamma_{y_1}^1(y_1) - \delta\Gamma_{y_1}^2(y_2, y_1))n \frac{\partial y_1}{\partial \sigma_1} \\
& + \delta(P_2(Q_2)q_2 - C^2(q_2, x_2) - \Gamma_{y_2}^2(y_2, y_1))n \frac{\partial y_2}{\partial \sigma_1} \\
& + [(P_1(Q_1)q_1 - C^1(q_1, x_1))y_1 - \Gamma^1(y_1) - F \\
& + \delta((P_2(Q_2)q_2 - C^2(q_2, x_2))y_2 - \Gamma^2(y_2, y_1))] \frac{\partial n}{\partial \sigma_1} = 0
\end{aligned}$$

Mit Hilfe der Verhaltensgleichungen der Firmen (5.15), (5.17), (5.18), (5.20), (5.21) und (5.22) - wobei in (5.17) und (5.20) die Subventionen  $s_{out}$  und  $s_{ent}$  wegfallen - und unter Verwendung des Envelopetheorems kann Gleichung (5.69) wie folgt vereinfacht werden:

$$\begin{aligned}
& (\tau_1 - D_{k_1}^1(k_1)) \frac{\partial k_1}{\partial \sigma_1} + \delta(\tau_2 - D_{k_2}^2(k_2)) \frac{\partial k_2}{\partial \sigma_1} \quad (5.70) \\
& - \sigma_1 \int_0^{x_1} \frac{\partial q_1(\tilde{x})}{\partial \sigma_1} d\tilde{x} - \delta\sigma_2 \int_0^{x_2} \frac{\partial q_2(\tilde{x})}{\partial \sigma_1} d\tilde{x} \\
& \quad - \sigma_1 q_1 n \frac{\partial y_1}{\partial \sigma_1} - \delta\sigma_2 q_2 n \frac{\partial y_2}{\partial \sigma_1} \\
& \quad - \sigma_1 q_1 y_1 \frac{\partial n}{\partial \sigma_1} - \delta\sigma_2 q_2 y_2 \frac{\partial n}{\partial \sigma_1} = 0
\end{aligned}$$

Auflösen nach  $\sigma_1$  unter Verwendung der komparativ-statischen Ergebnisse  $-\frac{\partial k_1}{\partial \sigma_1} = \int_0^{x_1} \frac{\partial q_1(\tilde{x})}{\partial \sigma_1} d\tilde{x} + q_1 \frac{\partial x_1}{\partial \sigma_1}$  und  $-\frac{\partial k_2}{\partial \sigma_1} = \int_0^{x_2} \frac{\partial q_2(\tilde{x})}{\partial \sigma_1} d\tilde{x} + q_2 \frac{\partial x_2}{\partial \sigma_1}$  sowie  $\frac{\partial x_1}{\partial \sigma_1} = y_1 \frac{\partial n}{\partial \sigma_1} + n \frac{\partial y_1}{\partial \sigma_1}$  und  $\frac{\partial x_2}{\partial \sigma_1} = y_2 \frac{\partial n}{\partial \sigma_1} + n \frac{\partial y_2}{\partial \sigma_1}$  ergibt:

$$\sigma_1 = \frac{(D_{k_1}^1(k_1) - \tau_1) \frac{\partial k_1}{\partial \sigma_1} + \delta(D_{k_2}^2(k_2) - \tau_2) \frac{\partial k_2}{\partial \sigma_1} + \delta\sigma_2 (\int_0^{x_2} \frac{\partial q_2(\tilde{x})}{\partial \sigma_1} d\tilde{x} + q_2 n \frac{\partial y_2}{\partial \sigma_1} + q_2 y_2 \frac{\partial n}{\partial \sigma_1})}{-\frac{\partial k_1}{\partial \sigma_1}} \quad (5.71)$$

Analog kann durch Ableiten der Wohlfahrtsfunktion nach  $\sigma_2$  die optimale Subvention  $\sigma_2$  bestimmt werden, die symmetrisch zu  $\sigma_1$  ist:

$$\sigma_2 = \frac{(D_{k_1}^1(k_1) - \tau_1) \frac{\partial k_1}{\partial \sigma_2} + \delta(D_{k_2}^2(k_2) - \tau_2) \frac{\partial k_2}{\partial \sigma_2} + \delta\sigma_1 (\int_0^{x_1} \frac{\partial q_1(\tilde{x})}{\partial \sigma_2} d\tilde{x} + q_1 n \frac{\partial y_1}{\partial \sigma_2} + q_1 y_1 \frac{\partial n}{\partial \sigma_2})}{-\delta \frac{\partial k_2}{\partial \sigma_2}} \quad (5.72)$$

Durch Auflösen dieses Gleichungssystems mit den zwei Variablen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  erhält man nun die optimalen Subventionssätze, die durch Gleichung (5.26) gegeben sind.

**Berechnung des einheitlichen zweitbesten Subventionssatzes  $\sigma$  bei privaten Lerneffekten:**

Die Bedingung erster Ordnung der Wohlfahrtsfunktion ist, wenn wir  $\sigma_1$  durch  $\sigma$  ersetzen mit Gleichung (5.69) identisch. Da es nun aber nur einen Subventionssatz gibt, erhalten wir durch Vereinfachungen eine leicht andere Lösung als in Gleichung (5.70):

$$\begin{aligned}
& (\tau - D_{k_1}^1(k_1)) \frac{\partial k_1}{\partial \sigma} + \delta(\tau - D_{k_2}^2(k_2)) \frac{\partial k_2}{\partial \sigma} \\
& - \sigma \int_0^{x_1} \frac{\partial q_1(\tilde{x})}{\partial \sigma} d\tilde{x} - \delta \sigma \int_0^{x_2} \frac{\partial q_2(\tilde{x})}{\partial \sigma} d\tilde{x} \\
& - \sigma q_1 n \frac{\partial y_1}{\partial \sigma} - \delta \sigma q_2 n \frac{\partial y_2}{\partial \sigma} \\
& - \sigma q_1 y_1 \frac{\partial n}{\partial \sigma} - \delta \sigma q_2 y_2 \frac{\partial n}{\partial \sigma} = 0
\end{aligned} \tag{5.73}$$

Auflösen nach  $\sigma$  führt unmittelbar zu Gleichung (5.27).

### Beweis von Proposition 19:

Im sozialen Optimum ist der Strompreis gemäß der Gleichungen (5.7) und (5.8) gleich den Grenzkosten der Kohlekraftwerke plus dem Grenzscha-den. Da außerdem für die WEA-Betreiber gemäß der Gleichungen (5.5) und (5.6) Preis gleich Grenzkosten gilt, folgt, dass die Grenzkosten der WEA-Betreiber gleich den Grenzkosten der Kohlekraftwerke  $\xi$  und dem Grenzscha-den sein müssen. Bei der zweitbesten Regulierung ohne Steuer auf den Kohlestrom gilt  $p_t = \xi$  und außerdem  $p_t + \sigma_t = C_{q_t}^t$ . Da  $\sigma_t$  dem Grenzscha-den entsprechen muss und dieser annahmegemäß konstant ist, zeigt sich, dass auch bei der zweitbesten Regulierung für die WEA-Betreiber gilt, dass ihre Grenzkosten gleich den Grenzkosten der Kohlekraftwerken  $\xi$  plus dem Grenzscha-den sind. Die marginalen Bedingungen ändern sich folglich nicht.

Bei der erstbesten Regulierung erhält man durch Umformen der Nullgewinnbedingung der WEA-Betreiber folgende Gleichung:

$$p_t = \frac{C^t(q_t, x_t) + b_t}{q_t} \tag{5.74}$$

Für den Preis gilt hier wieder  $p_t = \xi + D'_t(k_t)$ . Bei der zweitbesten Regulierung erhält man durch Umformen der Nullgewinnbedingung der WEA-Betreiber folgende Gleichung:

$$p_t + \sigma_t = \frac{C^t(q_t, x_t) + b_t}{q_t} \tag{5.75}$$

In diesem Fall entspricht der Preis genau den Grenzkosten der Kohlekraftwerke, also  $p_t = \xi$ , die Subvention gleicht dem Grenzscha-den. Der Vergleich von (5.74) und (5.75) zeigt dann, dass sich auch die Nullgewinnbedingungen für WEA-Betreiber bei der zweitbesten Regulierung nicht ändern, da die Durchschnittskosten in beiden Fällen gleich den Grenzkosten der Kohlekraftwerke  $\xi$  plus dem konstanten Grenzscha-den sind.

Da bei der zweitbesten Regulierung im Vergleich zum sozialen Optimum weder der einzelne WEA-Betreiber eine andere Menge produziert noch eine unterschiedliche Anzahl



von WEA-Betreibern in den Markt eintritt, bleibt der Windstromoutput konstant. Weil aber bei der zweitbesten Regulierung aufgrund des geringeren Strompreises der Gesamtstromoutput steigt, wird zwangsläufig mehr Kohlestrom produziert. Damit steigt auch der Umweltschaden.

### Die komparativ-statische Analyse bei Lerneffekten mit Spillover:

Während beim Gleichgewicht mit privaten Lerneffekten die Stabilität des Marktgleichgewichts unmittelbar aus den Modellannahmen folgt, müssen wir im Falle von Spillover-Effekten wie in Kapitel 3 explizit die Stabilität des Gleichgewichts annehmen.

Totales Ableiten der Bedingungen erster Ordnung und der Nullgewinnbedingungen (5.15) - (5.20) nach  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  ergibt folgendes System:

$$M * \begin{pmatrix} \partial y_1 / \partial s_1 \\ \partial y_2 / \partial s_1 \\ \partial n / \partial s_1 \\ \partial b_1 / \partial s_1 \\ \partial b_2 / \partial s_1 \\ \partial q_1 / \partial s_1 \\ \partial q_2 / \partial s_1 \\ \partial k_1 / \partial s_1 \\ \partial k_2 / \partial s_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_2 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.76)$$

$$M * \begin{pmatrix} \partial y_1 / \partial s_2 \\ \partial y_2 / \partial s_2 \\ \partial n / \partial s_2 \\ \partial b_1 / \partial s_2 \\ \partial b_2 / \partial s_2 \\ \partial q_1 / \partial s_2 \\ \partial q_2 / \partial s_2 \\ \partial k_1 / \partial s_2 \\ \partial k_2 / \partial s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (5.77)$$

$M$  ist eine 9x9 - Matrix, die negativ definit sein muss, damit Stabilität gewährleistet ist. Für die neun Hauptminoren muss also gelten:  $|M_1|, |M_3|, \dots, |M_9| < 0$  und  $|M_2|, |M_4|, \dots, |M_8| > 0$ . Zur Bestimmung der komparativ-statischen Ergebnisse ist besonders die 5x5 - Submatrix  $M_{sub}$  interessant, die aus den ersten fünf Zeilen und Spalten von  $M$  besteht.  $M_{sub}$  ist wie folgt definiert:

$$\begin{pmatrix} -\Gamma_{y_1 y_1}^1 - \delta(1 + \epsilon(n-1))\Gamma_{LL}^2 & -\delta\Gamma_{y_2 L}^2 & -\delta\epsilon\Gamma_{LL}^2 y_1 & 1 & 0 \\ -(1 + \epsilon(n-1))\Gamma_{y_2 L}^2 & -\Gamma_{y_2 y_2}^2 & \Gamma_{y_2 L}^2 \epsilon y_1 & 0 & 1 \\ -\delta\epsilon(n-1)\Gamma_L^2 & 0 & -\delta\epsilon\Gamma_L^2 y_1 & y_1 & \delta y_2 \\ C_{x_1}^1 n & 0 & C_{x_1}^1 y_1 & 1 & 0 \\ 0 & C_{x_2}^2 n & C_{x_2}^2 y_2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Es zeigt sich, dass die Determinante  $|M_{sub}| = |M_5| = N$  der Nenner einiger komparativ-statischer Effekte ist. Aufgrund der Stabilitätsbedingungen ( $|M_5| < 0$ ) muss gelten, dass

$N < 0$  ist.  $N$  ist wie folgt gegeben:

$$\begin{aligned}
N = & -[C_{x_1}^1 (\Gamma_{y_1 y_1}^1 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 + C_{x_2}^2 n) y_1^2 + \delta((1 - \epsilon) A y_1^2 + (1 - \epsilon) C_{x_2}^2 \Gamma_{LL}^2 n y_1^2 \\
& + C_{x_2}^2 \Gamma_{y_2 y_2}^2 n y_2^2 + (2 - \epsilon) C_{x_2}^2 \Gamma_{y_2 L}^2 n y_1 y_2 + \epsilon \Gamma_L^2 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 + C_{x_2}^2 n) y_1)) \\
& + \delta(\epsilon \Gamma_L^2 y_1 (\Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2 + \delta A) + C_{x_2}^2 (\delta(1 + \epsilon(n - 1)) A y_2^2 \\
& + \delta \epsilon \Gamma_L^2 (G_{y_2 L}^2 (n - 1) y_2 + \Gamma_{LL}^2 n y_1)) + \Gamma_{y_1 y_1}^1 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2^2 + \epsilon n y_1 (\Gamma_L^2 - \Gamma_{y_2 L}^2 y_2)))] \quad (5.78)
\end{aligned}$$

Zur Schreibvereinfachung verwende ich wieder die folgenden Abkürzungen  $A$  und  $B$ , die aufgrund der Modellannahmen positiv sein müssen:

$$A = \Gamma_{LL}^2 \Gamma_{y_2 y_2}^2 - (\Gamma_{y_2 L}^2)^2 > 0$$

$$B = \Gamma_{LL}^2 y_1^2 + 2 \Gamma_{y_2 L}^2 y_1 y_2 + \Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2^2 > 0$$

Es ergeben sich dann die folgenden komparativ-statischen Effekte:

$$\frac{\partial q_t}{\partial \sigma_t} = \frac{1}{C_{q_t}^t(q_t, \tilde{x})} > 0 \quad (5.79)$$

$$\frac{\partial q_{-t}}{\partial \sigma_t} = 0 \quad (5.80)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial x_1}{\partial \sigma_1} = & \frac{-1}{N} [q_1 (\overbrace{(\Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 + \delta \epsilon \Gamma_L^2)}^{\text{Bedingung (5.29)}}) (\Gamma_{y_2 y_2}^2 + C_{x_2}^2 n) y_1 + \delta(A(1 - \epsilon) \\
& + C_{x_2}^2 n (\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2^2 + (2 - \epsilon) \Gamma_{y_2 L}^2 y_1 y_2 + (1 - \epsilon) \Gamma_{LL}^2 y_1^2))] > 0 \quad (5.81) \\
& \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Bedingung (5.24) wenn } \epsilon=1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial x_2}{\partial \sigma_1} = & \frac{-1}{N} [q_1 (\delta(1 + \epsilon(n - 1)) A y_1 y_2 + \delta \epsilon \Gamma_L^2 \overbrace{(\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2 (n - 1) - \Gamma_{y_2 L}^2 y_1 n)}^{\text{Bedingung (5.30)}} \\
& + \Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2 - \epsilon n \Gamma_{y_2 L}^2 y_1))] > 0 \quad (5.82)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial b_1}{\partial \sigma_1} = & \frac{1}{N} [q_1 \delta(\epsilon \Gamma_L^2 y_1 (\Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2 + \delta A) + C_{x_2}^2 (\delta(1 + \epsilon(n - 1)) y_2 A y_2 \\
& + \epsilon \Gamma_L^2 (\Gamma_{y_2 L}^2 (n - 1) y_2 + \Gamma_{LL}^2 n y_1) \\
& + \Gamma_{y_1 y_1}^1 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2^2 + \epsilon n y_1 (\Gamma_L^2 - \Gamma_{y_2 L}^2 y_2)))] \geq 0 \quad (5.83) \\
& \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{Bedingung (5.24) wenn } \epsilon=1}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{\partial b_2}{\partial \sigma_1} = & \frac{1}{N} [C_{x_2}^2 q_1 (\delta(1 + \epsilon(n - 1)) A y_1 y_2 - \delta \epsilon \Gamma_L^2 \overbrace{(\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2 (n - 1) + \Gamma_{y_2 L}^2 y_1 n)}^{\text{Bedingung (5.30)}} \\
& + \Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 (\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2 - \epsilon n \Gamma_{y_2 L}^2 y_1))] < 0 \quad (5.84)
\end{aligned}$$

$$(5.85)$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial \sigma_2} = \frac{1}{N} (q_2 y_1 \delta(\underbrace{\delta \epsilon \Gamma_L^2 \Gamma_{y_2 L}^2 - \Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2}_{\text{Wenn Bedingungen (5.29) und (5.24), dann } < 0}} - \delta(1 - \epsilon) A y_2) > 0 \quad (5.86)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_2}{\partial \sigma_2} &= \frac{1}{N} [q_2 (C_{x_1}^1 n (\underbrace{(\Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 + \delta \epsilon \Gamma_L^2)}_{\text{Bedingung (5.29)}}) y_1 + \delta (y_2 (\underbrace{\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2 + (2 - \epsilon) \Gamma_{y_2 L}^2 y_1}_{\text{Bedingung (5.24) wenn } \epsilon=1}}) + (1 - \epsilon) \Gamma_{LL}^2 y_1^2)) \quad (5.87) \\ &+ \delta (\delta (1 + (n - 1) \epsilon) y_2 A y_2 + \delta \epsilon \Gamma_L^2 (\underbrace{\Gamma_{y_2 L}^2 (n - 1) y_2 + \Gamma_{LL}^2 y_1 n}_{\text{Bedingung (5.25)}})) \\ &+ \Gamma_{y_1 y_1}^1 (\underbrace{\Gamma_{y_2 y_2}^2 y_2^2 + \epsilon n y_1 (\Gamma_L^2 - y_2 \Gamma_{y_2 L}^2)}_{\text{Bedingung (5.24) wenn } \epsilon=1})) \geq 0 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial b_1}{\partial \sigma_2} = \frac{1}{N} (C_{x_1}^1 q_2 y_1 \delta(\underbrace{\Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2 + \delta \epsilon \Gamma_L^2 \Gamma_{y_2 L}^2}_{\text{Wenn Bedingungen (5.29) und (5.24), dann } > 0}} + \delta(1 - \epsilon) A y_2) < 0 \quad (5.88)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial b_2}{\partial \sigma_2} &= \frac{-1}{N} [q_2 y_1 (\underbrace{\delta \epsilon \Gamma_L^2 (\Gamma_{y_1 y_1}^1 \Gamma_{y_2 y_2}^2 + \delta A)}_{< 0}} + C_{x_1}^1 (\underbrace{\Gamma_{y_2 y_2}^2 (\Gamma_{y_1 y_1}^1 y_1 + \delta \epsilon \Gamma_L^2)}_{\text{Bedingung (5.29)}}) + \delta(1 - \epsilon) A y_1)] \geq 0 \quad (5.89) \\ &\quad \underbrace{\hspace{15em}}_{> 0} \end{aligned}$$

Wenn  $\frac{\partial x_1}{\partial \sigma_1} > 0$  und  $\frac{\partial q_1}{\partial \sigma_1} > 0$  gelten, folgt, weil der Gesamtstromabsatz sich nicht verändert, dass  $\frac{\partial k_1}{\partial \sigma_1} < 0$  gelten muss. Aus der gleichen Logik folgt  $\frac{\partial k_2}{\partial \sigma_1} < 0$  und  $\frac{\partial k_1}{\partial \sigma_2} < 0$ .

