

Ramon Scholz

Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch

Economic growth and energy

16/11
November, 2006

Diplomarbeit

Wirtschaftswachstum und Energieverbrauch

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Volkswirt

an der

Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät

der

Universität Augsburg

Eingereicht am Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre V
Prof. Dr. Hanusch

Name, Vorname: Scholz, Ramon
Matrikel-Nr.: 788855
E-Mail: Diplomarbeit@ramon-scholz.de

Betreuer: Prof. Dr. Pyka

Termin der Abgabe: 22. November 2006

Gliederung

Abbildungsverzeichnis	4
Abstract	5
I Einleitung	5
II Energie und Ressourcen in der modernen Ökonomie	8
1 Bedeutung von Energie und Ressourcen	8
2 Energiepolitische Maßnahmen	9
3 Wirtschaftliche Auswirkungen des Energiesparens	10
III Drei Modellansätze mit Energie in der Produktionsfunktion	11
1 Der neoklassische Ansatz	11
2 Der Modellansatz aus der Thermodynamik	12
3 Der neo-schumpeterianische Modellansatz	12
4 Vergleich der Modelle	13
IV Das neoklassische Modell	14
1 Modellvoraussetzungen	14
2 Modellaufbau	14
3 Lösung des Modells	17
4 Modellaussagen	23
V Das neoklassische NetLogo-Modell	25
1 Modellgleichungen	25
2 Modellaufbau	26
3 GUI des Modells	27
4 Modellergebnisse	30
VI Das neoklassische, erweiterte NetLogo-Modell	36
1 Modellgleichungen	36
2 Modellaufbau	38
3 GUI des Modells	39
4 Modellergebnisse	41

VII Das Modell aus der Thermodynamik	46
1 Herleitung der LINEX-Produktionsfunktion	46
2 Ermittlung der Produktionselastizitäten	48
3 Modellergebnisse	51
VIII Das neo-schumpeterianische Modell	53
1 Modellvoraussetzungen	53
2 Modellaufbau	54
IX Das neo-schumpeterianische NetLogo-Modell	58
1 Modellgleichungen	58
2 Modellaufbau	60
3 GUI des Modells	62
4 Modellergebnisse	65
5 Mögliche Modellerweiterungen	71
X Vergleich der Ergebnisse	72
Anhang A: Rechnungen	73
Anhang B: Variablenverzeichnis	77
Literatur	82

Abbildungsverzeichnis

III.1	Einfaches Schema des neoklassischen Modells	11
IV.1	Detailliertes Schema des neoklassischen Modells	15
IV.2	Phasendiagramm von \hat{D} und $\hat{\theta}_R$	22
IV.3	Phasendiagramm von g und $\hat{\theta}_R$	22
V.1	Das einfache neoklassische NetLogo-Modell	28
V.2	Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Fall 1	31
V.3	Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Fall 2	31
V.4	Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Fall 3	32
V.5	Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Ressourcenreduktion .	33
V.6	Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Ressourcenwachstums- reduktion	34
VI.1	Das erweiterte neoklassische NetLogo-Modell	39
VI.2	Erweitertes neoklassisches NetLogo-Modell Wachstumspfad 1 . . .	41
VI.3	Erweitertes neoklassisches NetLogo-Modell Wachstumspfad 2 . . .	42
VI.4	Erweitertes neoklassisches NetLogo-Modell Ressourcenreduktion	43
VI.5	Erweitertes neoklassisches NetLogo-Modell Ressourcenwachstums- reduktion	44
VII.1	Ergebnis der LINEX-Produktionsfunktion für die USA	49
VII.2	Ergebnis der LINEX-Produktionsfunktion für die USA - '1-year-pulse' Modell	50
VIII.1	Schema des neo-schumpeterianischen Modells	54
IX.1	Das neo-schumpeterianische NetLogo-Modell	62
IX.2	Produktionswachstum des neo-schumpeterianischen Standardmo- dells	65
IX.3	Ergebnisse des neo-schumpeterianischen Standardmodells	66
IX.4	Ergebnisse der 1. Variation des neo-schumpeterianischen Stan- dardmodells	68
IX.5	Ergebnisse der 2. Variation des neo-schumpeterianischen Stan- dardmodells	68
IX.6	Ressourcenreduktion im neo-schumpeterianischen Standardmodell	69
IX.7	Ressourcenwachstumsratenreduktion im neo-schumpeterianischen Standardmodell	70

Abstract

In der aktuellen Debatte zur Senkung der Treibhausgasemissionen werden zahlreiche Modelle und Ansätze verwendet. Zum besseren Verständnis dieser, präsentiert diese Arbeit zu den geläufigsten Strömungen der Volkswirtschaftslehre je ein Modell zur Analyse der Auswirkungen des Energiesparens auf das Wirtschaftswachstum. Die nicht bereits modellierten Modelle werden zusätzlich in NetLogo umgesetzt. Die resultierenden Ergebnisse werden anschließend anschaulich aufgezeigt. Für die neo-klassischen Modelle wurde das Modell von Smulders und de Nooij (2003) gewählt. Die Gruppe der thermodynamischen Modelle wird durch die Arbeit von Kümmel, Henn, und Lindenberger (2002a) repräsentiert. Das neo-schumpeterianische Modell orientiert sich unter anderem an den Arbeiten von Aghion und Howitt (1998) und Nelson und Winter (1982). Abschließend werden die Modellergebnisse miteinander verglichen.

I Einleitung

Aufgrund der Klimaveränderungen und ihrer globalen Auswirkungen gewinnt der Umweltschutz immer mehr an Bedeutung. Ein häufig diskutierter Ansatz zur Verhinderung dessen, was die schlimmsten Klimaprognosen in Aussicht stellen, ist die Reduktion der Treibhausgase. In Bezug auf die weltweit geführte Debatte um die Reduktion der Treibhausgase gibt es verschiedene Ansätze. Ein wichtiger Ansatz ist die Reduktion, insbesondere des Treibhausgases CO₂, über Quoten. Ein bekannter Vertrag, der dieses Modell umsetzt, ist das Kyoto-Protokoll¹. Dieses ökologische Ziel kann ökonomisch durch Technologiesubstitution, den technischen Fortschritt und einen geringeren Einsatz der fossilen Ressourcen erreicht werden. Das größte Einsparpotential im nicht-privaten Bereich liegt in der Erzeugung des Energieträgers elektrische Energie². In diesem Bereich gibt es bereits zahlreiche Arbeiten mit unterschiedlichen Ansätzen, wie dem neoklassischen, dem thermodynamischen und dem neo-schumpeterianischen.

¹Vereinte Nationen 1997

²Erdmann (1992)

Durch die Veränderungen der Technologie der Stromerzeugung kann unter anderem auch CO_2 eingespart oder aber vermehrt freigesetzt werden. Nordhaus (1997) geht in seiner Arbeit besonders auf das durch das wachsende Umweltbewußtsein entstandene Dilemma zwischen CO_2 -Reduktion und Atomausstieg ein. Dabei zeigt er auch die ökonomischen Konsequenzen, wie Preisveränderungen und Investitionspfade der verschiedenen Möglichkeiten von Energiegewinnung auf. Diese Arbeit zeigt im Gegensatz zu der von Nordhaus (1997) nicht die ökonomischen Auswirkungen von Technologiesubstitution, sondern die ökonomischen Auswirkungen einer Reduktion der Wachstumsrate des Einsatzes der fossilen Ressourcen. Dadurch reduziert sich auch die Wachstumsrate des CO_2 -Ausstoßes. Es werden drei Modelle, ein typisch neoklassisches, ein aus der Thermodynamik stammendes und ein neo-schumpeterianisches, betrachtet. Zum neoklassischen Modell gibt es die meisten Ansätze und es wird am häufigsten benutzt. Allgemein ist es wichtig festzulegen, welche Faktoren produktionsnotwendig sind. Hierbei sind zwei Hauptströmungen festzustellen:

- Modelle mit Kapital und Energie bzw. Arbeit und Energie³ oder
- Modelle mit Kapital, Arbeit und Energie⁴

als produktionsnotwendige Faktoren. Für diese Arbeit wurde der realistischere, jedoch wesentlich komplexere Fall von drei produktionsnotwendigen Faktoren gewählt.

Im II. Kapitel werden die historisch gewachsene Bedeutung der Ressourcen, die Gründe für staatliches Eingreifen in die Märkte für Ressourcen und die wirtschaftlichen Auswirkungen verschiedener energiepolitischer Maßnahmen kurz aufgezeigt.

Das III. Kapitel stellt die drei in dieser Arbeit verwendeten Ansätze, den neoklassischen von Smulders und de Nooij (2003), den aus der Thermodynamik stammenden von Kümmel, Henn, und Lindenberger (2002a) und den selbstgestellten neo-schumpeterianischen, kurz vor und grenzt sie voneinander ab.

Das neoklassische Modell von Smulders und de Nooij (2003) wird im IV. Kapitel ausführlich vorgestellt, erklärt und der Lösungsweg aufgezeigt. Anschließend werden noch die Ergebnisse mit und ohne endogenen technischen Fortschritt präsentiert.

³Puch, Díaz, und Guilló 2001

⁴Smulders und de Nooij 2003, Kuper und van Soest (2003) und Kemfert 1998

Das daraus resultierende selbsterstellte NetLogo-Modell mit endogenem technischen Fortschritt wird im V. Kapitel behandelt. Hierzu werden die zusätzlich benötigten Modellgleichungen vorgestellt und der interne Aufbau sowie die grafische Benutzeroberfläche erklärt. Abschließend werden die Auswirkungen einer Ressourcenreduktion und einer Reduktion des Ressourcenwachstums anhand der Programmergebnisse aufgezeigt.

Im VI. Kapitel werden die eben beschriebenen Vorgänge für das NetLogo-Modell mit endogenem technischen Fortschritt abgehandelt.

Für das Modell aus der Thermodynamik von Kümmel, Henn, und Lindenberger (2002a) wird im VII. Kapitel die LINEX-Produktionsfunktion hergeleitet, die Verfahrensweise zur Ermittlung der Produktionselastizitäten erklärt und die Ergebnisse präsentiert.

Die Herleitung, die Modellvoraussetzungen, die Modellstruktur und die benötigten Gleichungen für das selbsterstellte neo-schumpeterianische Modell werden im VIII. Kapitel erläutert.

Das IX. Kapitel beschreibt die für das neo-schumpeterianische NetLogo-Modell benötigten Gleichungen detaillierter, zeigt die interne Modellstruktur auf und erklärt die Benutzeroberfläche des Programms. Die Präsentation der Modellergebnisse und ein Ausblick auf die möglichen Erweiterungen und Variationen des Programms beenden dieses Kapitel.

Im abschließenden X. Kapitel werden die erhaltenen Ergebnisse, so weit möglich, miteinander verglichen und ein kurzer Ausblick gewährt.

Die in dieser Arbeit verwendeten NetLogo-Modelle sind erhältlich unter:

<http://www.ramon-scholz.de/diplomarbeit>

II Energie und Ressourcen in der modernen Ökonomie

Die Definitionen von Energie, Ressourcen, Reserven und Reichweite werden in dieser Arbeit an die Definitionen von Erdmann (1992) angelehnt:

- Der Begriff der Energie bezieht sich auf ein bepreistes Standardmaß der Nutzenergie der Energieträger.
- Ressourcen sind die mineralischen Energieträger an allen bekannten und unbekanntem Lagerstätten.
- Reserven sind alle bekannten, unter heutiger Technologie wirtschaftlich abbaubaren Ressourcen.
- Die Reichweite entspricht den Reserven pro Jahresförderung.

1 Bedeutung von Energie und Ressourcen

Seit der Erfindung der Dampfmaschine hat Energie in den modernen Ökonomien immer mehr an Bedeutung gewonnen. Diese Entwicklung gipfelt in der Nutzung der elektrischen Energie, die mittlerweile fast jeden Gebrauchsgegenstand eines modernen Haushalts versorgt. Sämtliche Schlüsselerfindungen der Informationsgesellschaft, wie Telefonsysteme, Computer, TV und auch die meisten Produktionsprozesse benötigen elektrische Energie.

90% der kommerziellen Weltenergie wird aus fossilen Ressourcen gewonnen. Bei dem rasch steigenden Weltenergiebedarf sinkt somit die Reichweite.⁵ Dadurch gewinnen Ressourcen in der modernen Ökonomie immer mehr an Bedeutung.