# Kapitel 6

## Einführung in die empirische Untersuchung von Lerneffekten

Im zweiten Teil meiner Arbeit will ich nun auf die empirische Seite der Lerneffekte eingehen. Letztlich sind alle theoretischen Ergebnisse von geringem Nutzen, wenn sich empirisch zeigt, dass es so etwas wie Lerneffekte gar nicht gibt. Allerdings wurden Lerneffekte in vielen Industrien empirisch nachgewiesen, bevor Ökonomen versuchten, diese in theoretische Modelle einzubauen.

Als erste Quelle, in der von Lerneffekten gesprochen wird, gilt Wright (1936), der selbst kein Ökonom, sondern Ingenieur war. Er beobachtet Lerneffekte in der Luftfahrtindustrie. In seinem Artikel beschreibt er all die Bereiche, die die Kosten eines Flugzeugs nennenswert beeinflussen. Darunter fällt auch die bisherige Arbeitsmenge und der Materialeinsatz (Rohmaterial und verarbeitetes Material). Er stellt nun fest, dass die Arbeitskosten bei einer Verdopplung des vergangenen kumulierten Outputs um etwa 20 % Prozent zurückgehen, bei einer Verdopplung der kumuliert eingesetzten Rohmaterialien um 5 % und bei verarbeitetem Material um 12 %. Wright verwendet dafür die klassische einfache Schätzgleichung für Lerneffekte, die in der Literatur in fast allen nachfolgenden Arbeiten Ausgangspunkt der Untersuchung ist (die Notation ist bei Wright anders):

$$C = b * Q^{-\alpha} * e^u \quad (6.1)$$

In logarithmierter Form ergibt sich:

$$\ln C = \ln b - \alpha \ln Q + u \quad (6.2)$$

Auf der linken Seite der Gleichung stehen in der Regel die Kosten  $C$  (pro Einheit), manchmal auch der Preis oder eine Produktivitätsvariable (zum Beispiel Output pro Zeiteinheit). Auf der rechten Seite gibt es eine Konstante  $b$ , einen Fehlerterm  $u$ , den kumulierten Output  $Q$  und den zu schätzenden Parameter  $\alpha$ . Der Vorteil der log-linearen Schätzgleichung

besteht darin, dass der geschätzte Parameter  $\alpha$  einfach interpretiert werden kann:  $d = 2^{-\alpha}$  gibt den Lerneffekt an und besagt, dass bei einer Verdopplung des Outputs, die Kosten um  $d$  % sinken. Häufig wird statt des Lerneffekts auch von der Fortschrittsrate  $1 - d$  gesprochen. Wenn der Lerneffekt 20 % beträgt, ist die Fortschrittsrate folglich 80 %.

Roberts (1983) bietet allerdings auch eine Erklärung an, warum die log-lineare Spezifikation, die sehr häufig in empirischen Untersuchungen angenommen wird, keine schlechte Wahl ist, um einen Lernprozess zu beschreiben. Er begreift den Lernprozess als einen Suchprozess nach der besten Lösung analog zum Suchprozess des Handelsreisenden auf der Suche nach der kürzesten Strecke für seine Reiseroute. Eine Lösungsmöglichkeit für dieses Problem ist die „branch and bound method“. Hier wählt man zufällig irgendeine Startroute und schließt dann der Reihe nach all diejenigen Verbindungen aus, die schon nach wenigen Zügen länger sind, beziehungsweise ersetzt die Originalroute, wenn eine bessere gefunden worden ist. Dieser Suchprozess liefert nun eine loglineare Lernkurve. Es ist auch intuitiv klar, dass am Anfang noch sehr viele Routen zu einer Verbesserung führen, dass es aber, je besser die Route bereits ist, um so schwieriger wird, aus den verbleibenden Möglichkeiten eine noch bessere zu finden. Um diese These zu stützen nennt er zusätzlich zu den klassischen empirischen Beispielen, die eine Menge-Kosten-Lernkurve postulieren, weitere Beispiele wie abnehmende Unfallzahlen in der Bergbauindustrie pro Output oder Unfallzahlen pro Fahrerfahrung, die ebenfalls einen log-linearen Verlauf aufweisen.

Im folgenden Abschnitt 6.1 zeige ich, dass die log-lineare Schätzgleichung aus einer Cobb-Douglas-Funktion hergeleitet werden kann. Zahlreiche Autoren haben auf verschiedene Mängel der einfachen Schätzgleichung à la Wright hingewiesen und alternative Vorschläge gemacht, die ich in Abschnitt 6.2 vorstelle. Speziell gehe ich in Kapitel 6.3 auf die empirische Unterscheidung zwischen privaten und öffentlichem Lerneffekten ein. In Abschnitt 6.4 diskutiere ich die Empfehlungen, die aufgrund von Lerneffekten in der Managementliteratur gemacht wurden, bevor ich in Abschnitt 6.5 Lerneffekte im Energiesektor vorstelle.

## 6.1 Herleitung der Schätzgleichung aus einer Cobb-Douglas-Funktion

Die folgende Herleitung zeigt, wie aus der Cobb-Douglas-Produktionsfunktion die typische log-lineare Schätzgleichung hergeleitet werden kann, und verdeutlicht, welche Annahmen damit implizit getroffen werden müssen. Ich lehne mich hierbei eng an das dritte Kapitel aus Berndts „The Practice of Econometrics“ (1991) an.

Die Lernkurve, die wir herleiten wollen, soll die folgende klassische Form haben:

$$\ln c_t = \ln c_1 + \eta \ln Q_{t-1} + u_t \quad (6.3)$$

Dabei sind  $c_t$  die Stückkosten in Periode  $t$ ,  $c_1$  ist eine Konstante und entspricht den Stückkosten in der ersten Periode,  $Q_{t-1}$  bezeichnet den kumulierten Output bis zur Vorperiode und  $u_t$  die stochastische Störgröße in Periode  $t$ . Die Produktionsfunktion sei eine typische Cobb-Douglas-Funktion mit einer Niveauvariable  $A$  und den Inputs  $x_1, x_2$ .

$$y = Ax_1^{\alpha_1} x_2^{\alpha_2} \quad (6.4)$$

Die Summe aus  $\alpha_1 + \alpha_2 = r$  gibt an, ob wir fallende ( $r < 1$ ), konstante ( $r = 1$ ) oder steigende Skalenerträge ( $r > 1$ ) haben. Herkömmliche Kostenminimierung liefert nun die Kostenfunktion  $C$  mit den Inputpreisen  $p_1$  und  $p_2$ :

$$C = r(A\alpha_1^{\alpha_1}\alpha_2^{\alpha_2})^{-\frac{1}{r}} y^{\frac{1}{r}} p_1^{\frac{\alpha_1}{r}} p_2^{\frac{\alpha_2}{r}} \quad (6.5)$$

Logarithmieren dieser Gleichung ergibt die log-lineare Form:

$$\ln C = \ln(r(A\alpha_1^{\alpha_1}\alpha_2^{\alpha_2})^{-\frac{1}{r}}) + \frac{1}{r} \ln y + \frac{\alpha_1}{r} \ln p_1 + \frac{\alpha_2}{r} \ln p_2 \quad (6.6)$$

In der typischen Lernschätzgleichung findet sich auf der rechten Seite eine Variable für den kumulierten Output, die in Gleichung (6.6) noch nicht zu finden ist. Der kumulierte Output kann nun als Niveauvariable interpretiert werden, die die Kosten in einer Periode gleichmäßig absenkt. Das heißt also, dass  $A_t = Q_{t-1}^{-\eta}$ . Somit kann die Kostenfunktion wie folgt unter Hinzunahme von Zeitindizes und einer stochastischen Störgröße  $u_t$  umgeschrieben werden:

$$\ln C_t = \ln(r(\alpha_1^{\alpha_1}\alpha_2^{\alpha_2})^{-\frac{1}{r}}) + \frac{\eta}{r} \ln Q_{t-1} + \frac{1}{r} \ln y_t + \frac{\alpha_1}{r} \ln p_{1t} + \frac{\alpha_2}{r} \ln p_{2t} + u_t \quad (6.7)$$

In Gleichung (6.7) finden sich nun neben dem kumulierten Output und einer Konstanten auch noch der laufende Output sowie die Inputpreise. Diese könnten entweder so mitgeschätzt werden oder aber es muss die Annahme getroffen werden, dass sich die Inputpreise nicht beziehungsweise im Gleichschritt verändern und daher in einer BSP-Deflationsvariable  $BSPD$  zusammengefasst werden können:

$$\ln BSPD_t = \frac{\alpha_1}{r} \ln p_{1t} + \frac{\alpha_2}{r} \ln p_{2t} \quad (6.8)$$

Wenn wir nun die Kosten durch den Deflator teilen ergibt sich in logarithmierter Form die deflationierte Kostenfunktion:

$$\ln C'_t = \ln C_t - \ln BSPD \quad (6.9)$$

Diese modifizierte Kostenfunktion unterscheidet sich von der Lernkurve aus Gleichung (6.3) nun nur noch darin, dass auf der rechten Seite der aktuelle Output als erklärende

Variable steht und dass mit  $C'_t$  die Gesamtkosten und nicht wie mit  $c_t$  die Stückkosten erklärt werden. Wenn nun die Gesamtkosten durch den aktuellen Output geteilt werden beziehungsweise in der logarithmierten Version der aktuelle logarithmierte Output subtrahiert wird, ergibt sich folgende Gleichung:

$$\ln C'_t - \ln y_t = \ln(r(\alpha_1^{\alpha_1} \alpha_2^{\alpha_2})^{-\frac{1}{r}}) + \frac{\eta}{r} \ln Q_{t-1} + \frac{1-r}{r} \ln y_t + u_t \quad (6.10)$$

Dabei entspricht  $(\ln C'_t - \ln y_t)$  den Stückkosten  $c_t$  aus Gleichung (6.3) sowie  $\ln(r(\alpha_1^{\alpha_1} \alpha_2^{\alpha_2})^{-\frac{1}{r}})$  der Konstanten  $c_1$ . Wenn wir nun annehmen, dass  $r = 1$  ist, dass also konstante Skalenerträge vorliegen, kann nun tatsächlich mit Gleichung (6.3) der Lerneffekt geschätzt werden, weil der Einfluss des laufenden Outputs auf die Kosten gleich null ist. Dies bedeutet aber auch: Jedesmal, wenn Lerneffekte gemäß Gleichung (6.3) geschätzt werden, aber nicht-konstante Skalenerträge vorliegen, wird das Schätzergebnis zwangsläufig verzerrt sein. Der Lerneffekt  $d$  kann nun mit Hilfe von  $\eta$ , der Lernelastizität, wie folgt berechnet werden:

$$d = 2^\eta. \quad (6.11)$$

Berndt (1991) weist auch noch auf die Problematik bei der Verwendung von Preisen als Näherungsvariable für die Stückkosten hin. Zur Verdeutlichung führt er den Vergleich von zwei Firmen  $A$  und  $B$  mit unterschiedlichen Preisstrategien in unterschiedlichen Märkten an. Firma  $A$  könnte, um Marktanteile zu gewinnen, eine aggressive Preisstrategie mit niedrigen Preisen zu Beginn und höheren Preisen in späteren Perioden verfolgen. Firma  $B$  könnte hingegen anfangs hohe Preise verlangen und dann mit den sinkenden Kosten langsam auch die Preise senken. Es ist nun denkbar, dass beide Firmen in beiden Märkten die gleiche Erfahrung ansammeln, und der Kosteneffekt auch der gleiche ist. Die Lernkurve, die aber aufgrund der Preisentwicklung gemessen würde, wäre völlig unterschiedlich. Lernkurven, die mit Hilfe von Preisdaten gemessen werden, müssen also mit höchster Vorsicht interpretiert werden.

Mangels Kostendaten sahen sich allerdings viele Forscher gezwungen, dennoch auf Preisdaten zurückzugreifen, wie auch ich in der empirischen Untersuchung in Kapitel 7 Preisdaten verwende. So untersucht Lieberman (1984) für 37 verschiedene chemische Produkte Lernkurven und Preisverhalten in dieser Industrie. Lieberman verwendet eine Schätzgleichung der Form:

$$\ln P_{i,t} = \ln a_i + b_0 t + b_1 \ln X_{1,i,t} + \dots + b_n \ln X_{n,i,t} + u_{i,t} \quad (6.12)$$

Hierbei bezeichnet  $P$  den Marktpreis von Produkt  $i$  zum Zeitpunkt  $t$ , das heißt, auch er kann die Kosten nicht direkt beobachten. Folglich muss er die Annahme treffen, dass das Preis/Kosten-Verhältnis konstant ist beziehungsweise dass eine etwaige Veränderung durch Kontrollvariablen gemessen wird. Eine produktspezifische Konstante ist  $a$ ,  $t$  ist der Zeittrend und die  $X$  sind die erklärenden Variablen. Als erklärende Variablen verwendet

er nun unter anderem den kumulierten Industrieoutput, Zeit, aber auch den jährlichen Output. Eine ganz ähnliche Spezifikation verwendet Gruber (1992) zur Schätzung von Lerneffekten in der Halbleiterproduktion. In beiden Schätzungen wird der jährliche Output als erklärende Variable verwendet. Damit ergibt sich zusätzlich zum bestehenden Problem der Verwendung von Preisen statt Kosten noch ein weiteres. Das Ziel ist hier die Schätzung von Skalenerträgen. Problematisch ist einmal, dass eine konstante Preis/Kosten-Marge eigentlich auch konstante Skalenerträge bedingt. Ansonsten würde sich dieses Verhältnis mit jeder zusätzlichen Einheit bei gegebenem Preis ändern. Zum anderen bestimmen sich Preis und Menge in einer Periode wechselseitig. Je geringer mein Preis ist, um so höher dürfte meine verkaufte Menge sein, und dies völlig unabhängig von den Skaleneffekten.

## 6.2 Erweiterungen der klassischen Lernkurve

Der typische Kritikpunkt an der klassischen Lernkurve besteht darin, dass möglicherweise Skaleneffekte mit Lerneffekten verwechselt werden oder zumindest, dass Skaleneffekte, wenn in der Schätzung berücksichtigt, einen Gutteil der Lerneffekte aufnehmen. Lloyd (1979) weist darauf hin, dass bei einer zunehmenden Auslastung einer Fabrik über die Zeit und steigenden Skalenerträgen fälschlicherweise die sinkenden Kosten der höheren Erfahrung zugewiesen werden könnte. Eine ähnliche Richtung schlägt Hirshleifer (1962) ein, der behauptet, dass Firmen oft das Gefühl hätten, weitere Einheiten zu sinkenden Grenzkosten produzieren zu können. Er versucht dieses Phänomen aber nicht mit Lerneffekten zu erklären, sondern dadurch, dass er zwischen der Outputrate pro Zeiteinheit und dem gesamten Auftragsvolumen über mehrere Zeitperioden unterscheidet. Üblicherweise würde angenommen, dass eine Firma im Prinzip von einem über die Zeit unendlichen Auftragsvolumen ausgehen kann. Es könne nun sein, dass es in einer Zeitperiode steigende Grenzkosten im Output gibt, die Kosten hingegen mit dem gesamten Auftragsvolumen fallen. Wenn also zum Beispiel pro Zeiteinheit zwei Flugzeuge statt einem gebaut werden, mag man hier steigende Grenzkosten beobachten. Gleichzeitig sinken die Kosten mit der Höhe des Gesamtauftragsvolumens. Wenn nämlich der gesamte Auftrag über die Zeit nur in der Produktion einer Maschine besteht, wird man vieles per Hand mit unspezialisierten Kräften erledigen. Bei einem Auftrag über 100 Maschinen über mehrere Perioden wird man jedoch in spezialisierte Maschinen investieren, so dass die Kosten pro Maschine sinken können. Die Kosten sinken also über die Zeit nicht aufgrund steigender Erfahrung, sondern aufgrund von großen Auftragsvolumina, die größere Spezialisierung ermöglichen. Ebenfalls mit Fixkosten argumentieren Hall und Howell (1985). Sie vermuten, dass scheinbar beobachtete Lerneffekte dadurch entstehen, dass Fixkosten im Laufe der Zeit fast oder vollständig abgeschrieben sind, dadurch der zu erbringende Deckungsbeitrag jeder einzelnen Einheit sinkt und daher die Stückkosten scheinbar absinken.



Skaleneffekte und Lerneffekte werden von Preston und Keachie (1964) als erste gemeinsam geschätzt. Sie zeigen am Beispiel der Produktion von Radargeräten, dass der kumulierte vergangene Output einen größeren Einfluss auf die Kosten als der laufende Output hat und fordern daher, dass Lerneffekte in herkömmlichen Kostenfunktionen stärker betont werden sollten.

Eine andere Erweiterung ist die simultane Schätzung des kumulierten Outputs mit einer Trendvariable wie erstmals von Fellner (1969) untersucht. Er wirft die Frage auf, ob statt aggregiertem Output auch Zeit den Rückgang in Arbeitseinsatz pro Outputeinheit erklärt, dass es also eigentlich exogenen technischen Fortschritt gibt. Sein Ergebnis besteht darin, dass manchmal eine logarithmierte Zeitvariable und unter Umständen auch eine einfache Zeitvariable höhere Erklärungskraft besitzt als kumulierter Output.

Hirsch (1952) und (1956) hat schon früh das Modell in eine andere Richtung verfeinert, indem er zwischen verschiedenen Arten des Lernens unterscheidet. Er misst Lernen einmal als Arbeitseinsatz pro Outputeinheit und einmal als Maschineneinsatz pro Outputeinheit. Er verwendet also als abhängige Variable nicht die Stückkosten, sondern Produktivitätsvariablen. Für acht Produkte stellt er nun fest, dass es Arbeitslernerffekte zwischen 18 % und 24 % gibt, die Maschinenlernerffekt hingegen zwischen 6 % und 20 % liegen. Die Unterschiede zwischen den beiden Lernerffekten sind signifikant. Er schlägt vor, in Zukunft zwischen den beiden Lernerffekten zu trennen, was aber dennoch kaum praktiziert wurde. In späteren Studien werden als abhängige Variable fast immer Stückkosten verwendet, also in gewisser Weise ein Aggregat aus Arbeitseinsatz und Maschineneinsatz. Bahk und Gort (1993) haben Hirschs Ansatz weiterverfolgt. Sie versuchen in ihrer Studie über 15 verschiedene Industrien mit 2150 Betriebsstätten über 14 Jahre Learning by Doing in verschiedene Komponenten zu zerlegen, und zwar: Organisatorisches Lernen, Lernen beim Kapital(einsatz) und Lernen in manuellen Tätigkeiten. Dies alles wird auf einer firmenspezifischen Ebene untersucht. Als Ergebnis erhält man, dass organisatorisches Lernen insbesondere während der ersten zehn Jahren nach Gründung einer Firma existiert, Kapitallernen während der ersten fünf bis sechs Jahre.

Nicht berücksichtigte, aber relevante Einflussgrößen können zu Fehlern in der Interpretation führen. Dies zeigt sich exemplarisch an den aufgrund der guten Datenlage häufig untersuchten Lernerffekten in der US-Kriegsproduktion, und zwar sowohl im Flugzeug- als auch im Schiffsbau. Alchian (1963) untersucht die Flugzeugproduktion in den USA während des zweiten Weltkriegs und unterscheidet hier vor allem zwischen verschiedenen Bombertypen. Ziel seiner Arbeit ist, den Einfluss der Erfahrung auf den erforderlichen Arbeitseinsatz und den Vorhersagefehler für zukünftige Produktion zu schätzen. Es zeigt sich, dass nicht alle dieselbe Fortschrittsfunktion haben, und dass der Vorhersagefehler bei Schätzung der Fortschrittsfunktion bei 25 % liegt. Rapping (1965) untersucht, an wel-

chen Faktoren die immensen Produktivitätssteigerungen beim Bau der Liberty-Schiffe im zweiten Weltkrieg gelegen haben könnten. Innerhalb von drei Jahren ist der Output pro Mannstunde nämlich um 122 Prozent angestiegen. Es zeigt sich nun, dass der kumulierte Output eine hohe Erklärungskraft besitzt, dass es also Lerneffekte gegeben hat. Ein bloßer Zeittrend erweist sich zusammen mit dem kumulierten Output als insignifikant.

Die eben dargestellten Studien sind nicht unkritisiert geblieben. Mishina (1999) prüft, ob es Lerneffekte im Bau der Boeing B-17 Bomber im 2. Weltkrieg gegeben hat, wie es bei Alchian (1963) behauptet wird. Mishina zeigt, dass die bisherigen Schätzungen falsch spezifiziert waren, das heißt, dass der kumulierte Output nur eine unzureichende Erklärungsvariable für die Kostenreduktionen war. Er zeigt, dass die Produktivitätsfortschritte besser durch den Zubau von Kapazitäten erklärt werden können. Dies ist eine Variable, die zwar in der Regel (wie der kumulierte Output) nicht sinkt, aber zumindest in Zeiten stagnierender oder rückläufiger Nachfrage auch nicht steigt. Mishina erklärt dies damit, dass vor allem neue Erfahrung, die im Umgang mit neuen Kapazitäten gewonnen wird, zu Lerneffekten führt. Klassisches Lernen des einzelnen Arbeiters hingegen könne es aufgrund der hohen Arbeiterfluktuation nicht gegeben haben, da wegen des kriegsbedingten Fachkräftemangels tendenziell unerfahrenere Arbeiter eingestellt wurden. Die Kapazitätserweiterungen führen auch zu besserer Organisation der Arbeit. In der Organisation (Reduktion von Stillstandszeiten etc.) lag denn auch für Mishina der Hauptaspekt der schnelleren und höheren Produktion. Thompson (2001) untersucht noch einmal die alte Fallstudie zum Bau der „Liberty“-Schiffe im 2. Weltkrieg. Thompson zeigt, dass in den bisherigen Studien wie bei Rapping (1965) Kapitaleinsatz und Qualität des Outputs nur unzureichend berücksichtigt worden ist. Es zeigt sich, dass in den Werften im Laufe der Monate wesentlich mehr Kapital eingesetzt worden ist und damit einen Teil der Produktivitätssteigerungen erklärt. Zum anderen wurde Qualität für Quantität geopfert, das heißt die Qualität der Schiffe sank, so dass die Produktivität scheinbar anstieg.<sup>1</sup> Allerdings ist der Einfluss der fehlenden Kapitalvariablen größer. Mit der besseren Kapitalberücksichtigung sinkt der Lerneffekt von 41 Prozent auf 22 Prozent. Thompson weist darauf hin, dass auch diese Schätzung den Lerneffekt möglicherweise überschätzt, da zum Beispiel der Einfluss von F&E weiterhin keine Berücksichtigung findet.

Argote, Beckman und Epple (1990) sowie Argote und Epple (1990) argumentieren hingegen, dass der Fehler von Rapping insbesondere in der Nichtberücksichtigung von Vergessen liege. Ihr Hauptergebnis besteht darin, dass einmal Gelerntes auch wieder vergessen wird, dass also der kumulierte Output allein eine schlechte Erklärungsvariable ist. Für den Bau der Liberty-Schiffe finden sie, dass lediglich 75 % des Wissens in Erinnerung

---

<sup>1</sup>Lloyd (1979) fordert in diesem Sinne, dass das untersuchte Produkt qualitätsinvariant sein sollte. Allerdings vermutet er, dass in der Regel die Güter mit der Zeit qualitativ hochwertiger werden und einem Kostenanstieg auch ein besseres Produkt gegenüber stehen kann.

bleibt und eine Kostenreduktion in der nächsten Periode bewirkt. Eine Periode dauert hier einen Monat. Dies bedeutet, dass am Ende des Jahres lediglich etwa drei Prozent des Wissens vom Jahresanfang übrig bleibt. Mit Hilfe eines Maximum-Likelihoods-Verfahrens schätzen die Autoren, welcher (exogene) Parameterwert für die Vergesslichkeit die maximale Wahrscheinlichkeitsfunktion bringt.

Argote, Beckman und Epple untermauern ihre Ergebnisse mit einer Studie über den Bau der Lockheed L-1011 in den 70-er Jahren. Beim Bau dieses Flugzeugtyps sind die prognostizierten Lerneffekte ausgeblieben und die Flugzeuge mit der Zeit teurer geworden. Sie führen dies auf organisatorisches Vergessen (im Gegensatz zu Lernen) zurück. Weil die Produktion sehr starken Schwankungen unterlag, wurde immer wieder ein Teil des Gelernten vergessen. Die Autoren argumentieren, dass nicht der gesamte kumulierte Output zum Lernen beiträgt, sondern auch noch immer ein Teil des Gelernten abgeschrieben werden muss. Früheres Lernen (frühere Produktion) ist also weniger wert. Ein weiterer Faktor für Vergessen (wenn auch nicht im Fall Lockheed) könnte Mitarbeiterfluktuation sein. Wenn ständig neue Mitarbeiter angelernt werden müssten und gelernte Mitarbeiter die Firma verließen, ginge alte Erfahrung verloren.

Ein sehr allgemeiner Kritikpunkt an der Idee der Lerneffekte und dem Glauben, dies könne bei allen Gütern beobachtet werden, kommt von Hart (1983). Hart weist darauf hin, dass bei inflationsbereinigten Preisen nicht alle Güter Lernkurven vorweisen können, ansonsten müsste das reale Preisniveau bei zunehmender Produktion ständig fallen. Er folgert daher, dass Lernkurven im Prinzip nichts anderes als Bezeichnungen einer ansonsten unbekanntem Entwicklungsbeziehung seien. Ähnlich argumentieren Hall und Howell (1985). Je nach Wahl des Inflationsindex müssen mehr oder weniger Produkte zwangsläufig fallende Kosten aufweisen. Bei einem Gesamtindex liegen etwa 50% über und die andere Hälfte unter dem Index. Folglich dürfte man bei der Hälfte der Güter vermeintliche Lerneffekte beobachten.

Barrios und Stroble (2004) zeigen wiederum, dass die Lerneffekte nicht nur durch fehlende Einflussgrößen, sondern auch durch die Verwendung unterschiedlicher ökonometrischer Methoden starken Schwankungen unterliegen und zu jeweils unterschiedlich Ergebnissen führen können. Hierfür verwenden sie einen Datensatz mit Angaben über spanische Firmen aus dem produzierenden Gewerbe für die Jahre 1990-1998. Sie vergleichen unter anderem eine gewöhnliche Kleinste-Quadrate-Schätzung mit einer Fixed-Effects-Schätzung. Wichtiger Unterschied in ihrer Schätzgleichung im Vergleich zu anderen Untersuchungen ist, dass Lerneffekte nicht zu niedrigeren Kosten führen, sondern die Produktivität steigern. Bei einer KQ-Schätzung finden sie keine signifikanten Lerneffekte. Es liegt hier die Vermutung nahe, dass vor allem firmspezifische Effekte vorliegen, so dass die KQ-Schätzung verzerrt ist. Bei der Fixed-Effect-Schätzung gibt es nun einen hoch signi-

fikanten firmenspezifischen Lerneffekt (mit kumuliertem Output als Lernvariable) sowie signifikante Spillover. Diese scheinen nicht-linearer Natur zu sein, da der einfache Effekt positiv, der quadrierte jedoch Effekt negativ ist. Die erheblichen Differenzen dieser Ergebnisse auch zu vorhergehenden Studien führen die Autoren unter anderem darauf zurück, dass sie Firmendaten anschauen, nicht jedoch Daten einzelner Produktionsstätten.

### 6.3 Privates oder öffentliches Lernen?

Wenn Lerneffekten untersucht werden, ist von besonderem Interesse, wem diese Lerneffekte eigentlich nützen. Sind die Lerneffekte rein privater Natur und nützen also nur der Firma selbst? Oder gibt es Spillover-Effekte auf andere Firmen? Durch die Ergebnisse der Kapitel 3 und 4 ist klar, welche wesentliche Veränderungen sich im Firmenverhalten und im Hinblick auf die optimale Politik des Regulators durch Spillover-Effekte ergeben. Empirisch stellt sich nun die Frage, ob Spillover relevant sind. Viele Autoren gehen - möglicherweise mangels ausreichender Daten - entweder von vollständigen Spillover-Effekten in einer Industrie aus (zum Beispiel Lieberman (1984), Gruber (1992)) oder - wie in den zuvor genannten Arbeiten zur US-Kriegsproduktion - von rein privaten Lerneffekten. Barrios und Strobl (2004) haben, wie in 6.2 erwähnt, zwischen privatem und öffentlichem Lernen unterschieden und gezeigt, dass bei ihrem Datensatz je nach verwendeter Methode mal privates, mal öffentliches Lernen signifikant ist.

Irwin und Klenow (1994) können für die Halbleiterindustrie zeigen, dass es insgesamt Lerneffekte von etwa 20 % gibt und Firmen etwa dreimal so viel durch ihren eigenen Output wie durch den kumulierten Output lernen. Bei den Spillover-Effekten wiederum finden sie keinen Unterschied zwischen Firmen und Ländern, das heißt, dass das Lernen international ist und es keine nationalen Hürden gibt. Von Interesse ist, wie die Autoren die kumulierte Erfahrung  $E$  spezifizieren:

$$E_i = Q_i + \alpha(Q_c - Q_i) + \gamma(Q_w - Q_c) \quad (6.13)$$

Hierbei ist  $Q_i$  der kumulierte Output in einer Firma, das Subskript  $c$  bezeichnet den kumulierten Landesoutput und  $w$  den kumulierten weltweiten Output. Damit gilt, dass Lernen firmenspezifisch ist, wenn  $\alpha = \gamma = 0$ , landesspezifisch, wenn  $\alpha = 1$  und  $\gamma = 0$  und nur weltweit, wenn  $\alpha = 1$  und  $\gamma = 1$ .

Für den Bau von US-Kernkraftwerken zeigt Zimmerman (1982), dass es sowohl private als auch öffentliche Lerneffekte gab, die Spillover aber ökonomisch nicht besonders relevant waren, eine Subventionierung also nicht gerechtfertigt gewesen wäre. Lester und McCabe (1993) vergleichen die Lerneffekte in US-amerikanischen und französischen Atomkraftwerke. Weil die Lerneffekte besonders groß innerhalb Typen gleicher Bauart und bei

Atomanlagen mit mehreren Reaktoren seien, konnten in Frankreich durch die einheitliche, monopolisierte Betreiberstruktur höhere Lerneffekte als in den USA mit mehreren kleineren Betreibern realisiert werden.

## 6.4 Managementempfehlungen bei Lerneffekten

Dass Lerneffekte nicht nur für den Wissenschaftler, sondern insbesondere für den Praktiker von Interesse sind, zeigt sich nicht zuletzt darin, dass mit Wright (1936) zuerst ein Praktiker auf das Phänomen hingewiesen hat. Hirschmann (1964) glaubt anhand von Beispielen aus mehreren Industrien mit sehr wenigen Datenpunkten nachweisen zu können, dass Lerneffekte vorliegen. Nachdrücklich betont er allerdings, dass der Lerneffekt für den Manager keine exogene Variable in dem Sinne sei, dass mechanisch bei einer Verdopplung des Outputs eine x-prozentige Kostensenkung erfolge, sondern dass der Manager eine Atmosphäre schaffen müsse, in der Lernen möglich sei. Lerneffekte bräuchten unternehmensinternen Glauben an mögliche Verbesserungen. Zu einem zentralen Bestandteil der Unternehmensstrategie sind Lerneffekte durch eine Studie der Boston Consulting Group, Henderson (1972), geworden.

Die empirische Erkenntnis aus ihrer Beratungstätigkeit, verdeutlicht durch zahlreiche Graphiken, besteht darin, dass Kosten um 20-30 % pro Verdopplung der kumulierten, privaten Produkterfahrung zurückgehen. Ein wichtiger strategischer Effekt liegt darin, dass ein hoher Marktanteil zu einem im Vergleich zur Konkurrenz höheren Kostensenkungspotential führt. Daher bedeutet ein hoher Marktanteil heute auch eine höhere Gewinnspanne morgen. Das bedeutet aber auch, dass, wer am Anfang einen Kostennachteil hat, beständig seinen Marktanteil erhöhen muss, um nicht ins Hintertreffen zu geraten beziehungsweise aus dem Markt auszuschneiden. Die Höhe des Marktanteils bei Wachstumsprodukten repräsentiert daher einen bestimmten Zukunftswert.

Hall und Howell (1985) diskutieren die Schwächen dieser Studie. Sie konzedieren zwar, dass es prinzipiell Lernen und Kostenreduktionen durch Erfahrung gibt. Typische Lernkurven gebe es jedoch nur für circa zwei Jahre, dann sei der Effekt kaum mehr messbar, wie in verschiedenen empirischen Studien hauptsächlich aus der Luftfahrtindustrie nachgewiesen sei. Die Autoren kritisieren jedoch, dass die ersten beobachteten Punkte oft eine ganz andere Erfahrungskurve nahelegen als die Erfahrungskurve, die sich nach vielen Jahren ergibt. Die wahre Kurve sei also erst ex post zu sehen, weshalb Erfahrungskurven als Prognoseinstrument ungeeignet seien.

Ghemawat (1985) empfiehlt schließlich die Verwendung der Erfahrungskurve als strategisches Instrument nur nach einer eingehenden Prüfung des Firmenumfelds. Unter ande-

rem müsse klar sein, ob eine Firma Lerneffekte für sich behalten kann und ob überhaupt wesentliche Lerneffekte in der Industrie möglich sind.

## 6.5 Lerneffekte im Energiesektor

Da ich im Kapitel 7 Lerneffekte im Windkraftsektor untersuche, möchte ich noch etwas näher auf Studien zu Lerneffekte im Energiesektor eingehen. Während in den 70-er und 80-er Jahren vor allem Lerneffekte in Atom- und Kohlekraftwerken untersucht wurden, richtete sich seit den 90-er Jahren der Fokus auf erneuerbare Energien.

### Atom- und Kohleenergie

Außer den bereits erwähnten Untersuchungen im Atomenergiesektor von Zimmerman (1982) und Lester und McCabe (1993) haben Joskow und Rozanski (1979) untersucht, ob es Lerneffekte im Betrieb von Kernkraftwerken gibt. Konkret wird die Frage aufgeworfen, ob mehr Erfahrung dazu führt, dass ein Kernkraftwerk näher an seiner Kapazitätsgrenze arbeitet. Lernen ist hier also zwangsläufig nach oben hin beschränkt, da ein Kraftwerk nicht länger als rund um die Uhr laufen kann. Die Schätzgleichung lautet hier:

$$\ln(\text{Auslastung}) = \ln(\text{Konstante}) + b \ln(\text{Leistung}) + c(\text{Anlagenalter}) + k(1/(\text{kumulierter Anlagenoutput pro Nennleistung})) \quad (6.14)$$

Die Schätzergebnisse zeigen zweierlei: Kraftwerke jüngeren Datums haben eine bessere Auslastung und die Auslastung steigt mit zunehmender Erfahrung im Betrieb eines bestimmten Kraftwerks. Zudem ist die Auslastung bei größeren Kraftwerken tendenziell geringer als bei kleinen.

Joskow und Rose (1985) untersuchen, ob es in Kohlekraftwerken in den USA unter anderem Lerneffekte und Skaleneffekte gegeben hat. Ihre Schätzgleichung spezifizieren sie wie folgt:

$$LAC = \sum_{t=1960}^{1979} a_t T_t + \dots + b_1 \text{Leistung} + \dots + b_7 \text{Exper1} + b_8 \text{Exper2} + b_9 \text{Exper3} + \dots \quad (6.15)$$

$LAC$  ist der Logarithmus der realen Kosten pro KW installierter Leistung eines Kraftwerks.  $T_t$  ist eine Zeitindikatorvariable,  $\text{Leistung}$  ist die logarithmierte Leistung eines Kraftwerks.  $\text{Exper1}$  ist eine Erfahrungsvariable und gibt die kumulierte Anzahl an Kraftwerken gleichen Typs an.  $\text{Exper2}$  ist die kumulierte Erfahrung, die innerhalb eines Kraftwerks durch Kohleproduktion gewonnen wurde.  $\text{Exper3}$  schließlich misst die kumulierte Bauerfahrung in der gesamten Industrie. Der Datensatz hat die Form eines unbalancierten Panels, weil es nicht zu jedem Zeitpunkt für jeden Typus eine Beobachtung gibt. Die Au-

toren verwenden feste Effekte in ihrer Schätzung. Es zeigen sich deutliche Skalenerträge und typenspezifische Lerneffekte.