Das erzeugt zwei grundlegende Probleme:

Erstens müssen immer neue Reserven entdeckt, bzw. nutzbar gemacht werden. Hierzu müssen neue Vorkommen erkundet und sogenannte Backstop-Technologien⁶ erforscht werden.

Zweitens müssen die Reserven im benötigten Maße abgebaut werden können. Das ist problematisch, da die meisten Ressourcen in sogenannten Krisenherden lagern.

⁵Erdmann 1992, Kap. 2

⁶Levy 2000

Sollte es einer Ökonomie nicht möglich sein, beide Anforderungen direkt oder indirekt durch den Handel zu erfüllen, werden dieser die Reserven ausgehen. Wenn dies eintritt, wird die Ökonomie nicht die benötigte Produktion aufrecht erhalten können, um im Sattelpfad (bzw. Gleichgewichtspunkt) zu bleiben.

2 Energiepolitische Maßnahmen

Energiepolitische Maßnahmen des Staates sollen ein Marktversagen verhindern. Aufgrund von externen Effekten und einem zu kurzen Zeithorizont werden Kosten auf dem Markt verzerrt oder nicht wahrgenommen. Durch die Vernachlässigung der Umwelt, die ein öffentliches Gut ist, werden bei der Energieerzeugung die durch die Nutzung der Umwelt anfallenden Kosten nicht mit einkalkuliert. Dies führt zu einem zu geringen Preis. Da die Haushalte dadurch eine zu hohe Nachfrage aufweisen, resultiert daraus eine Überbeanspruchung der Umwelt. Der Zeithorizont wird durch zu hohe Zinsen für umweltschonende Technologien herabgesetzt. Die meisten dieser Technologien weisen sehr hohe Anfangsinvestitionen auf, wodurch in diesem Bereich zu wenig investiert wird. Außerdem wird durch den geringen Zeithorizont zu wenig Grundlagenforschung für eventuelle Backstop-Technologien betrieben, da deren Nutzen unterschätzt wird.⁷

Die Aufgabe der Politik ist es nun, den oben genannten Effekten durch Absprachen mit der Industrie, durch Gesetze, durch eigene Initiative und globalen Verträge entgegen zu wirken. Die bekanntesten Beispiele aus diesen Feldern in der Bundesrepublik Deutschland sind:

- Selbsterlegte Schadstoffreduktion, um ein Gesetz zu verhindern
- Die Ökosteuer, die Mineralölsteuer, Subventionen für Solarenergie
- Grundlagenforschung, z.B. im Bereich der Fusionsenergie, Anschaffung umweltschonender neuer Technologien in Staatsbetrieben
- Das Kyoto-Protokoll

In der Vergangenheit wurden deutlich drastischere Maßnahmen durchgeführt. In den 1970er-Jahren wurde aufgrund der Erdölknappheit unter anderem ein Sonntagsfahrverbot eingeführt. Dieses Verbot sicherte einen zusätzlichen Teil des pro-

⁷Erdmann 1992, Kap. 8

duktionsnotwendigen Rohstoffs Erdöl für die industrielle Produktion.

Die heutigen energiepolitischen Maßnahmen sollen hingegen die Verzerrung der Preise aufheben, die Investitionen in zukunftssichere Energieträger gewährleisten, und zum Energiesparen anregen.⁸

3 Wirtschaftliche Auswirkungen des Energiesparens

Die wirtschaftlichen Auswirkungen des Energiesparens werden von verschiedenen Autoren kontrovers diskutiert. Es ist jedoch festzuhalten, dass sich die Auswirkungen verschiedener energiepolitischer Maßnahmen des selben primären Ziels leicht unterscheiden.

Die Quotenregelung mit Zertifikathandel sowie die Pigot-Steuer haben das Ziel, die Umweltbelastung auf ein wohlfahrtsökonomisch optimales Maß zu reduzieren. Es entstehen bei gleicher Zielsetzung bei Besteuerung deutlich höhere Kosten durch Kontrollen und Festlegung unterschiedlicher Steuersätze für die Unternehmen. Außerdem muss die Reaktionsfunktion jedes Unternehmens auf den Steuersatz bekannt sein, um die wohlfahrtsoptimale Menge zu erzielen. Dies ist aber in der Realität nicht gegeben, weshalb die optimale Belastungsmenge verfehlt wird. Eine Steuer kann somit zu einer Übererfüllung führen, was bei einer richtig gewählten Quote nicht passiert. Die Kosten der Übererfüllung hemmen das Wirtschaftswachstum.

Bei der Quotenregelung muß das wirtschaftlich verträgliche und wohlfahrtsökonomisch optimale Maß der Belastung ermittelt werden und optimale Strafen für eine Belastungsüberschreitung aufgestellt werden. Die durchschnittlichen Grenzkosten der Produktion sind im Quotenmodell meist geringer als die durchschnittlichen Grenzkosten einer Steuer.⁹

In den folgenden Teilen dieser Arbeit werden nun die Auswirkungen des Energiesparens auf verschiedene makroökonomische Größen, anhand der in Kapitel I erwähnten Modelle, untersucht.

⁸Erdmann 1992

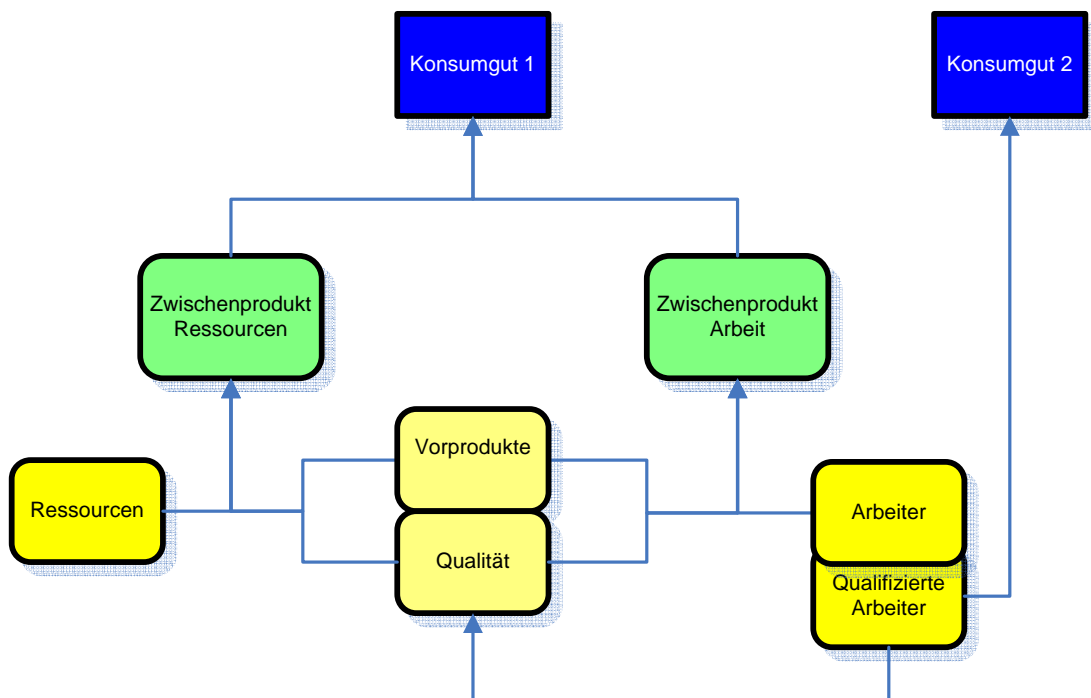
⁹Kühn und Bräuer 2000

III Drei Modellansätze mit Energie in der Produktionsfunktion

1 Der neoklassische Ansatz

Die typisch neoklassischen Modelle werden in dieser Arbeit durch das Modell von Smulders und de Nooij (2003) repräsentiert. Dieses Modell gehört zur Gruppe der Mehrsektoren-Modelle. Den Haushalten stehen zwei Arten von substitutiven Konsumgütern zur Verfügung. Das eine wird nur durch den Einsatz von qualifizierten Arbeitern produziert. Das andere wird durch eine CES-Produktionstechnik aus zwei Zwischenprodukten hergestellt. Die Zwischenprodukte werden durch den Einsatz von Arbeit (oder Ressourcen) und einem in verschiedenen Qualitäten verfügbaren Vorprodukt hergestellt. Die Vorprodukte können nur in dem Sektor eingesetzt werden, für den sie produziert wurden und werden wie die Zwischenprodukte bei der Produktion komplett verbraucht. Die Vorprodukte entsprechen somit in etwa dem Kapital. Der technische Fortschritt wird in diesem Modell durch die Verbesserung der Qualität der Vorprodukte dargestellt. Nur qualifizierte Arbeiter können die Qualitätsverbesserung erzielen. Zur Verdeutlichung der Prozesse dient die Abbildung III.1. Detaillierter wird dieses Modell im Kapitel IV behandelt.

Abbildung III.1: Einfaches Schema des neoklassischen Modells



2 Der Modellansatz aus der Thermodynamik

Das Modell von Kümmel, Henn, und Lindenberger (2002a) wurde aus dem Bereich der Thermodynamik ausgewählt. Das Modell besitzt eine LINEX-Produktionsfunktion mit den Produktionsfaktoren Arbeit, Kapital und Energie. Die LINEX-Produktionsfunktion¹⁰ erhält man, indem man das Integral der Wachstumsgleichung des Outputs bildet und die Lösung aus den Differentialgleichungen für die Produktionselastizitäten in diese einsetzt.

Mit Hilfe dieses Modells können die Produktionselastizitäten für die Inputfaktoren geschätzt werden. Da die Produktionselastizitäten den Kostenanteilen entsprechen müssen, kann man auf diese Weise untersuchen, welche Auswirkungen ein Kostenanstieg eines Produktionsfaktors auf die produzierte Menge hat. Außerdem kann überprüft werden, wie stark die Preise für die Produktionsfaktoren verzerrt sind. Eine detailliertere Beschreibung des Modells und dessen Aussagen wird in Kapitel VII gegeben.

3 Der neo-schumpeterianische Modellansatz

Das neo-schumpeterianische Modell ist ein selbstentwickeltes Modell, das überwiegend an den Arbeiten von Nelson und Winter (1982), Aghion und Howitt (1998), Cantner und Pyka (1998) und Dosi, Orsenigo, und Sylos Labini (2005) angelehnt ist. Das Modell konzentriert sich auf die Aktivitäten der heterogenen Firmen, die unter monopolistischer Konkurrenz ein Vorprodukt produzieren und Forschung und Entwicklung betreiben. Sie können diese Investitionen entweder für Prozessinnovationen verwenden, oder versuchen ein neues Produkt zu innovieren.

Der Ausgabenanteil der Firmen in Forschung und Entwicklung ist durch eine exogen vorgegebene Routine festgelegt. Die Nachfrage nach den speziell für den einen der beiden Vorproduktsektoren hergestellten Vorprodukte ist durch die Gewinnmaximierung der neoklassisch handelnden Nachfrager gegeben.

Mit diesem Modell können die Auswirkungen auf exogene Veränderung des Ressourcenbestandes oder dessen Wachstumsrate unter neo-schumpeterianischen Aspekten betrachtet werden.

¹⁰vgl.: Kapitel VII.1

4 Vergleich der Modelle

Das neo-schumpeterianische Modell und das neoklassische Modell sind sich im Aufbau sehr ähnlich. Der Hauptunterschied besteht in der Modellierung des technischen Fortschritts und dem damit verbundenen Forschungssektor. Mit beiden Modellen kann untersucht werden, welche Auswirkungen ein geringerer Einsatz von Ressourcen auf das Wirtschaftswachstum hat. Jedoch benötigt das schumpeterianische Modell eine Vielzahl an Durchläufen, um einen guten Mittelwert zu erhalten, da die Trajektorien zeitabhängig sind und nach den schumpeterianischen Regeln gebildet werden. Die Ergebnisse können dadurch voneinander abweichen.