### **Windkraft**

Mit dem Aufschwung der Windkraft in den neunziger Jahren wurde auch hier die Frage nach möglichen Lerneffekten aufgeworfen. Neij (1997) beobachtet, dass es nicht nur Fortschritte in der Produktion, sondern auch in der Maximalleistung und Verfügbarkeit gegeben hat. Dort ist der weitere mögliche Fortschritt aber gering, da die Verfügbarkeit von Windenergieanlagen (die Zeit, in der eine WEA prinzipiell Wind erzeugen kann) bereits Anfang der neunziger Jahre laut Gipe (1991) 98 % erreicht hat. Neij (1997) behauptet, dass die Erfahrung bei der Wahl geeigneter Installationsplätze für neue Anlagen ebenfalls gestiegen sei. All dies sollte Sorge dafür, dass der Windstrompreis schneller fallen sollte als aufgrund der Erfahrungskurve bei Windturbinen zu erwarten wäre. Der Lerneffekt, den Neij für Windturbinen ermittelt, liegt entsprechend dieser Hypothese in ihrer Studie bei lediglich 4 %, für Windstrom hingegen bei 9 %. In einer Fortsetzung ihrer Arbeit untersucht Neij (1999) die Kostenentwicklung von Windenergieanlagen in Dänemark. Anhand der einfachen Lernschätzgleichung gemäß Gleichung (6.3) mit vollständigen Spillover erhält sie Lerneffekte von etwa 6 %. Allerdings können diese nur dann ermittelt werden, wenn alle Windenergieanlagen im Datensatz sind. Bei Anlagen der gleichen Größenklasse finden sich, wenn überhaupt, nur noch geringe Lerneffekte. Die Lerneffekte, die sie ermittelt, ergeben sich also nur durch den geringeren Preis, der pro kW bei steigender Anlagengröße gezahlt wird. Trotz der eher geringen Lerneffekte prognostiziert sie fallende Preise für Windstrom, da die Laufzeiten von 20 auf 25 Jahre steigen und die Instandhaltungskosten sinken würden. Diese Behauptungen werden allerdings nicht weiter empirisch untermauert.

Während Neij lediglich die einfache Schätzgleichung verwendet, schätzen Isoard und Soria (2001) simultan, ob es Skaleneffekte und Lerneffekte in der Windenergie und in der Solarindustrie gegeben hat. Sie verwenden für ihre Schätzung Kostendaten von 1976 - 1994 für Photovoltaik und von 1981 - 1995 für Wind. Die Quelle der Winddaten ist die Energieabteilung der EU-Kommission. Für den kumulierten Output werden weltweit aggregierte Daten für die installierte Kapazität verwendet. Dies bedeutet, dass sie vollständige Spillover annehmen. Ihre entscheidende Neuerung ist, dass sie auch die Skalenerträge schätzen. In der traditionellen Schätzgleichung mit konstanten Skalenerträgen ergibt sich ein Lerneffekt von 15 % (Elastizität: -0.23). Bei flexiblen Skalenerträgen ergibt sich ein Lerneffekt von 18 % und es zeigt sich, dass es in den frühen Jahren tendenziell abnehmende Grenzerträge gegeben hat mit der Tendenz zu konstanten Skalenerträgen in den letzten Jahren. Die Skalenerträge sind zwar immer signifikant, aber doch so nahe an 1, dass die Annahme von konstanten Skalenerträgen ökonomisch weiterhin akzeptabel ist.

Hansen, Jensen und Madsen (2003) untersuchen nicht nur, ob Lerneffekte in der dänischen Windturbinenindustrie existierten. Sie berücksichtigen insbesondere, ob es innerhalb eines Projekts (also bei Aufstellung mehrerer WEA an einem Ort) Rabatte gegeben hat. Sie nehmen an, dass vollkommene Spillover bestanden. Ihre Schätzgleichung sieht wie folgt aus:

$$\ln P_{i,t} = \ln \alpha + \beta \ln N_{t-1} + \delta \ln E_{i,t} + \gamma \ln A_{i,t} + \phi \ln N_t + \mu \ln X_t + \lambda t + \epsilon_{i,t} \quad (6.16)$$

Mit  $P$  ist der Gesamtpreis beziehungsweise die Investitionsausgaben für eine Windanlage im Projekt  $i$  zum Zeitpunkt  $t$  bezeichnet.  $N$  steht für die kumulierte Erfahrung, die einmal in Anzahl Windturbinen und zum anderen in kumulierter installierter Leistung gemessen wird.  $E$  steht für die installierte Leistung in einem Projekt.  $A$  gibt die Anzahl der Windturbinen eines Projekts an. Folglich können Rabatte gemessen werden. Die Autoren versuchen auch Skalenerträge zu messen, indem sie auch die Produktionsmenge in der Periode als erklärende Variable verwenden. Dabei ergibt sich das bereits diskutierte Problem, dass Menge und Preis nicht unabhängig voneinander sind.  $X$  ist der Exportanteil,  $t$  der Zeitrend. Auch hier gilt die Annahme, dass entweder der Preis gleich den Kosten ist oder dass das Preis-Kosten-Verhältnis konstant bleibt. Die kumulierte Produktion, sei sie in Anlagenanzahl oder Leistung gemessen, ist in allen Schätzungen signifikant. Der Lerneffekt beträgt etwa 13 %.  $A$  ist ebenfalls signifikant und deutet auf einen Preisrabatt von 5 % bei jeder Verdopplung der Bestellgröße hin. Die aktuelle Produktion ist hingegen nicht signifikant, der Zeittrend ist in den meisten Schätzungen signifikant.

Klaassen, Miketa, Larsen und Sundqvist (2005) schätzen nun analog zu Kouvaritakis, Soria und Isoard (2000) nicht nur den Effekt des normalen Lernens (kumulierter Output), sondern auch die Effekte der kumulierten Forschung („Learning-by-searching“ genannt) auf die Preisentwicklung. Sie nehmen an, dass der Forschungserfolg erst nach ein paar Jahren eintritt und Forschung auch veraltet. Konkret gehen sie daher von einer Zeitverzögerung von 2 Jahren und eine Abschreibungsrate von 3 % aus. Die Forschungsdaten sind aggregierte staatliche Ausgaben für die Windenergieforschung. Die Autoren schätzen immer die aggregierten, kumulierten Produktionsmengen, gehen also von Spillover-Effekten innerhalb, aber nicht zwischen den Ländern aus. Dies überzeugt allerdings nicht, da insbesondere die britischen Turbinen fast alle aus Dänemark kommen. Ihre Kostendaten vom Institut für Solare Energieversorgungstechnik beziehen sich nicht nur auf den Preis von Windturbinen, sondern auf Investitionskosten pro kWh, das heißt, dass Netzverbindung, Bau der Anlage etc. in den Kosten enthalten sind. Sie verwenden ein Fixed-Effects Modell für die drei Länder. Hauptergebnis ist ein Lerneffekt von 5,4 % und ein Forschungs- („Learning-by-searching“-) Effekt von 12,6 %.

Neij et al. (2003) schätzen für Dänemark, Deutschland, Spanien und Schweden Lernkurven mit der einfachen Schätzgleichung und finden Lerneffekte zwischen 4 % und 10 %.



Auch hier ist Annahme getroffen worden, dass nur der kumulierte Output in einem Land für die Kostensenkung verantwortlich ist. Wieder kann diese Annahme nicht überzeugen, da zum Beispiel in Schweden fast alles von dänischen Firmen gebaut worden ist.

Junginger, Faaij und Turkenburg (2005) untersuchen Daten für Großbritannien und Spanien und zwar für ganze Windparks, für die sie einzelne Investitionsdaten haben. Die erklärende Variable ist die kumulierte installierte Leistung weltweit. Die Schätzgleichung, die sie in ihrer Arbeit leider nicht angeben, dürfte vermutlich die einfache Schätzgleichung, wie sie durch Gleichung (6.2) gegeben ist, sein. Ihre Lerneffekte sind 15 % für Großbritannien und 19 % für Spanien.

# Kapitel 7

## Der Einfluss von Lerneffekten auf die Preise der Windturbinenindustrie

Der Literaturüberblick im vorigen Kapitel zeigt, dass bisher die Auffassung vertreten wurde, dass es Lerneffekte bei der Produktion von Windenergieanlagen gibt. In diesem Kapitel untersuche ich, ob Lerneffekte wirklich mit den bisher verwendeten Methoden gemessen werden können und welche Einflussgrößen auf die Preise der Windenergieanlagen wirken. In Abschnitt 7.1 stelle ich die verschiedenen Datenquellen meines Datensatzes vor und diskutiere in Abschnitt 7.2 die Schwächen der Rohdaten und beschreibe, wie ich die Daten für den für die Schätzungen verwendeten Datensatz aufbereitet habe. Diesen Datensatz beschreibe ich mit Hilfe von einigen deskriptiven Statistiken in Abschnitt 7.3. Schätzmethode und Schätzergebnisse präsentiere ich in Abschnitt 7.4 und ziehe in 7.5 einige Schlussfolgerungen.

### 7.1 Datengewinnung

Obwohl die Windindustrie in den neunziger Jahren außer durch das EEG auch durch andere Programmen wie dem 250 MW Programm gefördert wurde und in diesem Berichtspflichten hatte, steht doch kein öffentlich zugänglicher Datensatz zur Verfügung, der über mehrere Jahre hinweg Kosten, technische Kennzeichen und Verkaufszahlen einzelner Anlagen beinhaltet. Dies zwang mich, meinen Datensatz aus mehreren verschiedenen Quellen selbst zusammenzustellen. Hauptquelle hierfür war die Publikation „Windkraftanlagenmarkt“ (1992 - 2004) des Sun-Media-Verlags. Hier werden ab 1992 jährlich die aktuell in Deutschland angebotenen Anlagenmodelle aufgelistet. Neben Hersteller und Typ wird in der Regel Nennleistung, Rotorhöhe, Rotordurchmesser, Preis, die bisher in Deutschland und weltweit installierten Anlagen jedes einzelnen Typs sowie weitere technische Daten angegeben. Insgesamt ergibt sich so ein Datensatz, der Angaben zu 2.645

Anlagen enthält. In diesem Datensatz finden sich zwar Angaben zu bisher produzierten Anlagen eines bestimmten Typs, nicht jedoch zur Gesamtanzahl produzierter Anlagen einzelner Firmen oder aller Hersteller zusammen, sei es in Deutschland oder weltweit. Eine Quelle für diese Daten sind die Veröffentlichungen der Firmen selbst und zwar entweder in den Geschäftsberichten (NEG Micon (1999 - 2003), Vestas (1997 - 2004)) oder auf den Homepages der Firmen (Enercon (2005), DeWind (2004), REpower (2004), AN Bonus (2005)). Diese Daten waren allerdings wiederum zum Teil unvollständig, weil häufig Angaben zu früheren Jahren, also Anfang und Mitte der Neunziger, fehlten. Ergänzend verwendete ich daher als weitere Quellen sowohl die frei zugänglichen Produktionsdaten von BTM-Consult (1997 - 2003), einer dänischen Beratungsfirma, die sich auf Windenergie spezialisiert hat, aber auch Produktionsdaten von „Windenergie“, einer jährlichen Veröffentlichung des Bundesverbands der Windenergie (1999 - 2005), sowie aus „Windenergiereport 2002“ vom Institut für Solare Energieversorgungstechnik (2002).

## 7.2 Datenaufbereitung

Der Rohdatensatz bestand zunächst nur aus den Informationen aus „Windkraftanlagenmarkt“ mit den Daten aus dem Zeitraum zwischen 1992 und 2003. Für die Jahre 1993 und 1994 liegen jeweils zwei Datensätze vor, einmal für das Frühjahr und für den Herbst. In beiden Fällen habe ich die Datensätze zu einem Jahrgang zusammengefasst. In einem ersten Schritt habe ich ganz offensichtliche Fehler des Datensatzes korrigiert. Insbesondere waren das Tippfehler in „Windkraftanlagenmarkt“. Beispielsweise war bei einem Anlagentyp die Leistung in einem Jahr mit 60 kW angegeben war, obwohl derselbe Typ in allen anderen Jahren mit 600 kW angegeben war. Preisangaben in D-Mark habe ich in Euro und Angaben in anderen Währungen wie Pfund, US-Dollar oder Schwedischen Kronen zum jeweiligen Wechselkurs des betreffenden Jahres (Statistisches Bundesamt (1992 - 2004)) in D-Mark beziehungsweise Euro umgerechnet. Die Angaben zu Referenzanlagen in diesem Datensatz waren leider nicht verwendbar, da in zu vielen Fällen die Angabe hierzu fehlte. Außerdem war keine Systematik bezüglich der Angaben zu den weltweit installierten Anlagen erkennbar. Es scheint so, als ob die Anlagenzahl mal inklusive und mal exklusive der deutschen Anlagen berechnet wurde. Ich habe die Angaben über Referenzanlagen daher in den Schätzungen nicht weiter verwendet.

Ein weiteres Problem stellten Fusionen oder Übernahmen von Firmen sowie Kooperationen zwischen einzelnen Firmen dar. Da in den Schätzungen versucht wird, den Einfluss des einzelnen kumulierten, vergangenen Firmenoutputs auf die Produktionskosten beziehungsweise Preise zu schätzen, stellt sich die Frage, welcher vergangene Output relevant ist. Bei Übernahmen (wie beispielsweise Tacke von EnronWind und EnronWind wieder-

um von General Electric) bin ich davon ausgegangen, dass die eigentliche Firma und das Lernen davon nicht beeinflusst wird, dass es sich also abgesehen von der Eigentümerstruktur und dem Namen um die gleiche Firma handelt. Kooperationen gab es insbesondere zwischen Vestas und Gamesa in den neunziger Jahren bis 2002. Vestas gibt in seinen Geschäftsberichten seine installierten Anlagen mit und ohne Kooperation an. Ich habe in den Schätzungen die installierte Anlagenanzahl inklusive Kooperation verwendet, da aufgrund der Kooperation auch Lernfortschritte geteilt werden dürften. Zu Doppelzählungen kommt es nicht, da Gamesa-Anlagen im relevanten Zeitraum zwischen 1992 und 2003 noch nicht in Deutschland angeboten wurden beziehungsweise zumindest nicht in den Angebotslisten von „Windkraftanlagenmarkt“ geführt wurden. Eine echte Fusion gab es 1997 zwischen den dänischen Firmen Nordtank und Micon zu NEG Micon. Ich bin hier davon ausgegangen, dass die Synergieeffekte im Lernen (so es solche überhaupt gibt) sofort einsetzen, das heißt also, dass NEG Micon ab 1997 über das gesamte Wissen beider Firmen verfügt.

An zusätzlichen Variablen habe ich Angaben über die Inflationsentwicklungen, einen Energie- und einen Stahlpreisindex aus den statistischen Jahrbüchern des Statistischen Bundesamts (1992 - 2004) der jeweiligen Jahre eingefügt. Als Inflationsvariable habe ich den Verbraucherpreisindex gewählt. Alle Preise habe ich mit diesem Index deflationiert. Die Wahl dieses Index schien mir am geeignetsten, allgemeine Preissteigerungen, also echte Inflation, zu messen. Wenn ich beispielsweise einen Preisindex nur der erzeugenden Industrie gewählt hätte, würde ich bei der Deflationierung der Preise möglicherweise die reale Veränderung der Relativpreise, die ich ja erklären will, schon herausnehmen. Als Inputpreisindizes verwende ich erstens einen, der die Veränderung der Inputpreise von Strom-, Gas- und Wasser (kurz: Energie) erfasst und zweitens einen, der die Veränderung der Roheisen- und Stahlpreise misst. Schließlich liegt die Vermutung nahe, dass diese Inputpreise einen erheblichen Einfluss auf die Endproduktpreise haben.<sup>1</sup> All diese Indizes werden um die allgemeine Inflationsrate bereinigt. Weitere denkbare Einflussgrößen wären hier noch die Lohnentwicklung und die Kapitalkosten (Zinssätze). Aus zwei Gründen habe ich diese nicht berücksichtigt. Zum einen stehen mir bei beiden Größen nur zu grob aggregierte Daten zu Verfügung. Bei den Löhnen verfüge ich nur über die Lohnentwicklung im produzierenden Gewerbe. Die Lohnentwicklung im Windanlagenbau könnte auch anders verlaufen sein. Bei den Kapitalkosten wäre die denkbare Variable der Zentralbankdiskontsatz. Auch hier vermute ich jedoch, dass dieser Zinssatz kaum zutreffend die

---

<sup>1</sup>So meint der Vorstandsvorsitzende des Windanlagenherstellers REpower Fritz Vahrenholt in „Windenergie 2005“ des Bundesverbands Windenergie, dass im Jahr 2004 den Herstellern vor allem die stark gestiegenen Stahlpreise zu schaffen gemacht hätten. Diese hätten die Produktionskosten einer Anlage um rund 100.000 Euro verteuert - bei einer 1 MW-Anlage etwa 10% der Gesamtkosten -, was aber an die Kunden nicht weitergegeben hätte werden können. Diese Aussage verdeutlicht aber auch die Problematik meiner Annahme, derzufolge sich Preise und Kosten im Gleichschritt entwickeln. Hier scheinen sich ja gerade die Kosten verändert zu haben, ohne dass die Preise sich verändert haben.

Tabelle 7.1: Datenquellenvergleich

Jahr	Jahresoutput Enercon in MW		Differenz in %
	BTM-Consult	Firmenangaben	
1992	11	23	-52
1993	23	33	-31
1994	100	93	+7
1995	163	154	+5
1996	152	153	0
1997	222	223	0
1998	332	346	+4
1999	490	463	+6
2000	616	596	+3
2001	1037	1020	+2
2002	1334	1309	+2

Quellen: Enercon (2005), BTM-Consult (1997 - 2003).

Kapitalbeschaffungskosten einer jungen, sich entwickelnden Industrie widerspiegeln. Zum anderen sind Löhne und Zinsen tendenziell nationale Inputpreise, während die Energie- und Stahlpreise eher internationalen Charakter haben, die Entwicklung also in Dänemark, wo einige Anlagen für den deutschen Markt produziert worden sind, ähnlich sein dürften.

Bei den Outputdaten bin ich wie folgt vorgegangen: Falls ich direkte Firmeninformationen durch Geschäftsberichte oder Internetseiten hatte, verwendete ich diese. Andernfalls habe ich die entsprechenden Informationen von BTM-Consult verwendet. Ein Vergleich dieser beiden Datenquellen zeigt, dass die BTM Daten nicht exakt die gleichen Zahlen wiedergeben, aber der Unterschied in der Regel gering bleibt, die Daten also als zuverlässig gelten können. In Tabelle 7.1 vergleiche ich die Firmenangaben von Enercon mit den BTM-Zahlen. Insbesondere in den ersten beiden Jahren ist die Differenz erheblich. 1992 hat Enercon gemäß Firmenangaben mehr als doppelt so viel produziert wie von BTM-Consult angegeben. Ab 1994 hält sich die Differenz aber in einem akzeptablen Rahmen.

Ein Problem dieser Daten besteht darin, dass der kumulierte Output in Megawatt, also der installierten Leistung, angegeben ist und nicht in Anzahl der Anlagen. Diese Vorgehensweise wurde auch in anderen Studien (Isoard und Soria (2001), Junginger, Faaij und Turkenburg (2005), Hansen, Jensen und Madsen (2003) sowie Neij (1997)) gewählt. Der Grund liegt, wie möglicherweise auch bei den anderen Studien, darin, dass mir die kumulierten Anlagenzahlen nur aggregiert über alle Firmen für den deutschen Markt zur Verfügung stehen, die kumulierte installierte Leistung hingegen weltweit aggregiert und für die Firmen einzeln. Es zeigt sich auch, dass beide Variablen hochkorreliert sind, der Unterschied also nicht allzu groß sein sollte.<sup>2</sup> Hansen, Jensen und Madsen (2003) schätzen alternativ beide Spezifikationen (also kumulierte installierte Leistung und ku-

<sup>2</sup>Der Korrelationskoeffizient zwischen dem jährlichen deutschen Anlagenoutput und dem jährlichen deutschen Output in Nennleistung beträgt 0,95.

mulierte Anlagenzahl) und erhalten mit beiden Spezifikationen signifikante Ergebnisse. Der Leser sollte dieses Problem bei der Bewertung der Ergebnisse im Kopf behalten. Zumindest theoretisch kann der Unterschied sehr groß sein. Während bei der kumulierten Anlagenzahl der Lerneffekt einer 10 kW- und einer 1 MW- Anlage gleich gewichtet wird, entspricht bei der installierten Leistung die Erfahrung aus hundert 10 kW- Anlagen lediglich der einer einzigen 1 MW- Anlage.

Aus den Outputvariablen habe ich nun weitere Variablen generiert. Um testen zu können, ob möglicherweise ein Teil des vergangenen Wissens wieder vergessen wird, habe ich analog zu Argote, Beckman und Epple (1990) gewichtete kumulierte Outputvariablen generiert, und zwar mit Gewichten zwischen 0,5 und 0,9.<sup>3</sup> Ein Gewicht von 0,9 bedeutet, dass von Periode zu Periode nur 90 % des Wissensbestandes der Vorperiode Teil des Wissensbestandes bleibt beziehungsweise 10 % des Wissensbestands vergessen wird

Aus dem ursprünglichen Datensatz lösche ich all diejenigen Beobachtungen, die doppelt auftauchen, also in einem Jahr zweimal vertreten sind. Dies kommt in den Jahren 1993 und 1994 vor, da für beide Jahre sowohl Frühlings- als auch Herbstdaten vorlagen. Das Problem beschränkt sich allerdings nicht auf diese Jahre. In anderen Jahren ergibt sich das Problem, dass Typen aufgrund der Angaben nicht zu unterscheiden sind (Leistung, Höhe und Rotorfläche sind gleich), jedoch dennoch zweimal im Datensatz mit zum Teil unterschiedlichen Preisen vertreten sind. Dies kann nur an Qualitätsmerkmalen, die im Datensatz fehlen, liegen. Beispielfhaft seien hier die Beobachtungen „AN Bonus 600kW/44-2“ und „AN Bonus 600kW/44-3“ im Jahr 1997 genannt. Hier sind alle Leistungsmerkmale gleich, in diesem Fall sogar die Preise. Dennoch ist die Typenbezeichnung unterschiedlich. Im Wesentlichen gibt es hierfür drei Lösungsmöglichkeiten: Wir können erstens alle Daten behalten; wir können zweitens für diese (scheinbar) doppelten Beobachtungen den mittleren angegebenen Preis berechnen und dann eine Beobachtung löschen und wir können drittens zufällig eine der Beobachtungen löschen. Für die erste Möglichkeit spricht, dass man vorhandene Informationen nicht löschen sollte. Allerdings stellt sich die Frage, welche Information dies hier sein sollte. Schließlich sind alle Angaben gleich. Dies wäre kein Problem, wenn man sicher sein könnte, dass es sich wirklich um unterschiedliche Beobachtungen handelte (was der Fall wäre, wenn es Produkte von unterschiedlichen Firmen wären). Ich schätze hier aber die Gefahr größer ein, dass ich eine einzelne Beobachtung einfach doppelt zähle. Daher scheidet die erste Möglichkeit aus. Die zweite und dritte Möglichkeit ergeben bei vielen Beobachtungen das gleiche Ergebnis. Aus praktischen Gründen habe ich mich daher für die dritte entschieden und lösche einfach eine der beiden

---

<sup>3</sup>Die Wahl der Gewichte erfolgte willkürlich. Genauso gut hätte ich Gewichte von 0,2 und 0,8 verwenden können. Das Ziel meiner Schätzungen lautet nicht, das wahre Gewicht zu bestimmen, sondern an zwei Gewichten exemplarisch zu demonstrieren, welche Auswirkungen Vergessen auf die ökonomische Interpretation der Ergebnisse haben.

Beobachtungen.

Das Jahr 2004 lösche ich komplett aus dem Datensatz, da für 2004 zum einen nur noch für sehr wenige Firmen die Anlagenpreise angegeben sind, zum anderen aber vor allem, weil mir keine Outputdaten mehr zur Verfügung standen. Ebenfalls lösche ich Beobachtungen, bei denen Angaben zu Preisen, Leistung oder Höhe fehlten. Der Datensatz reduziert sich damit von 2.645 auf 1.774 Beobachtungen.

Weiter habe ich mich entschieden, mich auf den Markt der WEA, die größer als 5 kW sind, zu konzentrieren. Der Grund besteht darin, dass ich von den Kleinstproduzenten keinerlei Firmenangaben über den aggregierten Output habe und zudem Kleinstanlagen weitgehend von anderen Firmen als Großanlagen hergestellt werden.

### 7.3 Deskriptive Beschreibung des Datensatzes

Durch all diese Änderungen ergibt sich nun ein Datensatz mit insgesamt 1474 Beobachtungen. Die Beobachtungsanzahl verteilt sich allerdings nicht gleichmäßig über die Jahre, wie aus Abbildung 7.1 hervorgeht. Nur 51 Beobachtungen stammen aus dem Jahr 1992.

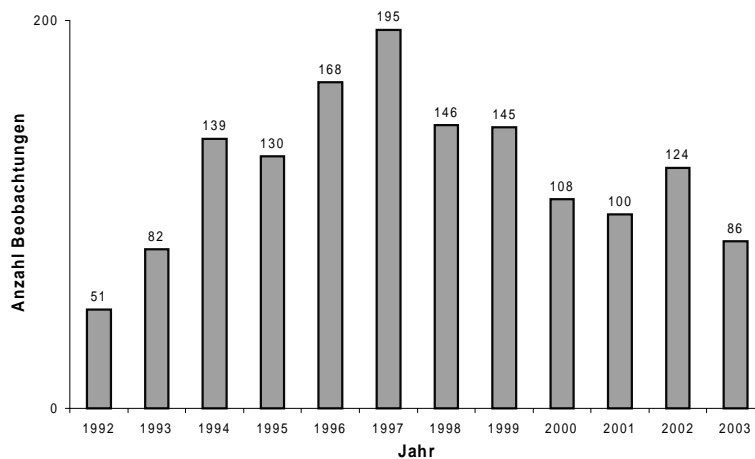


Abbildung 7.1: Anzahl der jährlichen Beobachtungen im Datensatz

Die Beobachtungsanzahl erreicht ihren Höhepunkt mit 195 WEA im Jahr 1997 und geht dann auf 86 Anlagen 2003 zurück.

Im Datensatz finden sich Angaben zu Windenergieanlagen von insgesamt 81 verschiedenen Firmen. Erwartungsgemäß sind die Firmen mit nennenswerten Marktanteilen auch häufiger vertreten. Die meisten Anlagen stammen von Nordex mit 209, NEG Micon mit 128, AN-Windenergie mit 111 und Enercon mit 97 Anlagen. Deutlich unterrepräsentiert ist Vestas: Nur 44 Anlagen im Datensatz stammen von den Dänen. Dies liegt daran, dass

Modelle von Vestas lediglich bis 1999 im „Windkraftanlagenmarkt“ des SunMedia-Verlags geführt werden. 570 verschiedene Modelle sind im Datensatz vertreten. Als Windenergieanlagen desselben Modells beziehungsweise Typs definiere ich WEA, die vom gleichen Hersteller mit der gleichen Leistung und der gleichen Nabenhöhe produziert werden. 211 Modelle finden sich lediglich einmal im Datensatz wieder, das Modell, das am häufigsten im Datensatz vertreten ist, findet sich in 11 Jahrgängen. Das arithmetische Mittel der Verweildauer im Datensatz eines Modells beträgt 2,6 Jahre.

Im Datensatz ist ein eindeutiger Trend zu größeren Modellen zu erkennen (siehe Tabelle 7.2). Bis 1997 gab es überhaupt keine Anlagen mit einer Nennleistung größer als 1.500 kW.<sup>4</sup> 2003 sind schon 34 % aller Windenergieanlagen in dieser Leistungsklasse.<sup>5</sup> WEA mit 30 - 600 kW Nennleistung, die in den ersten Jahren mit über 90 % der Modelle im Datensatz dominieren, verlieren an Bedeutung. Nur noch sieben Prozent aller Anlagen gehören 2003 zu einer dieser drei Leistungsklassen.

Tabelle 7.2: Relativer Anteil in % pro Jahr verschiedener Leistungsklassen

Jahr	Leistungsklassen in kW Nennleistung						
	5-30	30-100	100-300	300-600	600-1000	1000-1500	> 1500
1992	6	29	47	18	0	0	0
1993	0	30	39	23	7	0	0
1994	7	16	37	28	10	1	0
1995	8	15	35	28	11	2	0
1996	10	13	26	26	22	3	0
1997	10	12	23	24	25	5	3
1998	8	6	14	19	35	12	7
1999	11	5	10	13	39	14	9
2000	2	4	9	7	39	20	19
2001	5	3	10	3	30	21	28
2002	6	3	7	3	30	17	34
2003	15	1	4	2	24	16	36
Gesamt	8	11	21	17	24	9	10

Bemerkung: Aufgrund von Rundungen ergibt sich in der Summe nicht immer 100 %.

Im Datensatz stehen uns im Wesentlichen drei modellspezifische technische Charakteristika zur Verfügung. Neben der Nennleistung ist dies die Nabenhöhe und die Rotorfläche, also die Fläche, die von den Rotorblättern überstrichen wird. Alle drei Charakteristika dürften einen Einfluss auf den Preis haben: Eine leistungsfähigere Turbine, eine höhere Nabenhöhe und größere Rotorblätter dürften eine Windenergieanlage verteuern. Es liegt die Vermutung nahe, dass eine Erhöhung der Leistung mit größeren Rotorblättern und höherer Nabenhöhe einhergeht. In den Abbildungen 7.2 und 7.3 habe ich die Nennlei-

<sup>4</sup>Nennleistung ist die maximale Leistung einer Windturbine.

<sup>5</sup>Die Einteilung in diese Leistungsklassen erfolgt analog zur (willkürlichen) Einteilung in Leistungsklassen in „Windenergie“ des Bundesverbands Windenergie (1999 - 2005).



stung zur Rotorfläche und zur Nabenhöhe zueinander ins Verhältnis gesetzt. Zwischen der

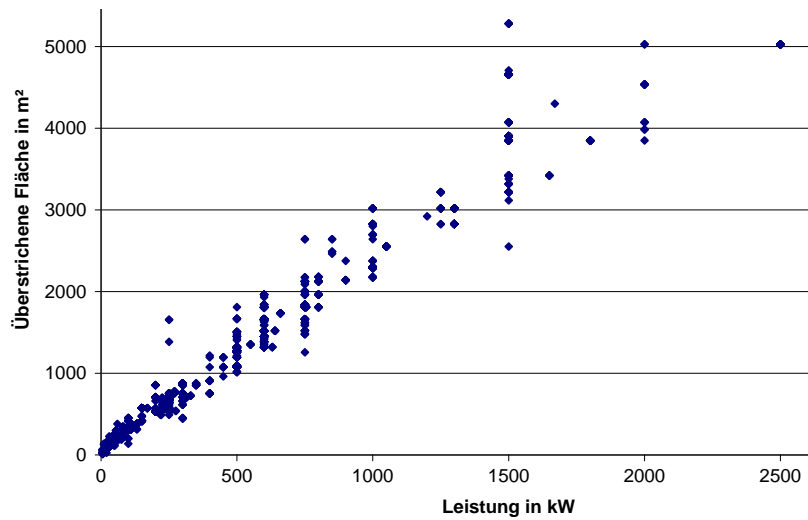


Abbildung 7.2: Verhältnis Nennleistung zur Rotorfläche.

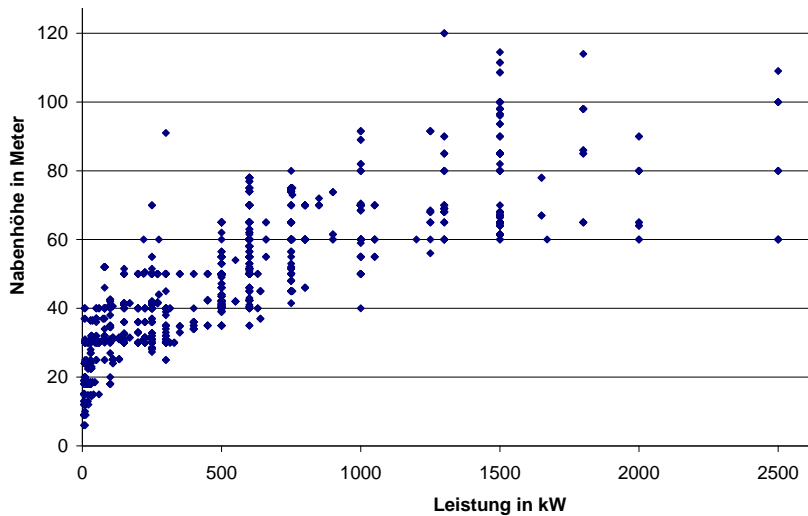


Abbildung 7.3: Verhältnis Nennleistung zur Nabenhöhe.

Nennleistung und der überstrichenen Fläche ist ein ganz klarer Zusammenhang erkennbar. Eine Leistungssteigerung um 500 kW geht in etwa mit einem Anstieg der Rotorfläche um  $1.000 \text{ m}^2$  einher. Der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden Variablen beträgt 0,975. Auch zwischen der Nennleistung und der Nabenhöhe ist ein positiver Zusammenhang erkennbar, wenn auch nicht mehr ganz so eindeutig. Insbesondere bei den höheren Nennleistungen über 1.000 kW ist nicht mehr zu erkennen, dass mehr Leistung auch eine höhere Nabenhöhe bedeutet; vielmehr scheint es dort einen Korridor zwischen 60 m und 120 m Nabenhöhe zu geben, der für WEA ab 1.000 kW wirtschaftlich interessant ist.<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Während in Küstenregionen eher relativ niedrigere Nabenhöhen verwendet werden, sind hohe Türme im Binnenland beliebter. Quelle: „Windenergie 2004“ des Bundesverbands Windenergie.

Der Korrelationskoeffizient für den gesamten Datensatz beträgt dementsprechend 0,821, der Korrelationskoeffizient für Anlagen über 1.000 kW beträgt aber nur noch 0,18. In den Schätzungen verzichte ich auf die Variable Rotorfläche, weil diese Information bereits von der Nennleistung abgedeckt wird. Die Nabenhöhe nehme ich aber hinzu, weil es denkbar ist, dass diese insbesondere bei größeren Anlagen Preisunterschiede zwischen Anlagen gleicher Leistung erklären kann.

Es zeigt sich im Datensatz, dass größere Modelle tendenziell relativ billiger in Euro pro kW sind. Allein aufgrund der Tendenz zu größeren Modellen über den Beobachtungszeitraum ergibt sich daher, dass der durchschnittliche Preis einer Anlage pro kW fallen sollte. In Abbildung 7.4 habe ich die durchschnittliche Preisentwicklung des gesamten Datensatzes der Preisentwicklung ausgewählter Leistungsklassen gegenübergestellt. Die

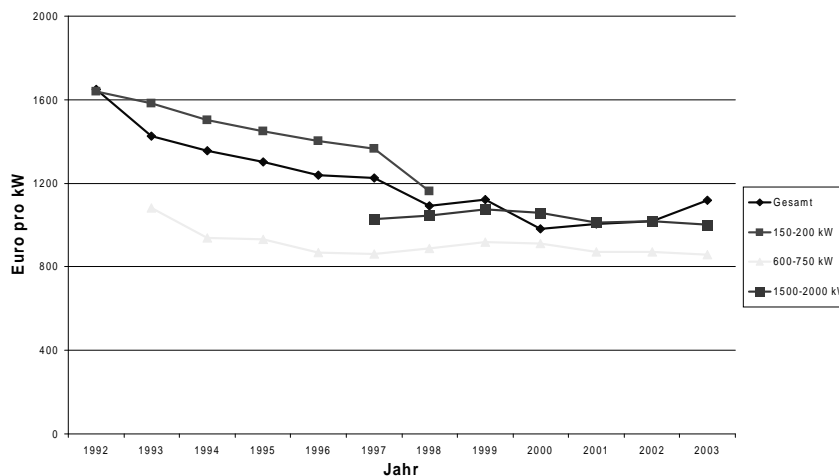


Abbildung 7.4: Entwicklung der durchschnittlichen Anlagenpreise pro kW Nennleistung.

durchgezogene Linie markiert die durchschnittliche (inflationsbereinigte) Preisentwicklung aller Anlagen gemeinsam. Die Kurve fällt von rund 1.700 Euro pro kW auf knapp 1.200 Euro pro kW. Die Gesamtkurve liegt tendenziell über den anderen drei Kurven, weil insbesondere in der Leistungsklasse 15 - 30 kW, die hier nicht abgebildet ist, Preise von 3.000 Euro/kW und mehr gezahlt werden. Bis Mitte der Neunziger kann man auch einen fallenden Trend bei den mittleren Leistungsklassen erkennen. In der Leistungsklasse 600 - 1.000 kW ist 1996 ein Preis von etwas über 800 Euro/kW erreicht, der sich bis 2003 auch nicht mehr nennenswert verändert. Bei den großen Anlagen mit über 1.500 kW Nennleistung ist ebenfalls kein offensichtlicher Abwärtstrend zu erkennen. Interessant ist, dass in dieser Leistungsklasse der Preis pro kW höher ist als bei den 600 - 1.000 kW Anlagen. Die Tendenz, dass leistungsfähigere Anlagen relativ gesehen immer billiger werden, gilt dort also nicht mehr.