Das Modell aus der Thermodynamik hingegen ist kein allgemeines Gleichgewichtsmodell, wie das aus der Neoklassik. Dieses Modell vernachlässigt die Haushaltsseite und untersucht nur die Produktion. Aufgrund der Produktionselastizitäten werden hier die Aussagen über das Wirtschaftswachstum getroffen. Außerdem kann nur mit diesem Modell anhand von Zeitreihen untersucht werden, ob die Faktorkostenentlohnung in der untersuchten Zeitperiode mit den Annahmen der Neoklassik übereinstimmt.

IV Das neoklassische Modell von Smulders und de Nooij (2003)

Dieses Modell ist ein allgemeines Gleichgewichtsmodell mit mehreren Sektoren im Bereich der Produktion. In diesem Modell sind alle Akteure in einem Sektor homogen und handeln nach dem typisch neoklassischen Optimierungskalkül.

1 Modellvoraussetzungen

In diesem Modell sind die Startwerte für das Angebot an nicht qualifizierten und qualifizierten Arbeitern, den Ressourcenbestand und den Kapitalbestand für die Vorprodukte exogen gegeben.

Für eine numerische Lösung werden des weiteren die Startwerte für die Qualität der Vorprodukte, die diversen Produktions- und Substitutionselastizitäten, die Effizienzparameter für die Forschung zur Qualitätsverbesserung der zwei Arten der Vorprodukte und ein Regulierungsparameter für die Skalierung Produktion des Endproduktes Y benötigt.

Die Nutzenfunktion der Haushalte, sowie alle Produktionsfunktionen, mit Ausnahme der Produktionsfunktion des zweiten Konsumgutes (C_H), erfüllen die Inada-Bedingungen und entsprechen somit einer neoklassischen Standard-Nutzen- /Produktionsfunktion.

2 Modellaufbau

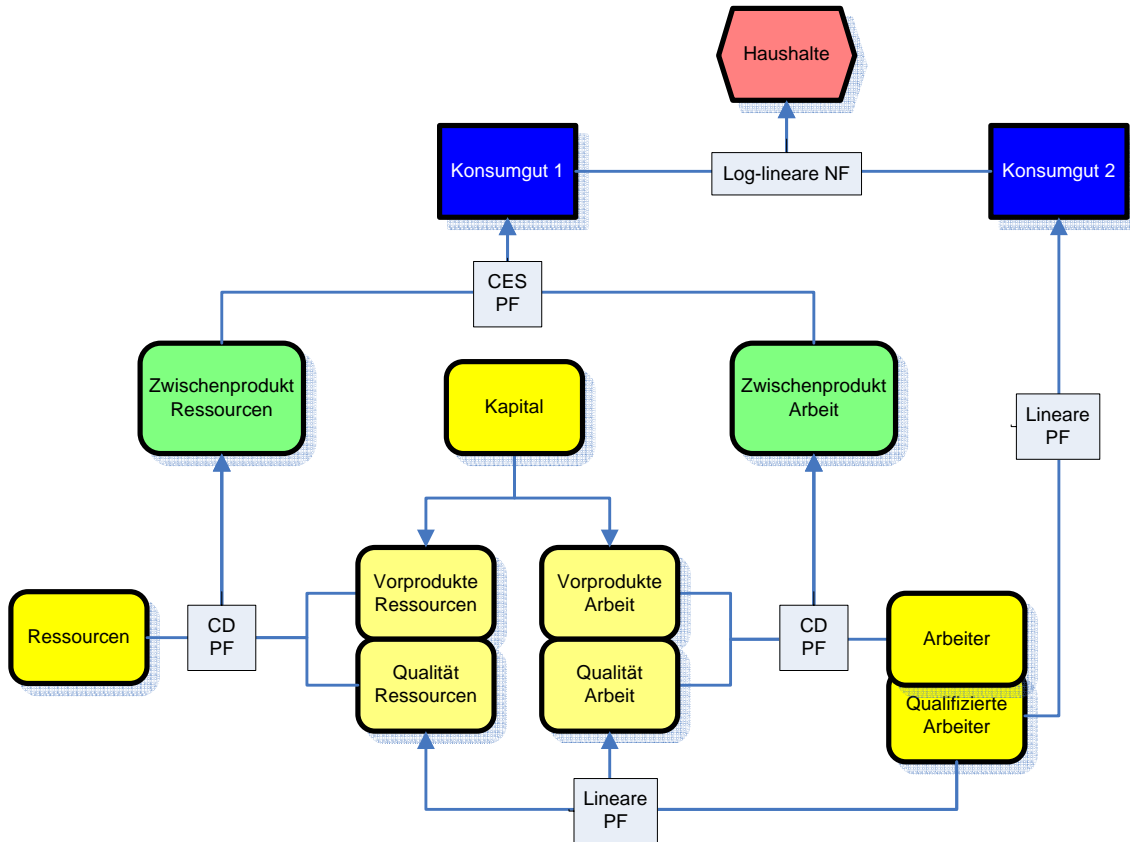
Zum leichteren Verständnis der Wirtschaftskreisläufe des Modells dient die Abbildung IV.1.

Die Haushalte werden durch die einfache Nutzenfunktion

$$\int_0^{\infty} [\alpha \ln C_H + (1 - \alpha) \ln C_Y] e^{-\rho t} dt \quad (\text{IV.2.1})$$

abgebildet. Der Faktor α [bzw. $(1 - \alpha)$] ist sowohl der Gewichtungsfaktor des Konsumgutes, als auch der Ausgabenanteil für das Konsumgut der Haushalte.¹¹ Der intertemporäre Diskontfaktor der Haushalte ist ρ . C_H entspricht dem Konsumgut 2

¹¹Aufgrund der Cobb-Douglas-Nutzenfunktionsspezifikation

Abbildung IV.1: Detailliertes Schema des neoklassischen Modells

und C_Y entspricht dem von den Haushalten konsumierten Anteil vom Endprodukt 1 (Y).

Eine Einheit des Konsumgutes 2 wird durch eine Einheit qualifizierter Arbeit produziert. Somit gilt für die Produktion:

$$C_H = H - D \quad (\text{IV.2.2})$$

Dabei ist H die gesamt verfügbare Menge an qualifizierter Arbeit und D der in der Forschung eingesetzte Anteil.

Das Endprodukt 1 wird mit der CES-Produktionsfunktion

$$Y = A \left(Y_L^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + Y_R^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (\text{IV.2.3})$$

hergestellt. Für die Substitutionselastizität σ ist ein ökonomisch sinnvoller Wert zwischen 0 und 1.¹² Der empirische Wert liegt ungefähr zwischen 0,4 und 0,8.¹³

¹²Bei 1 (0) ist es eine Cobb-Douglas- (Leontieff-) Produktionsfunktion. Für Werte größer 1 ist ein Faktor nicht mehr produktionsnotwendig.

¹³Kemfert (1998)

A dient der Skalierung der Produktion und ist mit dem allgemeinen technischen Fortschritt vergleichbar.¹⁴ Die Zwischenprodukte für Arbeit und Ressourcen sind Y_L und Y_R und werden auf Märkten, in denen vollkommene Konkurrenz herrscht, eingekauft.

Die Zwischenprodukte werden durch die Cobb-Douglas-Produktionsfunktionen

$$Y_L = L^\beta \int_0^1 q_{Lk} x_{Lk}^{1-\beta} dk \quad (\text{IV.2.4})$$

$$Y_R = R^\beta \int_0^1 q_{Rk} x_{Rk}^{1-\beta} dk \quad (\text{IV.2.5})$$

hergestellt. Die Inputfaktoren Arbeit und Ressourcen sind mit L und R bezeichnet. Das k'te Vorprodukt für den Inputfaktor Arbeit (Ressourcen) ist x_{Lk} (x_{Rk}) und hat die Qualitätsausprägung q_{Lk} (q_{Rk}). Auf den Märkten für Ressourcen und Arbeit herrscht vollkommene Konkurrenz. Die Vorprodukte werden auf einem Markt der monopolistischen Konkurrenz angeboten und die Anzahl der Vorprodukte ist in jedem Sektor auf 1 normiert.

Die durchschnittliche Qualität im Sektor i (s = L,R) lässt sich durch

$$Q_i = \int_0^1 q_{ik} dk \quad (\text{IV.2.6})$$

ausdrücken.

Die Qualität in einem Sektor verändert sich durch die Forschung der Vorproduktproduzenten durch qualifizierte Arbeiter. Es gilt:

$$\dot{q}_{ik} = [\xi Q_i D_i^{1-\omega_i}] D_{ik}^{\omega_i} \quad (\text{IV.2.7})$$

Die Wachstumsrate der Qualität ist somit vom Produktivitätsparameter ξ , dem bisherigen durchschnittlichen Qualitätslevel Q_i , den Investitionen der Firma D_{ik} und denen des gesamten Sektors D_i abhängig. Der Parameter $1 - \omega$ stellt den sofortigen intrasektoralen Forschungs-Spillover zu anderen Firmen dar. Der Anteil der erfolgreichen Innovationen wird durch ω dargestellt. Somit gibt es in diesem Modell zwei Arten des Wissens-Spillovers.¹⁵

¹⁴Sektorweite Schlüsseltechnologien wie die Dampfmaschine, Elektrizität, Computer usw.

¹⁵1. Durch den bisherigen Qualitätslevel; 2. Durch die Forschung anderer Firmen

3 Lösung des Modells

Zur Lösung des Modells wird Y als das Numéraire herangezogen. Somit gilt

$$1 = A^{-1} \left[p_{YL}^{\frac{1-\sigma}{\sigma}} + p_{YR}^{\frac{1-\sigma}{\sigma}} \right]^{\frac{1}{1-\sigma}} \quad (\text{IV.3.1})$$

mit p_{YL} und p_{YR} als Preise der Zwischenprodukte.

Für das Verhältnis der Inputfaktoren der Gleichung IV.2.3 gilt aufgrund der CES-Spezifikation

$$\frac{Y_L}{Y_R} = \left(\frac{p_{YL}}{p_{YR}} \right)^{-\sigma}. \quad (\text{IV.3.2})$$

Zur Vereinfachung wird nun A_i mit

$$A_i \equiv \int_0^1 q_{ik} \left(\frac{x_{ik}}{S_i} \right)^{1-\beta} dk; \quad \text{mit } i = R, L \text{ und } S_i = R, L \quad (\text{IV.3.3})$$

definiert.

Durch das Einsetzen von Gleichung IV.2.4 und IV.2.5 in die Gleichung IV.2.3 unter Zuhilfenahme von Gleichung IV.3.3 erhält man die vereinfachten Gleichungen

$$Y_i = A_i S_i \quad (\text{IV.3.4})$$

$$Y = A \left[(A_L L)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (A_R R)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}. \quad (\text{IV.3.5})$$

Für den Preis bzw. Lohn von Ressourcen und Arbeit w_i und den Vorprodukten p_{xik} erhält man durch Differenzierung und anschließendes Einsetzen die Beziehungen:

$$p_{Yi} \frac{\partial Y_i}{\partial S_i} = w_i \quad \Leftrightarrow w_i = p_{Yi} \beta A_i; \quad i = R, L \quad (\text{IV.3.6})$$

$$p_{Yi} \frac{\partial Y_i}{\partial x_{ik}} = p_{xik} \quad \Leftrightarrow p_{xik} = p_{Yi} (1 - \beta) q_{ik} \left(\frac{S_i}{x_{ik}} \right)^{\beta}; \quad i = R, L \quad (\text{IV.3.7})$$

Aus der Gewinnmaximierung der Firmen, die die Vorprodukte unter monopolistischer Konkurrenz produzieren, erhält man den Monopolpreis ¹⁶

$$p_{xik} = \frac{q_{ik}}{1 - \beta} \quad (\text{IV.3.8})$$

¹⁶mit q_{ik} als Kosten der Produktion einer Einheit x_{ik} der Qualität q_{ik} und $(1 - \beta)$ der Elastizität

der Vorproduktproduzenten.

Durch die Substitution des Preises in der Nachfragefunktion (Gleichung IV.3.7) sieht man, dass alle Vorproduktproduzenten in einem Sektor die gleiche Menge

$$x_i \equiv (p_{Y_i}(1 - \beta)^2)^{\frac{1}{\beta}} S_i = x_{ik} \quad i = R, L; \quad S_i = R, L \quad (\text{IV.3.9})$$

produzieren.