Die wichtigste erklärende Variable bei der Untersuchung von Lerneffekten ist der ku-

multierte Output, den ich, wie in Abschnitt 7.2 erläutert, in installierter Leistung in MW messe. Dieser hat sich weltweit im Untersuchungszeitraum exponentiell entwickelt (Abbildung 7.5). Waren bis 1992 nur rund 2.300 MW weltweit installiert, betrug der kumulierte Output weltweit 2003 bereits etwa 40.000 MW. Der jährliche Zubau wuchs in diesem Zeitraum ebenfalls kontinuierlich von 231 MW auf 8.344 MW an (Abbildung 7.6). Die

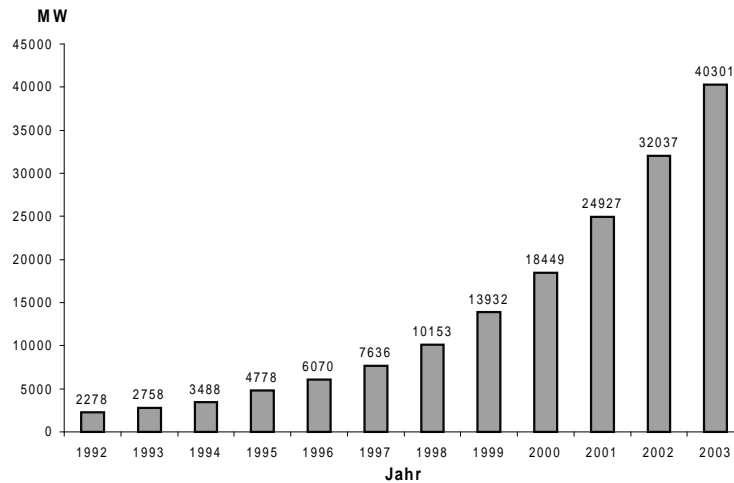


Abbildung 7.5: Entwicklung des kumulierten weltweiten Outputs in MW. Quelle: „World Market Update“ 1997 - 2003 von BTM Consult.

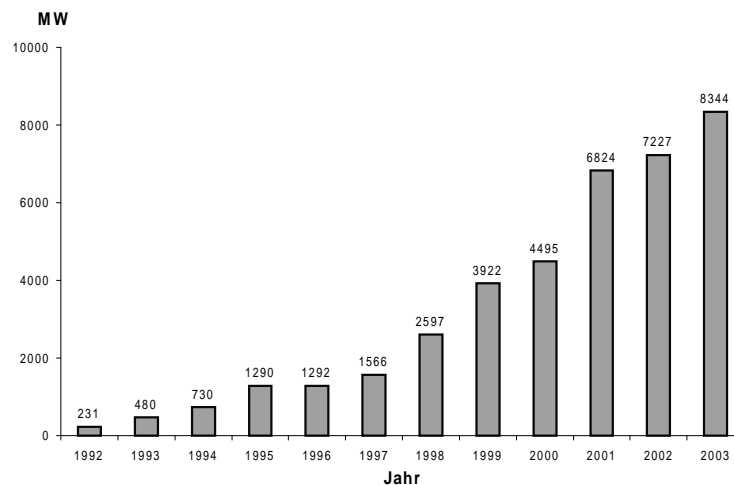


Abbildung 7.6: Entwicklung des jährlichen weltweiten Outputs in MW. Quelle: „World Market Update“ 1997 - 2003 von BTM Consult.

Entwicklung in Deutschland verlief ähnlich, nicht zuletzt deshalb, weil Deutschland in den neunziger Jahren bis 2002 die treibende Kraft im weltweiten jährlichen Zubau war und rund 40 % der jährlich weltweit installierten Leistung in Deutschland installiert wurde. In Deutschland geht der jährliche Zubau seit 2002 wieder zurück, das weltweite Wachstum

scheint allerdings ungebremst, weil andere Länder wie Spanien nun starke Zuwachsraten haben.

## 7.4 Schätzungen

### Schätzung ohne Lerneffekte

Außer möglichen Lerneffekten dürfte es eine Reihe anderer Einflussfaktoren auf den Preis von Windenergieanlagen geben. Ich werde daher zunächst den Einfluss dieser Faktoren auf den Preis schätzen ohne Lerneffekte miteinzubeziehen. Abhängige Variable ist der Preis in Euro pro kW, mögliche Regressoren sind Nennleistung  $NL$ , Nabenhöhe  $NH$ , Indikatorvariablen der Firmen (hier von Enercon, Nordex und GE Wind) sowie Inputpreisindizes für Stahl  $ST$  und Energie  $EN$ . Die Konstante bezeichne ich mit  $c$ ,  $\alpha_i$  ist der Individualeffekt (nur bei der Panelschätzung) und  $u_{i,t}$  ist der Störterm.

$$\begin{aligned} \ln p_{i,t} = & c + \beta_1 \ln NL_i + \beta_2 \ln NH_i + \beta_3 (\ln NL_i * \ln NH_i) \\ & + \beta_4 \ln ST_t + \beta_5 \ln EN_t + \beta_6 \text{Enercon} + \beta_7 \text{Nordex} + \beta_8 \text{GEWind} + u_{i,t} \end{aligned} \quad (7.1)$$

In Tabelle 7.3 stelle ich die Ergebnisse einer Panelschätzung mit zufälligen Effekten (1) einer gepoolten KQ-Schätzung (2) gegenüber, wobei ich nur die signifikanten Firmendummies mit aufgenommen habe. Da außer den beiden Inputpreisindizes alle anderen Regressoren über die Zeit konstant sind und damit bei einer Fixed-Effects-Schätzung entfallen würden, hat eine Fixed-Effects-Schätzung keinen Sinn. Die Vorzeichen sind in beiden Schätzverfahren dieselben. Es zeigt sich, dass der Preis pro kW nicht über alle Größenklassen gleich ist, sondern mit zunehmender Leistung und Höhe abnimmt. Dies allerdings um so weniger, je leistungsfähiger und größer die Turbinen sind, wie sich im signifikanten Interaktionsterm aus Leistung und Höhe zeigt. Nicht unerwartet haben auch die Stahl- und Inputenergiepreise einen positiven Einfluss auf den Preis. Eine Erhöhung des Stahlpreises um 1 % erhöht beispielsweise beim geschätzten Koeffizienten von 0,22 den Preis pro kW um etwa  $1,01^{0,22} - 1 = 0,219$  %. Es zeigt sich außerdem, dass die Windenergieanlagen von Enercon, General Electric Wind und Nordex signifikant teurer als Anlagen anderer Hersteller sind. Aufgrund der heteroskedastischen Struktur der Daten - mit dem Breusch-Pagan-Test konnte Homoskedastie verworfen werden - habe ich die robusten (White-Korrektur) t-Werte berechnet.

### Schätzung mit Lerneffekten

In den bisherigen Schätzungen von Lerneffekten im Windenergiesektor wurde nun als weiterer Regressor der kumulierte Output eingefügt. Der Einfachheit halber vernachlässige ich die Firmendummies und Preisindexvariablen und schätze nur mit einer gepoolten

Tabelle 7.3:  
Einflussfaktoren auf den Preis pro kW einer Windturbine

Regressoren	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Konstante	7,06 (26,86)	5,35 (13,37)	10,77 (49,89)	10,63 (51,80)	10,60 (52,33)	5,58 (10,17)	12,71 (27,89)	12,95 (4,36)
ln(Leistung)	-0,58 (-16,95)	-0,68 (-22,13)	-0,77 (-24,31)	-0,78 (-25,20)	-0,79 (-25,47)	-0,78 (-24,66)	-1,15 (-18,11)	-1,85 (-6,61)
ln(Höhe)	-0,25 (-4,30)	-0,36 (-6,25)	-0,43 (-7,26)	-0,45 (-14,12)	-0,45 (-7,57)	-0,44 (-7,39)	-1,13 (-8,85)	-2,10 (-3,28)
ln(Leistung)*ln(Höhe)	0,09 (9,65)	0,12 (13,83)	0,14 (16,02)	0,14 (16,68)	0,14 (16,86)	0,14 (16,21)	0,24 (13,85)	0,42 (4,92)
ln(Index Stahlpreise)	0,22 (4,32)	0,58 (5,60)	-	-	-	-	-	-
ln(Index Energiepreise)	0,25 (4,35)	0,35 (3,16)	-	-	-	-	-	-
Enercon	0,13 (4,13)	0,09 (5,36)	-	-	-	-	-	-
General Electric Wind	0,18 (4,58)	0,15 (10,39)	-	-	-	-	-	-
Nordex	0,07 (2,94)	0,04 (3,82)	-	-	-	-	-	-
ln(kum. Output)	-	-	-0,09 (-12,19)	-	-	0,64 (9,01)	-	0,49 (3,51)
ln(kum. Out. mit 50% Vergessen)	-	-	-	-0,08 (-14,12)	-	-	-	-
ln(kum. Out. mit 90% Vergessen)	-	-	-	-	-0,08 (-14,60)	-	-	-
Zeittrend	-	-	-	-	-	-	-0,03 (-11,03)	-0,17 (-4,81)
ln(kum. Output je Firma)	-	-	-	-	-	-	-0,002 (-0,38)	-
$R^2$	76,74	77,56	76,56	77,32	77,44	78,04	77,24	-
$R^2$ within	8,59	-	-	-	-	-	-	-
$R^2$ between	76,72	-	-	-	-	-	-	-

Abhängige Variable: ln(Preis in Euro/kW Nennleistung). (1): Random Effects-Schätzung. (2) - (6) gepoolte, robuste KQ-Schätzungen mit jeweils unterschiedlichen Regressoren. In Klammern die t-Werte der einzelnen Variablen. Werte, für die gilt  $|t-Wert| > 1,96$ , sind signifikant beim 95 % Signifikanzniveau. Die F- bzw. Waldstatistiken der einzelnen Schätzungen sind alle signifikant. In Spalte (8) ist der relevante t-Wert 2,26, da hier der Mittelwert über neun Zeitreihen gebildet wurde. Die Interpretation der Schätzergebnisse in den jeweiligen Spalten findet sich im Fließtext.

KQ-Schätzung die folgende einfache Schätzgleichung, bei der  $p$  der Preis pro kW,  $c$  eine Konstante,  $Q_{t-1}$  der kumulierte Output bis zur Vorperiode,  $NL$  die Nennleistung,  $NH$  die Nabenhöhe und  $u_t$  der Störterm ist:

$$\ln p_{i,t} = c + \beta_1 \ln Q_{t-1} + \beta_2 \ln NL_i + \beta_3 \ln NH_i + \beta_4 (\ln NL_i * \ln NH_i) + u_{i,t} \quad (7.2)$$

Die Ergebnisse scheinen signifikant zu sein (Spalte (3) in Tabelle 7.3) und analog zu den vorherigen Studien könnte man einen Lerneffekt von  $(1 - 2^{-0,09}) = 0,06$ , also von 6 % wie bei Neij (1999) ermitteln. Der Fehler, der dieser Schätzung zugrunde liegt, ist allerdings, dass der logarithmierte kumulierte Output von seiner Konstruktion her eine stetig ansteigende Variable ist und damit nicht-stationär. In diesem Falle ist aber die normale t-Statistik nicht mehr valide (Greene (2000), S. 778). Die Zeitreihe des kumulierten Outputs ist durch eine Einheitswurzel charakterisiert. Diese Vermutung bestätigt sich mit Hilfe des Dickey-Fuller-Test. Die Hypothese, dass es eine Einheitswurzel gibt, kann nicht zurückgewiesen werden. Der t-Wert liegt bei +2,25 und damit sogar deutlich über dem kritischen Wert für 90 % von -2,63 bei 25 Beobachtungen. Da der kritische Werte für 11 Beobachtungen noch kleiner ist, kann die Hypothese also zurückgewiesen werden.

Das Problem dieser integrierten Prozesse kann auch noch auf eine andere Weise demonstriert werden. Wenn ich nämlich wie Argote und Epple (1990) plausibel argumentiere, dass möglicherweise ein Teil des Gelernten wieder vergessen wird, kann ich alternativ die obige Schätzung mit kumuliertem Output mit Vergessen durchführen. Der Vorteil besteht darin, dass diese Variable nicht zwingend ansteigen muss, da es ja sein könnte, dass mehr vergessen als gelernt wird, die Variable also stationär ist. In (4) und (5) von Tabelle 7.3 sind die KQ-Schätzungen für die Schätzungen mit kumuliertem Output bei dem von einer Periode zur nächsten jeweils 50 % ( $Q^{50}$ ) beziehungsweise sogar 90 % ( $Q^{90}$ ) der kumulierten Erfahrung vergessen wird. Es ergeben sich annähernd dieselben Werte und das bei steigendem  $R^2$ . Man könnte also mit gleichem Recht argumentieren, dass Lerneffekte durch den gesamten kumulierten Output hervorgerufen werden als auch, dass von einer Periode zur nächsten jeweils 90 % vergessen werden. Schon dies allein wäre aus ökonomischer Sicht ein erheblicher Unterschied. Bei derartigen Vergessensraten wäre aus Kostensicht fast nur noch der Output des letzten Jahres relevant.

Aus ökonomischer Sicht indes ist das Ergebnis nicht überraschend, denn sowohl  $Q^{50}$  als auch  $Q^{90}$  sind nicht-stationäre Variablen. Der t-Wert des Dickey-Fuller-Test liegt bei -1,02 beziehungsweise -1,52, so dass die Hypothese, dass es eine Einheitswurzel gibt, nicht zurückgewiesen werden kann. Der Grund liegt darin, dass - wie in Abbildung 7.6 zu sehen ist - auch der jährliche Output zwischen 1992 und 2003 ständig angewachsen ist.

Die bisherigen Ergebnisse sind also sowohl aus ökonomischer Sicht (vollständige Lerneffekte oder Lerneffekte mit Vergessen?) als auch aus ökonomischer Sicht unbrauchbar.

Ein nichtstationärer Prozess kann durch eine Zufallsbewegung mit oder ohne Drift oder einen trendstationären Prozess verursacht werden. Mögliche Lösungsmöglichkeiten sind entweder die Bildung erster Differenzen oder die Herausnahme des Trends. Wenn wir Gleichung (7.2) inklusive eines Trends schätzen, erhalten wir die Ergebnisse in (6) in Tabelle 7.3. Der Dickey-Fuller-Test auf Stationarität mit einem Trend ergibt einen Wert von -4,529. Damit kann die Hypothese, dass es eine Einheitswurzel gibt, beim 95 % Konfidenzintervall zurückgewiesen werden, nicht jedoch bei 99 %. Es gibt also ein starkes Anzeichen für einen trendstationären Prozess. Bei der Schätzung von (7.2) inklusive eines Trends erhalten wir dann das überraschende Ergebnis, dass es einen negativen Zeitrend gibt, der zu einem Rückgang der Preise führt, dass aber um diesen Zeittrend herum die Zunahme des kumulierten Outputs zu einer Preissteigerung führt. Ökonomisch ist dieses Ergebnis allerdings eher schwer zu interpretieren. Ich werde auf dieses Ergebnis weiter unten im Zusammenhang mit dem „group mean estimator“ eingehen.

Alternativ zur Hypothese, dass der kumulierte, aggregierte Output Einfluss auf die Preise hat (Spillover), stellt sich natürlich auch die Frage, ob es Lerneffekte aufgrund des kumulierten Outputs jeder einzelnen Firma gibt. In Spalte (7) von Tabelle 7.3 sind die Schätzwerte dieser Schätzung inklusive eines Zeittrends. Diese Schätzung habe ich mit den 773 Beobachtungen durchgeführt, denen ich einen kumulierten Firmenoutput zuordnen konnte (bei kleineren Firmen standen mir keine entsprechenden Daten zur Verfügung). Es zeigt sich hier ganz klar, dass der kumulierte Output einer Firma absolut insignifikant ist. Private Lerneffekte sind also mit Hilfe des kumulierten Firmenoutputs nicht messbar.

Bisher außen vorgelassen habe ich die Frage, ob eventuell auch die abhängige Variable, der Preis pro kW eine nicht-stationäre Variable ist. Das Problem der Scheinregression könnte dann mit Hilfe von Differenzenbildung sowohl der abhängigen als auch der unabhängigen Variablen gelöst werden (Hamilton, 1994, S. 561). Im Gegensatz zum kumulierten Output, der über alle Beobachtungen gleich war, ist jedoch der Preis pro kW eine individuelle Variable für jede einzelne Anlage. Das erschwert nicht nur die Bildung erster Differenzen - bei den 211 Modellen, die nur einmal im Datensatz vertreten sind, ist das überhaupt nicht möglich -, sondern auch den Einheitswurzel-Test. In der Literatur gibt es für ein balanciertes Panel unter anderem die folgenden zwei Testmöglichkeiten, den Levin-Lin-Chu-Test (Levin, Lin und Chu 2002) und den Im-Pesaran-Shin-Test (Im, Pesaran und Shin 2003). Bei beiden Tests wird ein Mittelwert über die einzelnen individuellen Zeitreihen gebildet. Während beim Levin-Lin-Chu-Test unter der Alternativhypothese alle Zeitreihen stationär sind, ist es beim Im-Pesaran-Shin-Test auch möglich, dass nur eine Teilmenge stationär ist. Aufgrund des extrem unbalancierten Panels entfallen diese Testmöglichkeiten für mich. Stattdessen habe ich für die Nennleistungen, von denen es viele Typen im Datensatz gibt (für 100, 250, 300, 600, 800, 750 und 1000 MW), die Typen zusammengefasst, für diese den mittleren Preis ausgerechnet und dann die Zeitreihe eines

Leistungstyp untersucht. Bei 5 von 7 Leistungstypen zeigt der Dickey-Fuller-Test an, dass die Hypothese der Existenz einer Einheitswurzel nicht zurückgewiesen werden kann.

Es spricht also einiges dafür, statt (7.2) eine Schätzgleichung der ersten Differenzen zu schätzen, wobei  $\Delta \ln p_{i,t}$  und  $\Delta \ln Q_{t-1}$  die ersten Differenzen von logarithmierten Preisen und logarithmiertem kumuliertem Output bezeichnen.  $c$  ist wieder eine Konstante und  $u_{i,t}$  der Störterm.

$$\Delta \ln p_{i,t} = c + \gamma_1 \Delta \ln Q_{t-1} + u_{i,t} \quad (7.3)$$

Das Problem besteht nun, wie bereits erwähnt, darin, dass durch Bildung der ersten Differenzen mein Datensatz wegen Typen mit wenigen (einer) Beobachtungen und Lücken in der Zeitreihe (ein Typ ist beispielsweise 1994 und 1996 vertreten) erheblich zusammenschmilzt. Insbesondere entfallen die Jahre 1992 - 1994 ganz. Für den verbleibenden Datensatz ist die erste Differenz des logarithmierten kumulierten Outputs eine stationäre Variable (Dickey-Fuller t-Wert von -3,060) und auch die erste Differenz der Preise ist bei immerhin 4 von 7 Leistungstypen eindeutig eine stationäre Variable. Für diesen verkleinerten Datensatz von nun 774 Beobachtungen ergeben sich die Ergebnisse aus Tabelle 7.4. Ganz offensichtlich sind die Ergebnisse absolut insignifikant. Die Veränderung des

Tabelle 7.4: Schätzung mit ersten Differenzen

$\Delta \ln Q_{t-1}$	Konstante	$R^2$
0,014 (0,21)	-0,017 (-0,92)	0,0001

In Klammern die t-Werte der einzelnen Variablen. Werte, für die gilt  $|t - Wert| > 1,96$ , sind signifikant beim 95 % Signifikanzniveau.

kumulierten Outputs trägt also zur Erklärung der Veränderung der Preise nichts bei. Die Schlussfolgerung ist daher ganz eindeutig, dass die bisherige Schätzung von Lerneffekten mit Hilfe des kumulierten Outputs zu falschen Ergebnissen geführt hat. Dies wird insbesondere dadurch klar, dass auch bei einer Schätzung auf die klassische Art für den kleinen Datensatz mit 774 Beobachtungen sich ein hochsignifikanter Lerneffekt von  $(1 - 2^{-0,07}) = 5\%$  ergeben würde.