Zur weiteren Analyse des Marktgleichgewichts werden nun die Relativpreise, die relative Nachfrage und weitere relative Größen benötigt. Der Index B der Variablen steht hierbei für das Verhältnis von Energie (Ressourcen) zu Arbeit. Somit steht z.B. p_Y^B für p_{YR}/p_{YL} und w^B für w_R/w_L .

Aus den Gleichungen IV.2.4, IV.2.5, IV.3.2, IV.3.3, IV.3.6 und IV.3.9 erhält man¹⁷

$$p_Y^B = \left(\frac{Q^B R}{L} \right)^{-\frac{\beta}{\nu}} \quad (\text{IV.3.10})$$

$$x^B = (Q^B)^{-\frac{1}{\nu}} \left(\frac{R}{L} \right)^{-\frac{1-\nu}{\nu}} \quad (\text{IV.3.11})$$

$$w^B = (Q^B)^{-\frac{1-\nu}{\nu}} \left(\frac{R}{L} \right)^{-\frac{1}{\nu}} \quad (\text{IV.3.12})$$

mit $\nu \equiv 1 - \beta(1 - \sigma)$.

Aus den Gleichungen IV.2.3, IV.2.4, IV.2.5, IV.3.1, IV.3.9 und IV.3.10 erhält man¹⁸

$$Y = \left[(Q_L L)^{\frac{\nu-1}{\nu}} + (Q_R R)^{\frac{\nu-1}{\nu}} \right]^{\frac{\nu}{\nu-1}}. \quad (\text{IV.3.13})$$

Diese Gleichung stellt die Produktionsfunktion bei der Gleichgewichtsmenge an Kapital (x_i) dar.

Die Qualität dient nun als Inputfaktorgewichtung. Die Substitutionselastizität zwischen effektiver Arbeit und effektiver Energie (Ressourcen) ist nun ein gewichtetes Mittel zwischen der ursprünglichen Substitutionselastizität und der Produktionselastizität der Zwischenprodukte. Der Wert $\nu = (1 - \beta) + \beta\sigma$ liegt im Intervall von 0 und 1.

Der Pro-Kopf-Output und die Pro-Kopf-Wachstumsrate lassen sich direkt aus der Gleichung IV.3.13 wie folgt ablesen:

$$\frac{Y}{L} = Q_L (1 - \theta_R)^{\frac{\nu}{1-\nu}} \quad (\text{IV.3.14})$$

$$g \equiv \hat{Y} - \hat{L} = \hat{Q}_L + \theta_R (g_{R/L} + \hat{Q}^B) \quad (\text{IV.3.15})$$

¹⁷Berechnungen im Anhang A: 1

¹⁸Hierbei wurde zur Vereinfachung $A = (1 - \beta)^{2(\beta-1)/\beta}$ gesetzt. Berechnung im Anhang A: 2

Hierbei ist $g_{R/L} = \hat{R} - \hat{L} (= \hat{S}^B)$ und $\theta_i \equiv \frac{Y_i p_{Y_i}}{Y}$ ist der Kostenanteil von Energie- und Arbeitszwischenprodukten¹⁹ und es gilt:

$$\theta_R = 1 - \theta_L = \left[\left(\frac{Q^B R}{L} \right)^{\frac{1-\nu}{\nu}} + 1 \right]^{-1} \quad (\text{IV.3.16})$$

Somit sind nun alle relevanten Größen bei exogenem technischen Fortschritt ermittelt. Dieses Ergebnis wird in Kapitel IV.4 genauer erläutert.

Der endogene technische Fortschritt basiert auf der Gleichung IV.2.7.

Die Firmen wählen den Einsatz an qualifizierter Arbeit, der ihren Firmenkapitalwert maximiert. Daraus entsteht die folgende 'Kein-Arbitrage-Gleichung':

$$r = \underbrace{\left(\frac{\beta \omega_i \xi_i}{1 - \beta} \right) x_i \left(\frac{Q_i}{w_D} \right) \left(\frac{D_i}{D_{ik}} \right)^{1-\omega_i}}_{\Delta \pi} + \underbrace{\hat{w}_D - \hat{Q}_i - (1 - \omega)(\hat{D}_i - \hat{D}_{ik})}_{\Delta \text{ Schattenpreis}} \equiv r_{ik} \quad (\text{IV.3.17})$$

mit r als Zinssatz, w_D als Kosten der Forschung D und ξ_i , $(1 - \omega_i)$ und ω_i wie in Gleichung IV.2.7 als Effizienzparameter.

Aus der Gleichung erkennt man, dass die Firmen solange in Forschung investieren, bis die Grenzrate der Investitionen dem Kapitalmarktzins r entspricht. Der erste Term auf der rechten Seite der Gleichung drückt die Gewinne durch die Qualitätsverbesserung aus. Die Gewinne aus der Qualität steigen proportional zur Anzahl der verkauften Vorprodukte. Die weiteren Terme spiegeln die erwartete Veränderungsrate des Schattenpreises durch die Qualitätsverbesserung wider. Eine hohe Wachstumsrate der Qualität erzeugt große Spillover-Effekte und verbilligt die zukünftige Forschung. Dies verleitet dazu, die Innovation hinauszuschieben (abgebildet durch \hat{Q}). Die höheren Kosten der zukünftigen Forschung (\hat{w}_D) haben einen gegenläufigen Effekten.

Alle in der Forschung tätigen Firmen müssen die selbe Grenzertragsrate besitzen. Gleichung IV.3.17 zeigt, dass dies $D_{ik} = D_i$ impliziert, so dass alle Firmen in einem Sektor die selbe Forschungsintensität besitzen und die Grenzertragsraten der Sektoren gleich sind. Mit Hilfe der Gleichungen IV.2.4, IV.2.5 und IV.3.9 lässt

¹⁹Diese Kostenanteile enthalten die Vorprodukte aus Kapital. Für die Kostenanteile von Arbeit und Energie muß man θ_i mit β multiplizieren. Dann gilt: $\beta \theta_i = w_i S_i / Y$

sich Gleichung IV.3.17 umschreiben in

$$\begin{aligned} r - w_D &= \beta(1 - \beta) \left(\frac{Y}{w_D} \right) \omega_L \xi_L \theta_L - \widehat{Q}_L = \\ &= \beta(1 - \beta) \left(\frac{Y}{w_D} \right) \omega_R \xi_R \theta_R - \widehat{Q}_R \end{aligned} \quad (\text{IV.3.18})$$

$$\widehat{Q}^B = \beta(1 - \beta) \frac{Y}{w_D} [\omega_R \xi_R \theta_R - \omega_L \xi_L \theta_L] \quad (\text{IV.3.19})$$

$$\widehat{Q}^B = \lambda_{BTC} (\theta_R - \theta_{NB}) \quad (\text{IV.3.20})$$

$$\text{mit: } \lambda_{BTC} \equiv \beta(1 - \beta) \left(\frac{Y}{w_D} \right) (\omega_L \xi_L + \omega_R \xi_R) > 0$$

$$\theta_{NB} \equiv \frac{\omega_L \xi_L}{\omega_L \xi_L + \omega_R \xi_R}. \quad (\text{IV.3.21})$$

Bei $\theta_R = \theta_{NB}$ gibt es kein Bias. Dies bedeutet, dass der Energieanteil am BSP genau so hoch ist, dass er die relativ niedrigen Forschungsproduktivitäten (ξ_R) und Absorbtionsfähigkeiten (ω_R) der Energietechnologie auffängt. Ist der Energieanteil höher, so bestimmt λ_{BTC} wie stark und schnell das Bias reagiert.

Das Wachstum des Energieanteils, dass vom Wachstum des Bias (\widehat{Q}^B) und den Wachstumsraten von Ressourcen und Arbeit abhängt, ist:

$$\widehat{\theta}_R = -(1 - \theta_R) \left(\frac{1 - \nu}{\nu} \right) [\lambda_{BTC} (\theta_R - \theta_{NB}) + g_{R/L}] \quad (\text{IV.3.22})$$

Für die Betrachtung des allgemeinen Wachstumsmodells benötigt man noch einige Langzeitwerte. Die Langzeitbetrachtung wird durch ∞ signalisiert. Näherungsweise ist der Langzeitwert des Energiekostenanteils

$$\theta_R(\infty) = \theta_{NB} - \frac{g_{R/L}}{\lambda_{BTC}} \quad (\text{IV.3.23})$$

und das Qualitätswachstumsverhältnis ist

$$\widehat{Q}^B(\infty) = -g_{R/L}. \quad (\text{IV.3.24})$$

Da alle Firmen in einem Sektor mit der gleichen Intensität forschen, kann die Gleichung IV.2.7 in $\widehat{Q}_i = \xi_i D_i$ umgeschrieben werden. Mit den Definitionen $D_L + D_R = D$ und $Q^B \equiv Q_R/Q_L$ erhält man²⁰

$$\widehat{Q}_L = \zeta D - \frac{\xi_L}{\xi_L + \xi_R} \widehat{Q}^B \quad \text{mit } \zeta \equiv \frac{\xi_R \xi_L}{\xi_L + \xi_R}. \quad (\text{IV.3.25})$$

²⁰Berechnung im Anhang A:3

Substituiert man nun die Gleichungen IV.3.24 und IV.3.25 in IV.3.15, erhält man

$$g(\infty) = \left(\frac{\xi_L}{\xi_L + \xi_R} \right) g_{R/L} + \zeta D(\infty). \quad (\text{IV.3.26})$$

Somit ist das Wirtschaftswachstum langfristig nur von den Forschungsproduktivitäten, dem Ressourcen- und Bevölkerungswachstum und der Anzahl der Forscher (einzige endogene Variable) abhängig.

Zur Bestimmung der Höhe der Investitionen in F & E im allgemeinen Gleichgewichtsmodell benötigt man die Nutzenfunktion der Konsumenten (Gleichung IV.2.1). Die nachgefragten Gütermengen der Haushalte sind

$$C_Y = [1 - (1 - \beta)^2]Y \quad (\text{IV.3.27})$$

$$C_H = H - D. \quad (\text{IV.3.28})$$

Der Lohn für qualifizierte Arbeit ist

$$w_D = \left(\frac{\alpha[1 - (1 - \beta)^2]}{1 - \alpha} \right) \frac{Y}{H - D}. \quad (\text{IV.3.29})$$

Aufgrund der logarithmischen Nutzenfunktion wählt der Haushalt den Konsumpfad, der das Wachstum $(1 - \alpha)\hat{C}_Y + \alpha(\hat{C}_H + \hat{p}_{CH}) = r - \rho$ hat. Durch die Substitution der Gleichungen IV.3.27 und IV.3.28 und der Einkommensbedingung für qualifizierte Arbeit $p_{CH} = w_D$ erhält man die Lohnwachstumsrate für qualifizierte Arbeit, die auch das Kapitalangebot auf den Märkten darstellt.

$$\hat{w}_D = \frac{D}{D - H} \hat{D} = r - \rho \quad (\text{IV.3.30})$$

Aus der Gleichung für das Kapitalangebot (IV.3.30) und der Gleichung für die Kapitalnachfrage (IV.3.18) und den Gleichungen IV.3.20 und IV.3.25 um \hat{Q}^B und \hat{Q}^L zu substituieren, erhält man die Wachstumsrate der Investitionen in Forschung²¹

$$\hat{D} = \frac{H - D}{D} \{ \rho + \zeta D - \zeta [\omega_L - (\omega_L - \omega_R) \theta_R] (H - D) \}. \quad (\text{IV.3.31})$$

Aus den Gleichungen IV.3.16, IV.3.20 und IV.3.29 erhält man die Wachstumsrate des Energiekostenanteils

$$\hat{\theta}_R = -(1 - \theta_R) \left(\frac{1 - \nu}{\nu} \right) [(\omega_R \xi_R + \omega_L \xi_L) (H - D) (\theta_R - \theta_{NB}) + g_{R/L}]. \quad (\text{IV.3.32})$$

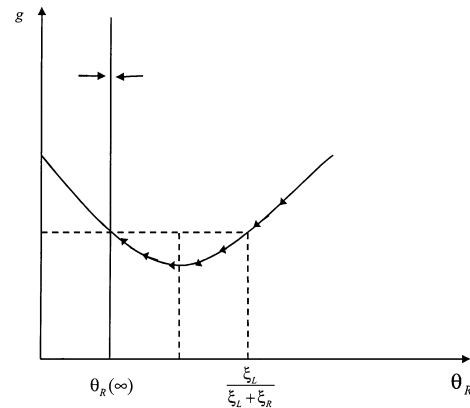
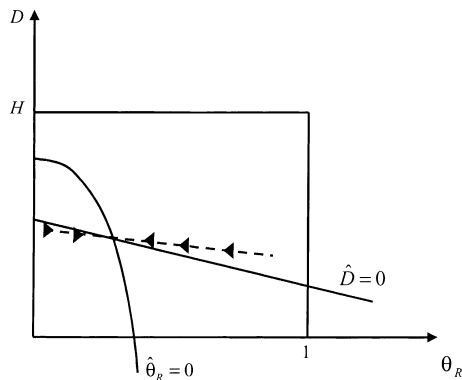
²¹ Es wurde der Einfachheit halber $\beta(1 - \beta)/[1 - (1 - \beta)^2] = \alpha/(1 - \alpha)$ gesetzt, da diese Größen nur für die komperative Statik von α und β wichtig sind.

Die Gleichungen IV.3.31 und IV.3.32 bestimmen die Dynamik des Modells mit endogenisiertem technischen Fortschritt. Der daraus für die Volkswirtschaft resultierende Sattelpfad ist in Abbildung IV.2 dargestellt.

Abbildung IV.2: Phasendiagramm von \hat{D} und $\hat{\theta}_R$ **Abbildung IV.3:** Phasendiagramm von g und $\hat{\theta}_R$

S. Smulders, M. de Nooij / Resource and Energy Economics 25 (2003) 59–79

S. Smulders, M. de Nooij / Resource and Energy Economics 25 (2003) 59–79



Im Phasendiagramm in Abbildung IV.2 stellt der Schnittpunkt der Gleichungen $\hat{D} = 0$ und $\hat{\theta}_R = 0$ den stabilen Gleichgewichtspunkt der Ökonomie dar. Die Punkte auf den eben angesprochenen Gleichungen sind die Menge aller Werte, auf denen sich D , bzw. θ_R nicht verändern. Die gestrichelte Linie stellt den Sattelpfad dar, auf dem sich die Ökonomie in Richtung der Pfeile zum Steady-State hin bewegt. Ober- oder unterhalb des Sattelpfades wird die Ökonomie nach T Perioden durch die Dynamik entweder die Transversalitätsbedingung oder die Budgetrestriktion verletzen. Die Abbildung IV.3 stellt die Veränderung der Wachstumsrate der Ökonomie in Abhängigkeit von θ_R dar. Das stabile Gleichgewicht ist im Schnittpunkt von $\theta_R(\infty)$ und $g(\theta_R)$.

4 Modellaussagen

Die wichtigsten Aussagen des Modells mit und ohne endogenem technischen Fortschritt werden nun kurz präsentiert.

Aussagen des Modells mit exogenem technischen Fortschritt

Die Entwicklung von Ressourcen (R), Arbeit (L) und den Technologievariablen (Q_R und Q_L) ist exogen gegeben. Damit das Modell die stilisierten Fakten nicht verletzt, müssen die folgenden drei Annahmen getroffen werden:

- 1) $\hat{Q}_L > 0$
- 2) $g_{R/L} > 0$
- 3) $g_{R/L} + \hat{Q}^B > 0$ (und bei $t > T$ gleich Null)

Aufgrund dieser Annahmen wächst der Pro-Kopf-Energieverbrauch und der relative effektive Energieverbrauch. Der relative effektive Kostenanteil der Energie fällt bis auf Null bei unendlichem Zeithorizont, oder einen konstanten Wert in T . Deshalb ist das Langzeit-Pro-Kopf-Einkommenswachstum nur von dem Wachstum der Qualität des Arbeitsvorproduktes (Q_L) abhängig, vergleiche Gleichung IV.3.15.

Die Effekte des Energiesparens (Rückgang von R) auf das Produktionswachstum können in der Gleichung IV.3.13 abgelesen werden. Kurzfristig erfolgt ein Rückgang des Pro-Kopf-Einkommens und der Produktion sowie eine Erhöhung der Energiepreise und des Energiekostenanteils (vgl. Gleichung IV.3.16). Eine Aussage über die Veränderung der Wachstumsrate ist nicht eindeutig, da es sowohl positive als auch negative Effekte auf die Wachstumsrate gibt.²²

In der Langzeitbetrachtung kann jedoch Energiepolitik die Wachstumsrate nicht beeinflussen, da das Wachstum hier nur von der Wachstumsrate der Qualität für die Vorprodukte der Arbeit abhängt.

²²In Gleichung IV.3.15 zur Bestimmung der Wachstumsrate fällt $g_{R/L}$ und θ_R steigt

Aussagen des Modells mit endogenem technischen Fortschritt

Die Gleichgewichtsmenge von F & E erhöht sich, wenn die Forschungsproduktivität (ζ) steigt, die Anzahl der qualifizierten Arbeiter (H) steigt oder die Zinsrate fällt. Das Phasendiagramm in Abbildung IV.2 zeigt, dass der Energiekostenanteil gegen ein konstantes Niveau konvergiert.

Falls ω_L größer ist als ω_R , verlagert die Ökonomie mehr qualifizierte Arbeit in F & E, wenn der Energiekostenanteil fällt. Durch den gefallenen Energiekostenanteil verkleinert sich der Markt für Innovationen in diesem Bereich, so dass die Forschung in den arbeitsverwandten Teil abwandert. Durch die höhere Erfolgswahrscheinlichkeit in diesem Bereich erhöht sich die Grenzertragsrate, wodurch sich die Investitionen erhöhen.²³

Eine einmalige Ressourcenreduktion ohne eine Veränderung der Wachstumsrate des Ressourceneinsatzes erhöht den Energiekostenanteil und reduziert dadurch die Investitionen in F & E auf dem Sattelpfad, obwohl sich der Anteil der Forschung in energieverwandte Qualität erhöht. Die Veränderung der Wachstumsrate der Produktion hängt von vielen Effekten ab. Jedoch bei einem Energiekostenanteil, der weit genug vom Steady-State entfernt ist, kann sich die Wachstumsrate erhöhen (vgl. Abbildung IV.3).

In der Langzeitanalyse hat eine einmalige Ressourcenreduktion ohne Veränderung der Wachstumsrate des Ressourceneinsatzes keine Auswirkungen auf die Steady-State-Wachstumsrate. Eine Reduktion der Wachstumsrate des Ressourceneinsatzes reduziert auch die Steady-State-Wachstumsrate der Produktion. Dieser Effekt kann auch nicht durch den erhöhten Einsatz in F & E ausgeglichen werden.²⁴ Außerdem sinkt die produzierte Steady-State-Menge, wodurch sich das Pro-Kopf-Einkommen reduziert.

²³Aus stilisierten und empirischen Fakten geben sich Anhaltspunkte für die Annahme, dass die Innovationswahrscheinlichkeit (ω_i) im energieverwandten Sektor geringer ist.

²⁴Dies gilt auch im Fall $\omega_L < \omega_R$

V Das neoklassische NetLogo-Modell

Zur Verdeutlichung und einer besseren Analyse der Ergebnisse des Modells von Smulders und de Nooij (2003) wurde dieses in NetLogo²⁵ von mir modelliert. Anhand des Modells kann man den Verlauf der Wachstumsraten, der Kostenanteile und anderer relevanter Größen auf dem Weg zum Steady-State und im Steady-State in Plots ablesen. Aufgrund der Eigenschaften von NetLogo ist es möglich, die externen Parameter und auch die endogenen Variablen im laufenden Simulationsbetrieb zu variieren. Somit kann man die dadurch entstehenden Veränderungen in den endogenen Variablen leicht auswerten und miteinander vergleichen.

1 Modellgleichungen

Da das Modell die numerischen Werte angibt, wurden einige zusätzliche Gleichungen benötigt. Diese Gleichungen entspringen den im Modell verwendeten Gleichungen und berechnen die benötigten Verhältnisse oder expliziten Werte der Variablen.

Die zentralen Gleichungen des NetLogo-Modells mit exogenem technischen Fortschritt beschäftigen sich mit der Aufteilung des Kapitalstocks auf die zwei Vorprodukte.

Um das optimale Verhältnis von x_R und x_L zu bestimmen, werden als erstes die Nachfragepreise der Vorprodukte berechnet. Es gilt:

$$\frac{\partial Y}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} = p_{xi} = \frac{\partial Y}{\partial x_i}; \quad \text{mit } x_i = \sum x_{ik} \text{ und } Q_i = \frac{1}{N} \sum q_{ik},$$

deshalb ist der Nachfragepreis gleich:

$$p_{xi} = (1 - \beta)A \left[R^{\beta \frac{\sigma-1}{\sigma}} Q_R^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} x_R^{(1-\beta) \frac{\sigma-1}{\sigma}} + L^{\beta \frac{\sigma-1}{\sigma}} Q_L^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} x_L^{(1-\beta) \frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}-1} * \\ * S_i^{\beta \frac{\sigma-1}{\sigma}} Q_i^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} x_i^{(1-\beta) \frac{\sigma-1}{\sigma}-1}$$

Der Monopolpreis der Vorprodukte ist (vgl. Gleichung IV.3.8)

$$p_{xi} = \frac{Q_i}{1 - \beta}.$$

²⁵Eine auf Java basierende agentenorientierte Programmiersprache

Durch das Gleichsetzen der beiden Preise und Bilden des Verhältnisses von p_{x_R} zu p_{x_L} erhält man

$$x_L = x_R \left[\left(\frac{R}{L} \right)^{\frac{\beta(\sigma-1)}{\beta-\beta\sigma-1}} \left(\frac{Q_R}{Q_L} \right)^{\frac{-1}{\beta-\beta\sigma-1}} \right]. \quad (\text{V.1.1})$$

Da das gesamte verfügbare Kapital zur Produktion verwendet wird und die Kosten der Produktion eines Vorproduktes der Qualität Q_i genau Q_i sind²⁶, ergibt sich die Kapitalgleichung

$$K = Q_R x_R + Q_L x_L \quad (\text{V.1.2})$$

mit K als Kapital. Durch Einsetzen von Gleichung V.1.2 in V.1.1 erhält man für die optimalen Vorproduktmengen

$$x_L = \frac{K \left[\left(\frac{R}{L} \right)^{\frac{\beta(\sigma-1)}{\beta-\beta\sigma-1}} \left(\frac{Q_R}{Q_L} \right)^{\frac{-1}{\beta-\beta\sigma-1}} \right]}{Q_R + Q_L \left[\left(\frac{R}{L} \right)^{\frac{\beta(\sigma-1)}{\beta-\beta\sigma-1}} \left(\frac{Q_R}{Q_L} \right)^{\frac{-1}{\beta-\beta\sigma-1}} \right]} \quad (\text{V.1.3})$$

$$x_R = \frac{K}{Q_R + Q_L \left[\left(\frac{R}{L} \right)^{\frac{\beta(\sigma-1)}{\beta-\beta\sigma-1}} \left(\frac{Q_R}{Q_L} \right)^{\frac{-1}{\beta-\beta\sigma-1}} \right]}. \quad (\text{V.1.4})$$

Somit sind alle für das Modell benötigten Größen berechnet.

2 Modellaufbau

Das Programm besteht aus drei Unterprogrammen. Das erste berechnet den optimalen Kapitalstock der exogen gegebenen Größen. Das zweite ist die Hauptroutine, die die eigentliche Simulation durchführt, und das dritte dient zum Export der endogenen Variablen.

Der optimale Start-Kapitalstock muß berechnet werden, da sich die Ökonomie sonst nicht auf dem Sattelpfad befindet, wodurch sich die Wachstumsraten kurzfristig verzerren würden. Zur Berechnung des optimalen Kapitalstocks dient eine Endlosschleife, die mit den Startwerten und der Produktionsfunktion den Kapitalstock solange optimiert, bis die Differenz des Kapitalstocks der letzten Periode und der aktuellen Periode Null ist.