Alternativ zur Bildung erster Differenzen schlagen Pesaran und Smith (1995) vor, die einzelnen Panelzeitreihen jeweils einzeln zu schätzen und dann den Mittelwert der einzelnen Schätzer zu ermitteln („group mean estimator“) und diesen auf Signifikanz zu testen. Es gibt hier aber erneut das Problem, dass das Panel unbalanciert ist und daher keine vergleichbaren Zeitreihen verfügbar sind. Ich habe mich daher zu folgender Lösung entschlossen: Für die acht Firmen, die fast durchgehend im Panel vertreten sind, ermittle ich für jedes Jahr die „Durchschnitts-WEA“, das heißt, ich bilde den Mittelwert aus Preis pro kW, Leistung und Höhe.<sup>7</sup> Alle anderen Firmen fasse ich in gleicher Weise pro Jahr

<sup>7</sup>Diese acht Firmen sind Enercon, Nordex, GE Wind, Fuhrländer, AN-Maschinenbau, NEG Micon,



zu einer „Durschnitts-WEA“ zusammen. Somit ergibt sich ein balanciertes Panel mit 9 Zeitreihen über die 10 Jahre 1993 - 2002. Die Randjahre 1992 und 2003 habe ich wegen zu weniger Beobachtungen bei einzelnen Firmen herausgenommen. Die Schätzgleichung lautet inklusive eines Zeittrends  $t$ :

$$\ln p_{i,t} = c + \beta_1 \ln Q_{t-1} + \beta_2 \ln NL_i + \beta_3 \ln NH_i + \beta_4(\ln NL_i * \ln NH_i) + \beta_5 t + u_{i,t} \quad (7.4)$$

In Spalte (8) von Tabelle 7.3 gebe ich die mittleren Schätzwerte sowie die t-Werte der Schätzung an. Aufgrund der Bildung von Mittelwerten und der Schätzung des neuen Panels ohne Berücksichtigung der Anzahl der Beobachtungen, die in jeden Firmenwert eingeflossen sind, ist es nicht überraschend, dass die einzelnen Werte stark von den Schätzwerten in Spalte (6) abweichen. Was allerdings bleibt, ist der signifikant positive Einfluss des kumulierten Outputs um einen negativen exogenen Zeittrend.

Zusammengenommen ergibt sich also bei der Differenzenschätzung ein insignifikanter Einfluss des kumulierten Outputs und bei der „group mean estimator“-Schätzung sogar einen positiv signifikanten. Dies ist für mich aus ökonomischer Sicht nicht sinnvoll zu erklären und ich möchte das aufgrund der Datengenerierung auch nicht überinterpretieren. Es zeigt aber, dass wir auf keinen Fall echte Lerneffekte beobachten können.

Dennoch möchte ich nicht so weit gehen, völlig auszuschließen, dass es in der Realität Lerneffekte geben mag. Zum einen ist mein Datensatz durch die Bildung erster Differenzen erheblich gegenüber dem Ausgangsdatsatz verkleinert. Zum anderen ist es weiterhin sehr gut möglich, dass innerhalb der Firmen gelernt wird. Was die vorangegangene Analyse aber ganz eindeutig zeigt, ist, dass der kumulierte Output, der in der bisherigen Literatur verwendet wurde, als Indikator dieses denkbaren Lernens zumindest für die Windindustrie eine schlechte Wahl ist.

## 7.5 Schlussfolgerungen

In diesem Abschnitt habe ich mit Hilfe eines neu zusammengestellten Datensatzes die These überprüft, ob es Lerneffekte im Bau von Windenergieanlagen gibt. In der bisherigen Literatur wurden Lerneffekte zwischen 4 % (Neij 1997) und 19 % (Junginger, Faaij, Turkenburg 2005) ermittelt. Es zeigt sich aber, dass die in der Literatur geschätzten Lerneffekte unbrauchbar sind, weil sie die Nicht-Stationarität der Daten vernachlässigt haben. Wenn diese durch Bildung erster Differenzen berücksichtigt wird, zeigt sich, dass der aggregierte kumulierte Output keinerlei signifikanten Einfluss auf die Preisentwicklung von Windenergieanlagen hat. Zur weiteren Untermauerung der Schwäche der bisherigen Studien demonstriere ich mit Hilfe der Outputvariablen mit Vergessen, dass mit anderen

---

Lagerwey und REpower.

nicht-stationären Variablen ebenfalls scheinbar signifikante Resultate erzielt werden und ökonomisch plausible Erklärungen gegeben werden können. Alternativ schätze ich auch den group mean estimator. Hier zeigt sich bei einem negativ signifikanten Zeittrend sogar ein positiv signifikanter Einfluss der Outputvariable.

Die These, dass, sollte es Lerneffekte mit Spillover im Bau von WEA geben, diese mit Hilfe des kumulierten Outputs gemessen werden können, muss also eindeutig zurückgewiesen werden.

Außerdem kann gezeigt werden, dass die Preise pro kW mit zunehmender Nennleistung und Nabenhöhe abnehmen, wenn auch mit abnehmender Tendenz. Die Preise variieren zwischen Firmen und werden auch von Stahl- und Energiepreisen beeinflusst.

Ich will jedoch erneut auch auf die Schwächen dieser Untersuchung hinweisen. Im Idealfall hätte ich nicht nur die Preise der Windenergieanlagen, sondern auch deren Produktionskosten zur Verfügung. Ebenso sollten eigentlich möglichst alle Typen im Datensatz enthalten sein (hier fehlen ja zum Beispiel alle Vestasanlagen ab 2000) und dies mit allen relevanten Produktinformationen, die die Erfassung von Qualitätssteigerungen bei Typen gleicher Leistung ermöglichen. Ein vollständigerer Datensatz würde insbesondere dazu führen, dass bei der Bildung erster Differenzen nicht derart viele Informationen, wie das hier der Fall ist, verloren gehen. Ebenso wäre es von Vorteil, den kumulierten Output nicht nur in MW, sondern auch in kumulierter Anlagenanzahl über alle Jahre messen zu können.

# Kapitel 8

## Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit habe ich versucht, die Auswirkungen von Learning-by-Doing sowohl von der theoretischen Seite als auch in der Anwendung auf den Windenergiesektor zu beleuchten.

Ich habe gezeigt, dass Lerneffekte mit Spillover regulatorische Eingriffe mit Hilfe von Output- und Markteintrittssubventionen rechtfertigen können, und herausgearbeitet, wie die optimale Regulierung bei vollkommenem sowie Cournotwettbewerb aussehen müsste. Dabei zeigt sich für den Fall einmaliger Fixkosten, dass bei vollkommenem Wettbewerb Outputsubventionen und eine Markteintrittsprämie gezahlt werden müssen, damit die sozial optimale Allokation erreicht werden kann. Beim Cournotwettbewerb gibt es zusätzlich noch intra- und intertemporale strategische Effekte, die der Regulator ebenfalls berücksichtigen muss. Um die sozial optimale Allokation zu erreichen, benötigt er nun in beiden Perioden Outputsubventionen und zusätzlich eine Markteintrittsprämie oder -steuer. Falls Fixkosten in beiden Perioden anfallen, wird die optimale Regulierung komplexer. Während der Regulator bei vollkommenem Wettbewerb und spätem Marktzutritt weiterhin mit einer linearen Outputsubvention und einer Markteintrittsprämie auskommt, ist dies bei frühem Marktaustritt nicht mehr ausreichend. Da hier in der ersten Periode zwei unterschiedliche Firmentypen im Markt sind, die unterschiedliche externe Spillover-Effekte auslösen, weil sie unterschiedlich viel produzieren, sind deren optimale Grenzsубventionssätze verschieden. Wenn der Regulator zwischen den Firmen nicht diskriminieren kann oder darf, kann ich zeigen, dass mit einer geeigneten Outputsubventionsfunktion die Firmen selbst ihren Typ offenbaren und freiwillig unterschiedliche Grenzsубventionssätze wählen. Ähnlich verhält es sich im Cournotwettbewerb; nur ist hier auch bei spätem Markteintritt ein Subventionsmechanismus nötig, da die strategischen Anreize der Firmentypen in der zweiten Periode unterschiedlich sind. Aufgrund der Komplexität und Informationsanforderungen an den Regulator gilt freilich, dass die optimale Politik insbesondere im Cournotfall nicht leicht zu implementieren sein dürfte.

Unabhängig davon, ob die Firmen in unreguliertem vollkommenem Wettbewerb oder Cournotwettbewerb stehen, konnte ich ferner zeigen, dass sowohl Marktein- als auch Marktaustritt möglich ist. Auch im sozialen Optimum ist je nach Kosten- und Nachfragefunktion beides möglich. Durch Lerneffekte mit Spillover gibt es also nicht zwangsläufig eine Monopolisierungstendenz. Insbesondere kann man bei Beobachtung von Marktein- oder -austritt bei Existenz von Lerneffekten keinerlei Rückschlüsse auf die Wettbewerbsform oder auf wettbewerbsfeindliches Verhalten der Firmen ziehen.

Angewandt auf den speziellen Fall der Windenergie ist ein wesentliches Resultat, dass sich durch eine Subventionierung von Windstrom keine sozial optimale Allokation ergibt. Der Regulator sollte vielmehr die fossile Energieerzeugung besteuern und - falls es Learning-by-Doing mit Spillover-Effekten gibt - die Produktion von Windenergieanlagen subventionieren. Private Lerneffekte rechtfertigen keine Subventionierung. Ich zeige zudem, dass bei privaten Lerneffekten die zweitbeste Subvention auf Windstrom dem Grenzscha-den entsprechen sollte, wenn es keine Besteuerung der fossilen Stromerzeugung gibt. Gibt es Spillover-Effekte, kommt noch ein weiterer Term hinzu.

Im empirischen Teil der Arbeit widerlege ich mit einem neu erstellten Datensatz die Behauptung, dass es Lerneffekte in der Produktion von Windenergieanlagen gibt, zumindest wenn sie mit Hilfe von kumuliertem Output gemessen werden. In der bisherigen Literatur wurde die Nicht-Stationarität des kumulierten Outputs nicht berücksichtigt. Die dort berechneten Signifikanzniveaus sind daher unbrauchbar. Unter Berücksichtigung der Nicht-Stationarität zum Beispiel durch Bildung erster Differenzen kann kein signifikanter Lerneffekt mehr nachgewiesen werden.

Die natürliche politische Schlussfolgerung lautet daher, dass Subventionen des Windenergiesektors nicht mit Lerneffekten begründet werden können. Bei einer optimalen Regulierung sollte es also lediglich eine Pigou-Steuer auf die fossile Stromerzeugung geben. Für die zweitbeste Regulierung mittels einer Subventionierung des Windstroms konnte gezeigt werden, dass die derzeitige Einspeisevergütung mit in etwa 8 ct/kWh selbst dann zu hoch wäre, wenn es keinen  $CO_2$ -Emissionshandel gäbe, da keine Spillover nachgewiesen werden konnten. Selbst ein Grenzscha-den von 100 Euro/Tonne  $CO_2$  rechtfertigt maximal eine Einspeisevergütung von 7 ct/kWh. Die Subventionierung der Windenergie sollte also auf jeden Fall zurückgefahren werden. In Anbetracht des  $CO_2$ -Emissionshandels und in Ermangelung des Lern-Spillover-Arguments lautet die wirtschaftspolitische Empfehlung und Hauptschlussfolgerung dieser Arbeit, die Subventionierung des Windstroms völlig einzustellen.

Eine ganze Reihe von Fragen sind jedoch auch in dieser Arbeit offen geblieben. Im Falle von Lerneffekten und zweimaligen Fixkosten habe ich zwar die optimalen Politiken herausgearbeitet, falls früher Marktaustritt oder später Marktzutritt optimal sind und

mit Beispielen auch zeigen können, dass beide Fälle möglich sind. Es bleibt aber weiterer Forschung vorbehalten, allgemeine Bedingungen zu formulieren, wann es zu Marktein- oder -austritt im Falle von Lerneffekten kommt. Ebenso sind einige der vorgestellten Regulierungsmöglichkeiten, insbesondere im Cournotfall relativ komplex. Interessant wäre es hier, zweitbeste, aber einfacher zu implementierende Regulierungsregime zu untersuchen.

Eine sinnvolle Erweiterung wäre auch wie bei Petrakis, Rasmusen und Roy (1997) zuzulassen, dass die Firmen durch Lernen nicht nur die variablen, sondern auch die Fixkosten senken können. Dadurch würde die bisherige Beschränkung auf ein- bzw. zweimalige Fixkosten wegfallen, so dass wir allgemeinere Ergebnisse erhalten würden. Auch bei der Marktform habe ich mit vollkommenem und Cournotwettbewerb lediglich zwei Verhaltensformen zugelassen. Diese strikte Unterscheidung könnte in einer Verallgemeinerung durch Einführung eines Parameters aufgehoben werden, der den strategischen Cournotterm mit Werten zwischen null und eins gewichtet, so dass die hier untersuchten Fälle lediglich Extremformen eines allgemeineren Modells wären.

In der theoretischen Untersuchung des Windenergiemarktes ergeben sich ebenfalls spannende Fragestellungen. So könnte man untersuchen, inwiefern sich die Resultate und die optimale Politik verändern, wenn wir (eventuell realistischer) annehmen, dass der Strommarkt ein Oligopolmarkt ist. Zusätzlich könnte man zudem annehmen, dass auch auf dem WEA-Markt eine oligopolistische Marktstruktur herrscht. Auch bin ich in meiner Untersuchung davon ausgegangen, dass der Strom aus fossilen Energiequellen nur besteuert werden kann. Interessant im Hinblick auch auf die komparativ-statische Analyse könnte es sein, stattdessen von einem Emissionszertifikatemarkt auszugehen. Da nun die Emissionsmenge und nicht mehr der Emissionspreis fixiert ist, dürften sich andere Resultate ergeben. Ein unbefriedigendes Ergebnis ist außerdem, dass das Vorzeichen des Spillover-Terms bei der zweitbesten Windstromsubvention nicht bestimmt werden konnte. Hier bleibt es weiterer Forschung vorbehalten zu klären, ob es tatsächlich Fälle geben kann, bei denen Spillover in der WEA-Produktion dazu führen sollten, Windstrom geringer zu subventionieren beziehungsweise bei Abwesenheit externer Effekte auf dem Strommarkt gar zu besteuern.

Ein Ziel weiterer empirischer Forschung besteht in der Gewinnung einer besseren Datenbasis. Ideal wäre es, wenn außer den Preisen auch die Kosten einer einzelnen Windenergieanlage zur Verfügung stünden. Bei den Preisdaten habe ich hier auf Listenpreise zurückgegriffen. Noch besser wäre es jedoch, die tatsächlichen Marktpreise zu bekommen; so könnten auch eventuelle Mengenrabatte besser beobachtet werden. Auch würde man sich wünschen, vollständigere Daten zur Verfügung zu haben. So könnten in Kombination mit den Kostendaten Skaleneffekte in der Produktion geschätzt werden, wenn von allen einzelnen Firmen die Produktionszahlen möglichst der einzelnen Typen bekannt wäre. Mit

vollständigeren Produktions-, Verkaufs- und Marktdaten könnte auch geschätzt werden, ob WEA-Produzenten Marktmacht haben und ob diese sich im Laufe der Zeit möglicherweise verstärkt hat. Von großem Interesse wären natürlich auch Daten zu Forschungs- und Entwicklungsausgaben. Mit diesen Daten könnte alternativ zur Lernhypothese geschätzt werden, ob etwaige Kosten- oder Preisreduktionen auf Forschungsanstrengungen zurückzuführen sind.

Schließlich gibt es außer der Windenergie auch andere Industriezweige wie die Solarindustrie, deren Förderung ebenfalls häufig mit dem Argument sinkender Kosten im Zeitablauf und der Notwendigkeit von Lerninvestitionen begründet wird. Hier ergibt sich vor dem Hintergrund der ansteigenden Gesamtsubventionssumme nicht nur in Deutschland die dringende Notwendigkeit mit korrekten Methoden zu untersuchen, ob in diesem Sektor der kumulierte Output tatsächlich einen etwaigen Preis- oder Kostenrückgang zu erklären vermag. Denn nur bei nachgewiesenen Lerneffekten mit Spillover könnte auch in der Solarindustrie in Anbetracht des  $CO_2$ -Emissionshandels die Subventionierung von Solarstrom rechtfertigt werden.

# Literatur

- AGLIARDI, E. „Learning-by-Doing and Implications on Market Structures.“ *Economic Notes by Monte dei Paschi di Siena*, Bd. 21 (1992), S. 418-437.
- ALCHIAN, A. „Reliability of progress curves in airframe production.“ *Econometrica*, Bd. 31 (1963), S. 679-693.
- ALVAREZ, F. UND AMMAN, H. „Learning-by-Doing under Uncertainty.“ *Computational Economics*, Bd. 14 (1999), S. 255-262.
- ALVAREZ, F. UND CERDA, E. „When does Learning by Doing generate current losses?“ *Spanish Economic Review*, Bd. 3 (2001), S. 55-69.
- AN BONUS - AN WINDENERGIE. „Referenzen.“ [www.anwind.de/indexd.htm](http://www.anwind.de/indexd.htm), Stand: 03.01.2005.
- ARGOTE, L. UND EPPLE, D. „Learning Curves in Manufacturing.“ *Science*, Bd. 247 (1990), S. 920-924.
- ARGOTE, L., BECKMAN, S. UND EPPLE, D. „The Persistence and Transfer of Learning in Industrial Settings.“ *Management Science*, Bd. 36 (1990), S. 140-154.
- ARROW, K. „The Economic Implication of Learning-by-Doing.“ *Review of Economic Studies*, Bd. 29 (1962), S. 155-173.
- BAHK, B. UND GORT, M. „Decomposing Learning by Doing in New Plants.“ *Journal of Political Economy*, Bd. 101 (1993), S. 561-582.
- BARDHAN, P. „On Optimum Subsidy to a Learning Industry: An Aspect of the Theory of Infant-Industry Protection.“ *International Economic Review*, Bd. 12 (1971), S. 54-70.
- BAUMOL, W., PANZAR, J. UND WILLIG, R. *Contestable Markets and the Theory of Industry Structure*, New York: Harcourt Brace Jovanovich, Inc., (1982).
- BARRIOS, S. UND STROBL, M. „Learning by Doing and Spillovers: Evidence from Firm-Level Panel Data.“ *Review of Industrial Organization*, Bd. 25 (2004), S. 175-203.