²⁶Laut Definition in Smulders und de Nooij (2003)

In NetLogo werden die Funktionen wie in Java nach einer vorher in der Hauptfunktion festgelegten Reihe durchgeführt. Diese Hauptfunktion kann in NetLogo ein, bzw. mehrmals oder endlos oft, d.h. bis zum manuellen Abbruch, wiederholt werden. In der Hauptroutine werden nacheinander folgende Funktionen ausgeführt:

- Berechnung von x_L
- Berechnung von x_R
- Berechnung von Y
- Berechnung von θ_R
- Berechnung der Wachstumsrate von Y
- Berechnung des neuen Kapitalstocks
- Veränderung der endogenen Größen durch die exogen gegebenen Wachstumsraten
- Grafische Ausgabe aller benötigten Werte

Durch eine Wiederholung der Hauptroutine schreitet die Ökonomie in diskreten Abständen einen Zeitindex voran. Somit kann das Wachstum der Ökonomie, durch die entsprechende Vorgabe der exogenen Wachstumsraten, in sehr kleine Zeitperioden unterteilt werden.²⁷

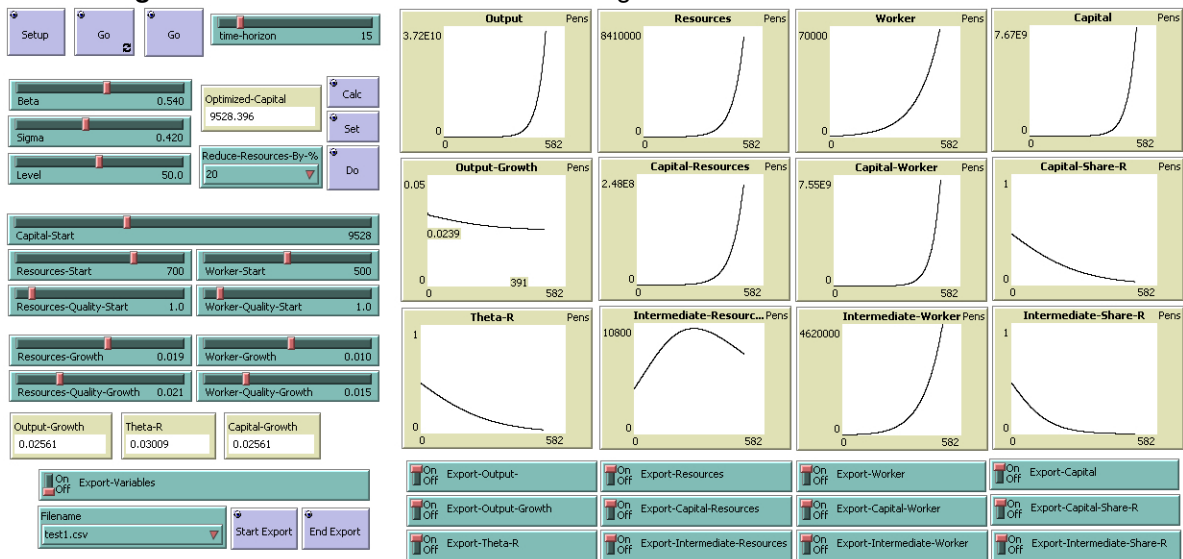
3 GUI des Modells

Die Abbildung V.1 zeigt die GUI²⁸ des einfachen neoklassischen NetLogo-Modells. Die GUI ist dreigeteilt. Auf der linken oberen Seite befinden sich die Schieberegler und die Druckknöpfe. Rechts oben sind die Kurvenschreiber. Der untere Teil dient zum Exportieren der Variablen in eine Excel-Datei.

²⁷Dies ermöglicht z.B. die Ermittlung der jährlichen oder auch wöchentlichen Wachstumsraten der Ökonomie.

²⁸Graphical User Interface; Benutzeroberfläche

Abbildung V.1: Das einfache neoklassische NetLogo-Modell



Über den Druckknopf *Setup*, links oben im Eck, wird die Simulation auf Anfang gestellt und auf den Start der Simulation vorbereitet. Der 1. Druckknopf mit der Aufschrift *Go*, rechts daneben, startet die Simulation und sie läuft bis zum erneuten Drücken. Der 2. Druckknopf *Go* lässt die Simulation genau die Anzahl an Durchläufen laufen, die im Schieberegler *Time – Horizon* daneben eingestellt sind.

Durch die Schieberegler *Beta*, *Sigma* und *Level* lassen sich die Produktionselastizität, die Substitutionelastizität und der Regulierungsparameter der Produktionsfunktion einstellen, und auch während der Simulation verändern. Der Überwachungsbildschirm *Optimized – Capital* daneben zeigt das Ergebnis der Berechnung des optimalen Kapitalstocks für den Start der Simulation an. Dieser wird über die daneben liegenden Druckknöpfe *Calc* berechnet und über *Set* eingestellt. Im Auswahlmeneü *Reduce – Recorces – By – %* darunter kann man auswählen, um wieviel Prozent der Ressourcenbestand durch das Betätigen des Druckknopfes *Do* gesenkt werden soll.

Die Schieberegler *Capital–Start*, *Resources–Start*, *Worker–Start*, *Resources–Quality–Start* und *Worker–Quality–Start* stellen die Ausgangswerte der Simulation für den Kapital-, Ressourcen- und Arbeiterbestand, sowie die Startwerte der Qualität der ressourcen- und arbeitsverwandten Vorprodukte ein. Eine Veränderung dieser Schieberegler während der Simulation hat keine Auswirkungen auf diese.

Über die Schieberegler *Resources – Growth*, *Worker – Growth*, *Resources – Quality – Growth* und *Worker – Quality – Growth* stellt man die Wachstumsraten des Ressourcen- und Arbeiterbestandes und der Qualität der ressourcen- und arbeiterverwandten Vorprodukte ein. Sie können auch während der Simulation variiert werden.

Die Überwachungsbildschirme *Output – Growth*, *Theta – R* und *Capital – Growth* zeigen die aktuellen Werte des Produktionswachstums, des Kapitalkostenanteils θ_R und der Kapitalwachstumsrate an.

Im Kurvenschreiber im rechten oberen Bereich der GUI können die Größen der endogenen Variablen abgelesen werden, mit denen die Kurvenschreiber beschriftet sind.

Der Schalter *Export – Variables* im unteren Bereich steuert, ob während der Simulation die endogenen Variablen, bei Aktivierung der Export-Funktion, in die Excel-Datei geschrieben werden sollen. In der Stellung *on* werden in jeder Periode die Variablen aufgezeichnet. Die Perioden, in denen sich der Schalter in der Stellung *off* befindet, werden übersprungen. Die Datei, in die exportiert wird, kann im darunterliegenden Auswahlmü *Filename* gewählt werden. Die Druckknöpfe *StartExport* und *EndExport* starten und beenden nach Abschluss der Simulation den Export der Variablen. Über die danebenliegenden Schalter können die Variablen, die exportiert werden sollen, eingestellt werden.

Zum Starten der Simulation müssen als erstes die exogenen Variablen und die Startwerte der Simulation eingestellt werden. Anschließend kann über die Druckknöpfe *Calc* und *Set* der optimale Kapitalstock ermittelt und eingestellt werden. Über das Betätigen des Druckknopfes *Setup* wird die Simulation nun auf den Start vorbereitet. Falls ein Datenexport gewünscht wird, muss nun der Druckknopf *StartExport* gedrückt werden. Durch das Betätigen eines der beiden Druckknöpfe *Go* wird die Simulation nun gestartet. Sollte die Datenexport-Funktion ausgewählt worden sein, muss nach dem Beenden der Simulation noch der Druckknopf *EndExport* betätigt werden, um diese abzuschließen.

4 Modellergebnisse

Die kurzfristigen Ergebnisse des Modells hängen von den exogen vorgegebenen Wachstumsraten ab. Zur genaueren Analyse werden nun die drei Gruppen unterschieden:

$$1) \hat{R} + \hat{Q}_R = \hat{L} + \hat{Q}_L$$

$$2) \hat{R} + \hat{Q}_R < \hat{L} + \hat{Q}_L$$

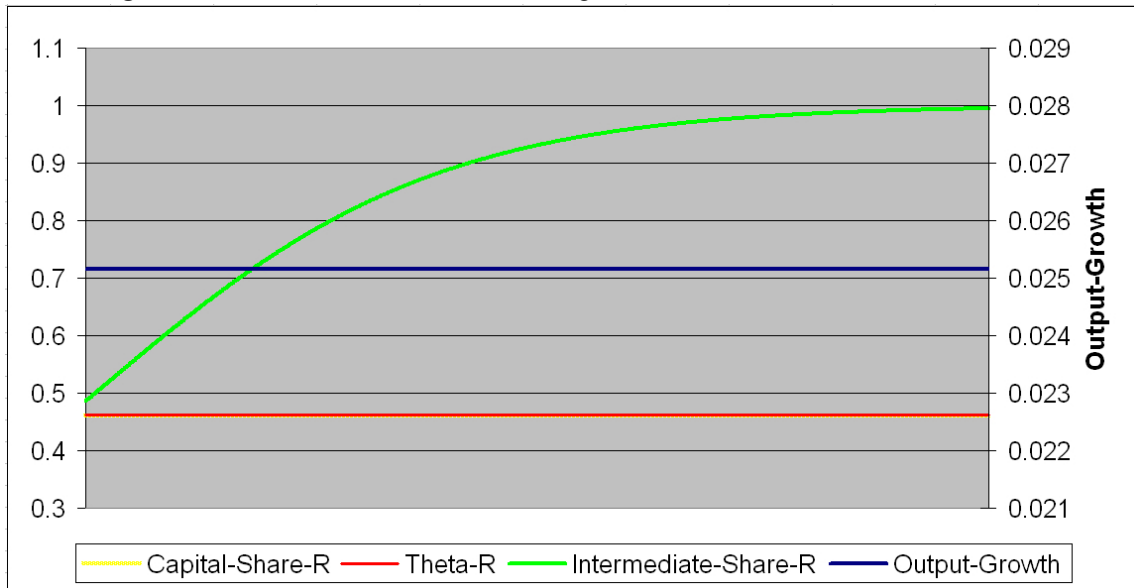
$$3) \hat{R} + \hat{Q}_R > \hat{L} + \hat{Q}_L$$

Das Kapital wird immer nach den Kapitalkostenanteilen aufgeteilt (Vgl. Abbildung V.2). Der Kapitalkostenanteil der ressourcenverwandte Vorprodukte gibt den relativen Größenanteil des Marktes für ressourcenverwandten Vorprodukte in Bezug auf den Gesamtmarkt für Vorprodukte wieder. Somit wird bei einem Wert von 0,5 gleich viel Kapital in beide Vorprodukte investiert. Bei einem Wert von 1 würde das gesamte Kapital in ressourcenverwandte Vorprodukte investiert werden. Die Verteilung der ressourcenverwandten Vorprodukte gibt das relative Verhältnis der Anzahl der gehandelten ressourcenverwandten Vorprodukte in Bezug auf die Anzahl der gesamt gehandelten Vorprodukte wieder. Bei einer Verteilung von 0 würden nur arbeitsverwandte Vorprodukte gehandelt werden. Strebt die Verteilung gegen 0, so können jedoch die wenigen gehandelten ressourcenverwandten Vorprodukte eine so hohe Qualität besitzen, dass sie produktiver sind als die arbeitsverwandten Vorprodukte.

Der erste Fall ($\hat{R} + \hat{Q}_R = \hat{L} + \hat{Q}_L$) ist in Abbildung V.2 dargestellt.

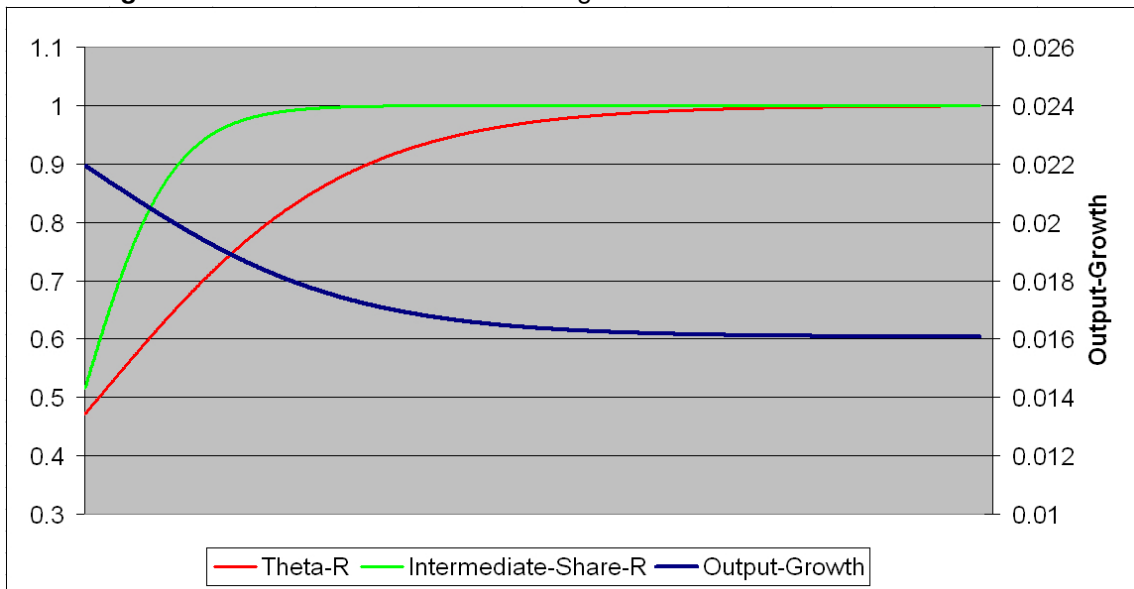
Hier ist der Kapitalkostenanteil θ_R konstant. Das Produktionswachstum startet im Steady-State-Niveau und ist ebenfalls konstant. Die Aufteilung der Vorprodukte gleicht die Unterschiede in den Wachstumsraten der Qualität der Vorprodukte aus.²⁹ Die Aufteilung ist konstant, wenn die Qualität der Vorprodukte die selben Wachstumsraten aufweisen ($\hat{Q}_R = \hat{Q}_L$). Sie strebt gegen 1, dies bedeutet nur ressourcenverwandte Vorprodukte, wenn die Wachstumsrate der Qualität der ressourcenverwandten Vorprodukte kleiner ist als die Wachstumsrate der Qualität der arbeitsverwandten Vorprodukte ($\hat{Q}_R < \hat{Q}_L$). Sie strebt gegen

²⁹Dies erkennt man aus den Gleichungen IV.2.4 und IV.2.5 in Verbindung mit $\hat{Y}_R = \hat{Y}_L$, dass im Optimum gilt.

Abbildung V.2: Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Fall 1

0, wenn die Wachstumsrate der Qualität der ressourcenverwandten Vorprodukte größer ist als die Wachstumsrate der Qualität der arbeitsverwandten Vorprodukte ($\hat{Q}_R > \hat{Q}_L$).

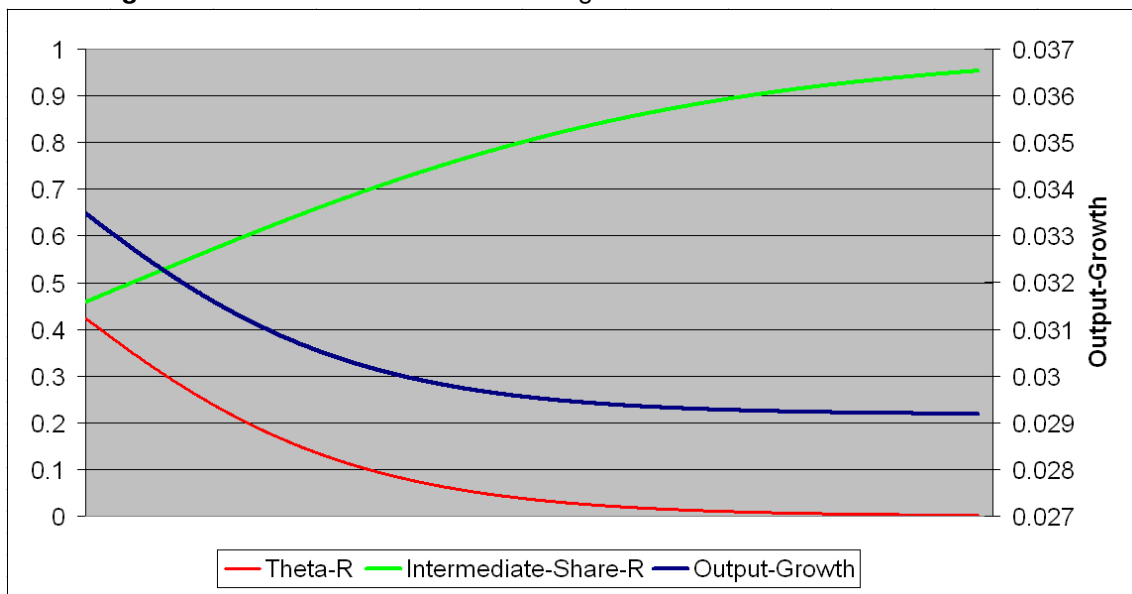
Der zweite Fall ($\hat{R} + \hat{Q}_R < \hat{L} + \hat{Q}_L$) ist in Abbildung V.3 dargestellt.

Abbildung V.3: Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Fall 2

Hier strebt jedoch θ_R gegen den Wert 1. Das Produktionswachstum fällt, bis θ_R den Wert 1 erreicht hat und bleibt dann auf dem erreichten Steady-State-Niveau konstant. Wie im Fall 1 gleicht auch hier die Vorproduktverteilung die Unterschiede in den Wachstumsraten der Qualitäten der Vorprodukte aus. Die Verteilung ist jedoch, aufgrund der geringeren Ressourcenwachstumsrate, bei einer höheren Qualitätswachstumsrate der ressourcenverwandten Vorprodukte als der der arbeitsverwandten Vorprodukte, konstant ($\hat{Q}_R > \hat{Q}_L$). Steigt die Qualitätswachstumsrate der ressourcenverwandten Vorprodukte über diesen Wert, so strebt die Verteilung gegen 0 (nur arbeitsverwandte Vorprodukte). Ist die Qualitätswachstumsrate der ressourcenverwandten Vorprodukte unter diesem Wert, so strebt die Verteilung gegen 1.

Der dritte Fall ($\hat{R} + \hat{Q}_R > \hat{L} + \hat{Q}_L$) ist in Abbildung V.4 dargestellt.

Abbildung V.4: Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Fall 3



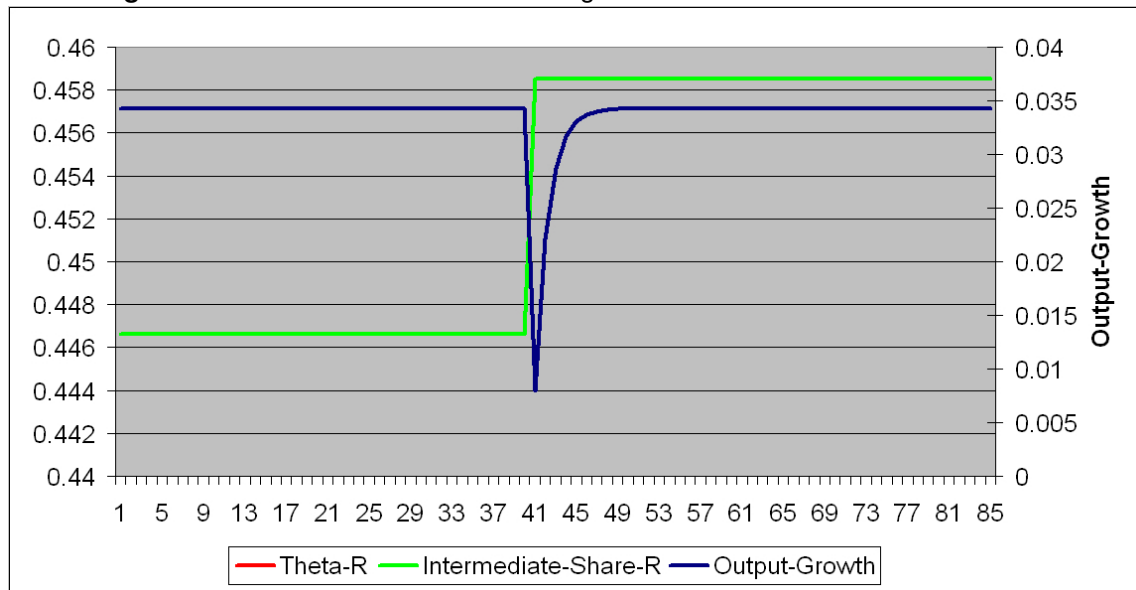
In diesem Fall strebt θ_R gegen 0 und die Produktionswachstumsrate fällt ebenfalls, bis θ_R diesen Wert erreicht hat. Anschließend bleibt sie auf dem erreichten Steady-State-Niveau konstant. Die unterschiedlichen Wachstumsraten der Qualität der Vorprodukte werden hier ebenfalls über die Vorproduktverteilung ausgeglichen. Die Verteilung ist jedoch, aufgrund der höheren Ressourcenwachstumsrate, bei einer geringeren Qualitätswachstumsrate der ressourcenverwandten Vorprodukte als der arbeitsverwandten Vorprodukte, konstant ($\hat{Q}_R < \hat{Q}_L$).

Steigt die Qualitätswachstumsrate der ressourcenverwandten Vorprodukte über diesen Wert, so strebt die Verteilung gegen 0 (nur arbeitsverwandte Vorprodukte). Ist die Qualitätswachstumsrate der ressourcenverwandten Vorprodukte unter diesem Wert, so strebt die Verteilung gegen 1.

Durch diese drei Gruppen kann nun das Verhalten des Modells ohne Eingriff beschrieben werden. Das Verhalten des Modells, aufgrund eines Eingriffs, ist in allen drei Fällen immer gleich. Jedoch können die in den drei Fällen beschriebenen Konvergenzen die durch den Eingriff resultierenden Veränderungen aufheben. Um dies zu umgehen, wird zur weiteren Analyse der Fall 1 mit einer konstanten Vorproduktverteilung herangezogen. Aufgrund der Auswahl der Wachstumsraten ($\hat{R} = \hat{L}$ und $\hat{Q}_R = \hat{Q}_L$) fallen die Kostenanteile mit der Vorproduktverteilung zusammen.

In Abbildung V.5 sind die Auswirkungen einer einmaligen Reduktion Ressourcenreduktion dargestellt.

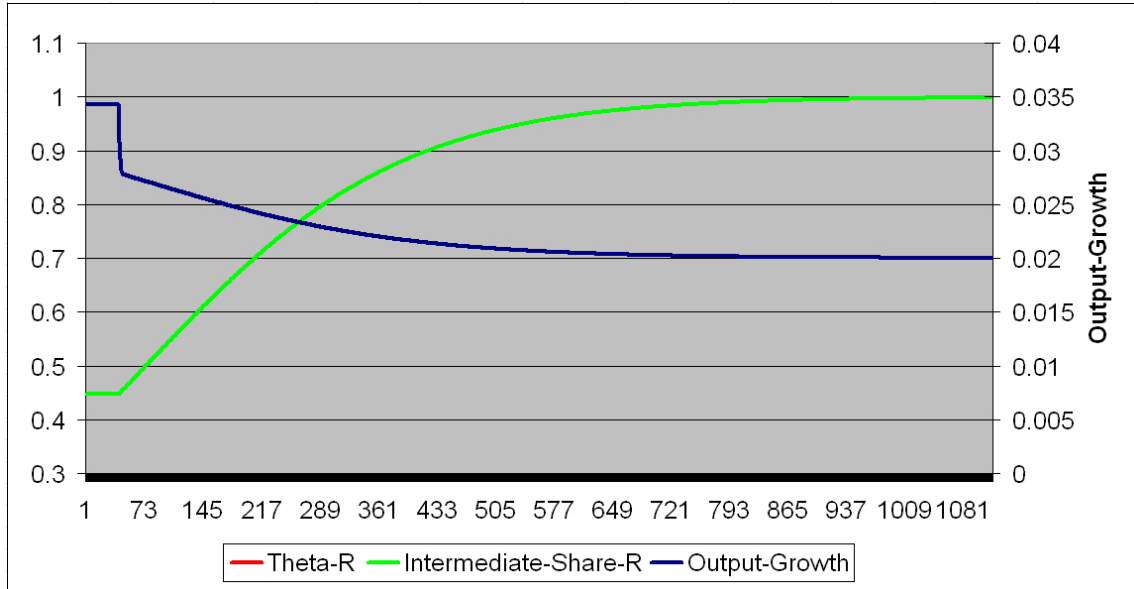
Abbildung V.5: Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Ressourcenreduktion



Wie man anhand der Abbildung V.5 erkennt, senkt eine einmalige Reduktion der Ressourceneinsatzmenge die Wachstumsrate nur kurzfristig. Zur Herstellung des neuen Gleichgewichts mit der alten Wachstumsrate steigt der Kostenanteil der ressourcenverwandten Vorprodukte und deren relative Anzahl.