- BERNDT, E. *The Practice of Econometrics*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts (1991).
- BTM CONSULT, *World Market Update 1997 - 2003*. Ringkoping, Dänemark, (1997 - 2003).
- BUNDESBANK. [http://www.bundesbank.de/statistik/statistik\\_zeitreihen.php](http://www.bundesbank.de/statistik/statistik_zeitreihen.php), (2005).
- BUNDESGESETZBLATT *Gesetz über die Einspeisung von Strom aus erneuerbaren Energien in das öffentliche Netz (Stromeinspeisungsgesetz)*. I, 2633, (1990).
- BUNDESGESETZBLATT *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG)*. I, 730, (1998).
- BUNDESGESETZBLATT *Stromsteuergesetz*. I, 378, (1999).
- BUNDESGESETZBLATT *Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien*. I, 305, (2000).
- BUNDESGESETZBLATT *Gesetz zur Umsetzung der Richtlinie 2003/87/EG über ein System für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten in der Gemeinschaft*. I, 35, (2004).
- BUNDESGESETZBLATT *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung*. I, 1970 (3621), (2005).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT *Bericht über den Stand der Markteinführung und der Kostenentwicklung von Anlagen zur Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien (Erfahrungsbericht zum EEG)*. [http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg\\_erfahrungsbericht.pdf](http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg_erfahrungsbericht.pdf), Stand 6.2.2006, (2002).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT *Konsolidierte Fassung der Begründung zu dem Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien*. [http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg\\_begruendung.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/eeg_begruendung.pdf), Stand 6.2.2006, (2004).
- BUNDESVERBAND WINDENERGIE BWE, *Windenergie 1999 - 2005*. Osnabrück, (1999 - 2005).
- CABRAL, L. UND RIORDAN, M. „The Learning Curve, Market Dominance, and Predatory Pricing.“ *Econometrica*, Bd. 62 (1994), S. 1115-1140.
- CABRAL, L. UND RIORDAN, M. „The Learning Curve, Predation, Antitrust, and Welfare.“ *The Journal of Industrial Economics*, Bd. 45 (1997), S. 155-169.
- CLEMHOUT, S. UND WAN, H. „Learning-by-Doing and Infant Industry Protection.“ *Review of Economic Studies*, Bd. 37 (1970), S. 33-56.
- CREANE, A. „Endogenous Learning. Learning by Doing And Information Sharing.“ *International Economic Review*, Bd. 36 (1995), S. 985-1002.



- DANISH ENERGY AUTHORITY *Wind power in Denmark: Technology, policies and results*. www.ens.dk, Stand: 01.11.2005.
- DASGUPTA, P. UND STIGLITZ, J. „Learning-by-Doing, Market Structure and Industrial and Trade Policies.“ *Oxford Economic Papers*, Bd. 40 (1988), S. 246-268.
- DEUTSCHE EMISSIONSHANDELSSTELLE *Benchmarks*, [http:// www.dehst.de/cln\\_027/ SharedDocs/ Downloads / DE/ Antragstellung\\_dl/ BVT\\_Energieanlagen, templateId=raw, property=publicationFile.pdf/ BVT\\_Energieanlagen vom 6.2.2006, \(2005\)](http://www.dehst.de/cln_027/SharedDocs/Downloads/DE/Antragstellung_dl/BVT_Energieanlagen_templateId=raw_property=publicationFile.pdf/BVT_Energieanlagen_vom_6.2.2006_(2005).).
- DEWIND. „DeWind Referenzen.“ *www.dewind.de*, Referenzen Stand: 02.02.2004.
- DICK, A. „Learning-by-Doing and dumping in the semiconductor industry.“ *The Journal of Law and Economics*, Bd. 34 (1991), S. 133-159.
- DURSTEWITZ, M. UND HOPPE-KILPER, M. *Bericht zur Markt- und Kostenentwicklung bei Windenergieanlagen*. Institut für Solare Energieversorgungstechnik e. V., Kassel, (2002).
- ENERCON. „Referenzen.“ *www.enercon.de/deutsch/sitemap.html*, Stand: 03.01.2005.
- FEDER, G. UND SCHMITZ, A. „Learning by Doing and Infant Industry Protection: A Partial Equilibrium Approach.“ *The Review of Economic Studies*, Bd. 43 (1976), S. 175-178.
- E.ON AG, „Strategie & Kennzahlen 2005.“ [http://www.eon.com/de/downloads/ StrategieKennzahlen2005\\_dt.20050524.pdf](http://www.eon.com/de/downloads/StrategieKennzahlen2005_dt.20050524.pdf) vom 7.2.2006, (2005).
- FELLNER, W. „Specific Interpretations of Learning by Doing.“ *Journal of Economic Theory*, Bd. 1 (1969), S. 119-140.
- FREEMAN, C. „Learning-by-Doing in Markets, Firms and Countries, ed. by Lamo-reaux, N., Raff, D. and Temin, P., Review article.“ *Journal of Economic Studies*, Bd. 26 (1999), S. 497-509.
- FUDENBERG, D. UND TIROLE, J. „Learning-by-Doing and Market Performance.“ *The Bell Journal of Economics*, Bd. 14 (1983), S. 522-530.
- FUDENBERG, D. UND TIROLE, J. „A Theory of Exit in Duopoly.“ *Econometrica*, Bd. 54 (1986), S. 943-960.
- GHEMAWAT, P. „Building strategy on the experience curve.“ *Harvard Business Review*, Bd. 63 (1985), S. 143-149.
- GHEMAWAT, P. UND SPENCE, M. „Learning Curve Spillovers and Market Performance.“ *Quarterly Journal of Economics*, Bd. 100 (1985), S. 839-852.
- GIPE, P. „Wind energy comes of age.“ *Energy Policy*, Bd. 8 (1991), S. 756-767.

- GOULDER, L. UND MATHAI, K. „Optimal  $CO_2$  Abatement in the Presence of Induced Technological Change.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, Bd. 39 (2000), S. 1-38.
- GREENE, W. *Econometric Analysis*, Fourth Edition, New York: Prentice-Hall, Inc., (2000).
- GRUBER, H. „The Learning Curve in the Production of Semiconductor Memory Chips.“ *Applied Economics*, (1992), S. 885-894.
- HABERMEIER, K. „The learning curve and competition.“ *International Journal of Industrial Organization*, (1992), S. 369-392.
- HALL, G. UND HOWELL, S. „The Experience Curves from the Economist’s Perspective.“ *Strategic Management Journal*, (1985), S. 197-212.
- HAMILTON, J. *Time Series Analysis*, Princeton, USA: Princeton University Press, (1994).
- HANSEN, J., JENSEN, C. UND MADSEN, E. „The Establishment of the Danish Windmill Industry - Was It Worthwhile?“ *Review of World Economics*, Bd. 139, 2, (2003), S. 324-347.
- HART, P. „Experience Curves and Industrial Policy.“ *International Journal of Industrial Organization*, (1983), S. 95-106.
- HEMMELSKAMP, J. UND HOHMEYER, O. „Auswirkungen der Windenergiepolitik auf Innovation.“ *IPTS Report*, (1999), Nr. 33.
- HEMMELSKAMP, J. UND JÖRG, S. „Innovationswirkungen der Umweltpolitik im Windenergiebereich.“ in: P. Klemmer (Hrsg.): *Innovation und Umwelt: Fallstudien zum Anpassungsverhalten in Wirtschaft und Gesellschaft*, Analytica, Berlin (1999), S. 81-112.
- HENDERSON, B. *Perspectives on Experience*. Boston Consulting Group, Boston, MA (1972).
- HIRSCH, Z. „Manufacturing progress functions.“ *The Review of Economics and Statistics*, Bd. 34 (1952), S. 143-155.
- HIRSCH, Z. „Firm Progress Ratios.“ *Econometrica*, (1956), S. 136-143.
- HIRSCHMANN, W. „Profit from the Learning Curve.“ *Harvard Business Review*, (1964), S. 125-139.
- HIRSHLEIFER, J. „The firms’s cost function: a succesful reconstruction?“ *The Journal of Business*, (1962), S. 235-255.
- HSIAO, C. *Analysis of Panel Data*, Second Edition Cambridge, Großbritannien: Cambridge University Press, (2003).

- IM, K., PESARAN, H. UND SHIN, Y. „Testing for unit roots in heterogenous panels.“ *Journal of econometrics*, Bd. 115 (2003), S. 53-74.
- INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIEVERSORGUNGSTECHNIK ISET, *Windenergie Report Deutschland 2002*, Kassel, (2002).
- INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR, *Experience curves for energy technology policy*, Paris, (2000).
- INTERNATIONALE ENERGIEAGENTUR, *Global Renewable Energy Policies and Measures Database*, <http://www.iea.org/textbase/pamsdb/grindex.aspx>, Stand: 6.3.2006, (2006).
- ISOARD, S. UND SORIA, A. „Technical Change Dynamics: Evidence from the Emerging Renewable Energy Technologies.“ *Energy Economics*, Bd. 23 (2001), S. 619-636.
- IRWIN, D. UND KLENOW, P. „Learning-by-Doing Spillovers in the Semiconductor Industry.“ *Journal of Political Economy*, Bd. 102 (1994), S. 1200-1227.
- JIN, J., PEROTE-PEÑA, J., UND TROEGE, M. „Learning-by-Doing, Spillovers and Shakeouts.“ *Journal of Evolutionary Economics*, Bd. 14 (2004), S. 85-98.
- JOSKOW, P. UND ROZANSKI, G. „The Effects of Learning by Doing on Nuclear Plant Operating Reliability.“ *The Review of Economics and Statistics*, Bd. 61 (1979), S. 161-168.
- JOSKOW, P. UND ROSE, N. „The effects of technological change, experience, and environmental regulation on the construction cost of coal-burning generating units.“ *RAND Journal of Economics*, Bd. 16 (1985), S. 1-27.
- JOVANOVIC, B. UND LACH, S. „Entry, Exit, and Diffusion with Learning by Doing.“ *The American Economic Review*, Bd. 79 (1989), S. 690-699.
- JUNGINGER, M., FAAIJ, A. UND TURKENBURG, W. „Global experience curves for wind farms.“ *Energy Policy*, Bd. 33 (2005), S. 133-150.
- KLAASSEN, G., MIKETA, A., LARSEN, K. UND SUNDQVIST, T. „The Impact of R&D on Innovation for Wind Energy in Denmark, Germany and the United Kingdom.“ *Ecological Economics*, Bd. 54 (2005), S. 227-240.
- KLENOW, P. „Learning Curves and the Cyclical Behavior of Manufacturing Industries.“ *Review of Economic Dynamics*, Bd. 1 (1998), S. 531-550.
- KOUVARITAKIS, N., SORIA, A. UND ISOARD, S. „Modelling energy technology dynamics: methodology for adaptive expectations models with learning by doing and learning by searching.“ *International Journal of Global Energy Issues*, Bd. 14 (2000), S. 104-115.

- LAFFONT, J. UND TIROLE, J. „Repeated auctions of incentive contracts, investment, and bidding parity with an application to takeovers.“ *RAND Journal of Economics*, Bd. 19 (1988), S. 516-536.
- LEAHY, D. UND NEARY, P. „Learning-by-Doing, Precommitment and Infant-Industry Promotion.“ *Review of Economic Studies*, Bd. 66 (1999), S. 447-474.
- LESTER, R. UND MCCABE, M. „The effect of industrial structure on learning by doing in nuclear power plant operation.“ *RAND Journal of Economics*, Bd. 24 (1993), S. 418-438.
- LEVIN, A., LIN, C. UND CHU, C. „Unit Roots in Panel Data: Asymptotic and Finite-Sample Properties.“ *Journal of Econometrics*, Bd. 108 (2002), S. 1-24.
- LEWIS, T. UND YILDIRIM H. „Learning by Doing and Dynamic Regulation.“ *RAND Journal of Economics*, Bd. 33 (2002), S. 22-36.
- LIEBERMAN, M. „The Learning Curve and Pricing in the Chemical Processing Industries.“ *RAND Journal of Economics*, Bd. 15 (1984), S. 213-228.
- LLOYD, R. „Experience Curve Analysis.“ *Applied Economics*, Bd. 11 (1979), S. 221-234.
- MAJD, S. UND PINDYCK, R. „The learning curve and optimal production under uncertainty.“ *RAND Journal of Economics*, Bd. 20 (1989), S. 331-343.
- MERLO, A. UND SCHOTTER, A. „Learning by not Doing: An Experimental Investigation of Observational Learning.“ *Games and Economic Behavior*, Bd. 42 (2003), S. 116-136.
- MIRAVETE, E. „Time-Consistent Protection with Learning-by-Doing.“ *European Economic Review*, Bd. 47 (2003), S. 761-790.
- MISHINA, K. „Learning by New Experiences: Revisiting the Flying Fortress Learning Curve“, in: N. Lamoreaux, D. Raff und P. Temin (Hrsg.): *Learning by Doing in Markets, Firms, And Countries*, The University of Chicago Press, Chicago, (1999), S. 145-179.
- MIXON, F. „Estimating Learning Curves in Economics: Evidence From Aerial Combat Over the Third Reich.“ *Kyklos*, Bd. 46 (1993), S. 411-419.
- MOOKHERJEE, D. UND RAY, D. „Collusive Market Structure under learning-by-doing and increasing returns.“ *Review of Economic Studies*, Bd. 58 (1991), S. 993-1009.
- MOUL, C. „Evidence of Qualitative Learning-by-Doing From the Advent of the ‘Talkie’.“ *The Journal of Industrial Economics*, Bd. 49 (2001), S. 97-109.

- MORTHORST, P. „Capacity development and profitability of wind turbines.“ *Energy Policy*, Bd. 27 (1999), S. 779-787.
- NEG MICON A/S. *Annual Reports 1999-2003*, Randers, Dänemark.
- NEIJ, L., ANDERSEN, P., DURSTEWITZ, M., HELBY, P., HOPPE-KILPER, M. UND MORTHORST, P. *Experience Curves: A Tool for Energy Policy Assessment*. IMES/EESS Report No. 40 Department of Technology and Society, Environmental and Energy Systems Studies, Lund University, Sweden, (2003).
- NEIJ, L. „Use of experience curves to analyse the prospects for diffusion and adoption of renewable energy technology.“ *Energy Policy*, Bd. 23 (1997), S. 1099-1107.
- NEIJ, L. „Cost dynamics of wind power.“ *Energy*, Bd. 24 (1999), S. 375-389.
- NORDHAUS, W. UND BOYER, J. *Warming the World - Economic Models of Global Warming*. MIT Press, USA, (2000).
- OFFERMAN, T. UND SONNEMANS J. „Learning by Experience and Learning by Imitating Successful Others.“ *Journal of Economic Behavior & Organization*, Bd. 34 (1998), S. 559-575.
- OLIVECRONA, C. „Wind Energy in Denmark.“ in: R. Gale, S. Barg und A. Gilies (Hrsg.): *Green Budget Reform: An international casebook of leading practice*, Earthscan Publications, London (1995), S. 55-67.
- OSMUNDSEN, P. „Learning-by-Doing; Consequences for Incentive Design.“ *Information Economics and Policy*, Bd. 14 (2002), S. 39-49.
- PESARAN, M. UND SMITH, R. „Estimating Long-Run Relationships from Dynamic Heterogeneous Panels.“ *Journal of Econometrics*, Bd. 68 (1995), S. 79-113.
- PETRAKIS, E., RASMUSEN, E. UND ROY, S. „The Learning Curve in a Competitive Industry.“ *RAND Journal of Economics*, Bd. 28 (1997), S. 248-268.
- PRESTON, L. UND KEACHIE, E. „Cost functions and progress functions: an integration.“ *American Economic Review*, Bd. 54 (1964), S. 100-107.
- RAPPING, L. „Learning and World War II Production Functions.“ *The Review of Economics and Statistics*, Bd. 47 (1965), S. 81-86.
- RAUCH, J. „A Note on the Optimum Subsidy to a Learning Industry.“ *Journal of Development Economics*, Bd. 38 (1992), S. 233-243.
- REPOWER. „REpower Referenzliste.“ [www.repower.de](http://www.repower.de), Referenzen Stand: 02.11.2004.
- ROBERTS, P. „A Theory of the Learning Process.“ *The Journal of the Operational Research Society*, Bd. 34 (1983), S. 71-79.

- SPENCE, M.A. „The Learning Curve and Competition.“ *The Bell Journal of Economics*, Bd. 12 (1981), S. 49-70.
- SUCCAR, P. „The Need for Industrial Policy in LDC's - A Re-Statement of the Infant Industry Argument.“ *International Economic Review*, Bd. 28 (1987), S. 521-534.
- SPULBER, D.F. „Effluent Regulation and Long-Run Optimality.“ *Journal of Environmental Economics and Management*, Bd. 12 (1985), S. 103-116.
- STATISTISCHES BUNDESAMT *Statistisches Jahrbuch 2003*, Wiesbaden, S. 614.
- STATISTISCHES BUNDESAMT *Statistisches Jahrbuch 1992 - 2004*, Wiesbaden.
- SUNMEDIA VERLAG, *Windkraftanlagenmarkt 1992 - 2004*, Hannover, (1992 - 2004).
- THOMPSON, P. „How Much Did the Liberty Shipbuilders Learn? New Evidence for an Old Case Study.“ *Journal of Political Economy*, Bd. 109 (2001), S. 103-137.
- TO, T. (1994). „Infant industry protection with oligopoly and learning by doing.“ *The Journal of International Trade & Economic Development*, (1994), S. 199-212.
- TOL, R. „The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties.“ *Energy Policy*, Bd. 33, (2005), S. 2064-2074.
- VON SEHT, H. „Windkraftnutzung im Aufwind.“ *Raumforschung und Raumordnung*, (2003), S. 43-57.
- VESTAS. „Annual Reports 1997 - 2004.“ *www.vestas.com*, (1997 - 2004).
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT BEIM BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ARBEIT „Gutachten des wissenschaftlichen Beirats zur Förderung erneuerbarer Energien.“ (2004).
- WRIGHT, T. „Factors Affecting the Cost of Airplanes.“ *Journal of the Aeronautical Sciences*, Bd. 3 (1936), S. 122-128.
- YOUNG, A. „Invention and Bounded Learning by Doing.“ *Journal of Political Economy*, (1993), S. 443-472.
- ZIMMERMAN, M. „Learning Effects and the Commercialization of New Energy Technologies: The Case of Nuclear Power.“ *The Bell Journal of Economics*, Bd. 13 (1982), S. 297-310.