Die Auswirkungen einer Reduktion der Ressourcenwachstumsrate sind in Abbildung V.6 dargestellt.

Abbildung V.6: Einfaches neoklassisches NetLogo-Modell Ressourcenwachstumsreduktion



Eine Reduktion der Wachstumsrate der Ressourcen hat größere Auswirkungen auf das Modell (vgl. Abbildung V.6). Durch die Reduktion der Wachstumsrate der Ressourcen sinkt die Wachstumsrate der Produktion permanent.³⁰ Außerdem verändert sich das Verhältnis der Wachstumsraten. Hier unterscheiden sich die weiteren Auswirkungen der drei oben angesprochenen Fälle nun.

- Der Fall 1 geht in den Fall 2 über, wodurch sich die Produktionswachstumsrate bis auf das neue Steady-State-Niveau verringert. Zusätzlich verändern sich die Kapitalkostenanteile und die Vorproduktverteilung wie im Fall 2 geschildert.
- Falls vor der Reduktion des Ressourcenwachstums bereits der Fall 2 vorlag, erhöht sich die Geschwindigkeit der Konvergenz zum neuen niedrigeren Steady-State-Niveau.

³⁰In der Grafik durch das senkrechte sofortige Abfallen der Produktionswachstumsrate zu erkennen.

- Befand sich das System vor der Reduktion des Ressourcenwachstums im Fall 3, so kann dies eine der folgenden drei Auswirkungen haben:
 - 1) Es liegt weiterhin der Fall 3 vor, jedoch die Konvergenz zum Steady-State-Niveau verlangsamt sich. (Dies entspricht trotz dem einmaligen starken Rückgang der Produktionswachstumsrate dem alten Niveau)
 - 2) Es liegt nun der Fall 1 vor. Das Produktionswachstum verharrt nun auf dem erreichten Steady-State-Niveau. Dies ist das gleiche Niveau wie vor der Senkung der Ressourcenwachstumsrate. Des weiteren verharrt nun die Kapitalkostenanteile auf dem erreichten Niveau und die Verteilung der Vorprodukte verhält sich wie im Fall 1 beschrieben.
 - 3) Es liegt nun Fall 2 vor und das Produktionswachstum sinkt vom alten Steady-State-Niveau auf das niedrigere neue Steady-State-Niveau. Die weiteren Auswirkungen sind wie im Fall 2 beschrieben.

Es ist zu beachten, dass nur der Fall 3 derzeit den stilisierten Fakten entspricht.

Das Absinken der Produktionswachstumsrate kann man unter anderem verhindern, indem man die Wachstumsrate der Qualität der ressourcenverwandten Vorprodukte im gleichen Maße erhöht.

VI Das neoklassische, erweiterte NetLogo-Modell

Zur Verdeutlichung und zur besseren Analyse der Ergebnisse wurde auch das Modell von Smulders und de Nooij (2003) mit endogenem technischen Fortschritt von mir in NetLogo modelliert. Auch in diesem Programm kann man die im vorigen Kapitel angesprochenen Eigenschaften von NetLogo nutzen.

1 Modellgleichungen

Außer den im vorigen Kapitel hergeleiteten Gleichungen benötigt man für die Version mit endogenem technischen Fortschritt noch die Gleichungen zur Berechnung der Aufteilung der qualifizierten Arbeiter auf die zwei Forschungssektoren und die Produktion des Konsumgutes C_H .

Zur Berechnung der in der Forschung eingesetzten qualifizierten Arbeiter (Investitionen) benötigt man die Gleichung IV.3.31

$$\hat{D} = \frac{H - D}{D} \{ \rho + \zeta D - \zeta [\omega_L - (\omega_L - \omega_R)\theta_R](H - D) \}$$

Diese Gleichung hängt außer von D und deren Wachstumsrate nur von exogenen Variablen ab. Der optimale Wert von D ist erreicht, wenn deren Wachstumsrate ohne eine Veränderung der exogenen Variablen gleich den Wert Null erreicht. Durch das gleich Null setzen der Gleichung IV.3.31 erhält man

$$\rho + \zeta D - \zeta [\omega_L - (\omega_L - \omega_R)\theta_R](H - D) = 0.$$

Durch Umformen und Auflösen nach D erhält man

$$\begin{aligned} \zeta D + \zeta [\omega_L - (\omega_L - \omega_R)\theta_R]D &= \zeta [\omega_L - (\omega_L - \omega_R)\theta_R]H - \rho \\ D &= \frac{\zeta [\omega_L - (\omega_L - \omega_R)\theta_R]H - \rho}{\zeta \{1 + [\omega_L - (\omega_L - \omega_R)\theta_R]\}}. \end{aligned} \quad (\text{VI.1.1})$$

Damit hängt D nur noch von exogenen, bzw. für die Periode gegebenen Variablen ab und kann selbst als gegeben betrachtet werden. Die Menge der in der Produktion eingesetzten qualifizierten Arbeiter, wodurch die Menge des Konsumgutes C_H ermittelt werden kann, ergibt sich nun aus der Gleichung IV.3.28

$$C_H = H - D.$$

Für die Berechnung der Aufteilung der qualifizierten Arbeiter auf die zwei Sektoren benötigt man die folgenden Zusammenhänge:

$$\begin{aligned} D &= D_L + D_R \\ Q^B &= \frac{Q_R}{Q_L} \Leftrightarrow \hat{Q}^B = \hat{Q}_R - \hat{Q}_L \\ \hat{Q}_i &= \xi_i D_i. \end{aligned}$$

Durch Einsetzen von w_D aus Gleichung IV.3.29

$$w_D = \left(\frac{\alpha[1 - (1 - \beta)^2]}{1 - \alpha} \right) \frac{Y}{H - D}$$

in Gleichung IV.3.19

$$\hat{Q}^B = \beta(1 - \beta) \frac{Y}{w_D} [\omega_R \xi_R \theta_R - \omega_L \xi_L \theta_L]$$

und Substitution von \hat{Q}^B und $\theta_L = 1 - \theta_R$ erhält man

$$\xi_R D_R - \xi_L D_L = \beta(1 - \beta) \left(\frac{\alpha[1 - (1 - \beta)^2]}{1 - \alpha} \right) [\omega_R \xi_R \theta_R - \omega_L \xi_L (1 - \theta_R)] (H - D).$$

Durch die Substitution von D_L erhält man

$$\begin{aligned} (\xi_R + \xi_L) D_R - \xi_L D &= \\ &= \beta(1 - \beta) \left(\frac{\alpha[1 - (1 - \beta)^2]}{1 - \alpha} \right) [\omega_R \xi_R \theta_R - \omega_L \xi_L (1 - \theta_R)] (H - D) \\ D_R &= \frac{\beta(1 - \beta) \left(\frac{\alpha[1 - (1 - \beta)^2]}{1 - \alpha} \right) [\omega_R \xi_R \theta_R - \omega_L \xi_L (1 - \theta_R)] (H - D) + \xi_L D}{\xi_R + \xi_L} \end{aligned} \quad (\text{VI.1.2})$$

und durch die Substitution von D_R erhält man

$$\begin{aligned} \xi_R D - (\xi_L + \xi_R) D_L &= \\ &= \beta(1 - \beta) \left(\frac{\alpha[1 - (1 - \beta)^2]}{1 - \alpha} \right) [\omega_R \xi_R \theta_R - \omega_L \xi_L (1 - \theta_R)] (H - D) \\ D_L &= \frac{\xi_R D - \beta(1 - \beta) \left(\frac{\alpha[1 - (1 - \beta)^2]}{1 - \alpha} \right) [\omega_R \xi_R \theta_R - \omega_L \xi_L (1 - \theta_R)] (H - D)}{\xi_R + \xi_L}. \end{aligned} \quad (\text{VI.1.3})$$

Somit ist die Aufteilung der qualifizierten Arbeiter gelöst und alle für das NetLogo-Modell benötigten Gleichungen vorhanden.

2 Modellaufbau

Der konzeptionelle Grundaufbau des Modells ist der gleiche wie im Modell mit exogenem technischen Fortschritt, jedoch unterscheiden sich die Prozeduren. So besteht das Programm wieder aus drei Unterprogrammen. Das erste berechnet nach dem in Kapitel V.2 angegebenen Verfahren den optimalen Kapitalstock. Das zweite ist die Hauptroutine, die die eigentliche Simulation durchführt, und das dritte dient zum Export der endogenen Variablen.

In der Hauptroutine werden nacheinander die folgenden Funktionen ausgeführt.

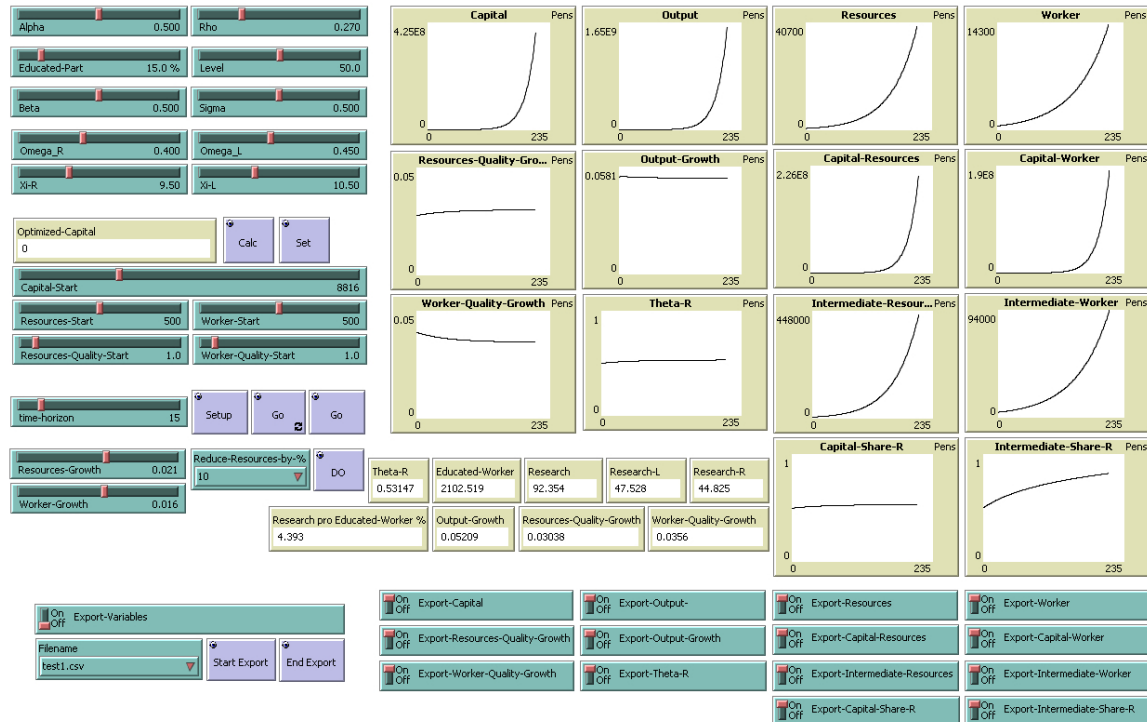
- Berechnung von θ_R
- Berechnung von D
- Berechnung von D_L
- Berechnung von \hat{Q}_L
- Berechnung von D_R
- Berechnung von \hat{Q}_R
- Berechnung von x_L
- Berechnung von x_R
- Berechnung von Y
- Berechnung von \hat{Y}
- Berechnung des neuen Kapitalstocks
- Veränderung der endogenen Größen durch die Wachstumsraten
- Grafische Ausgabe aller benötigten Werte
- Export der benötigten Werte in eine externe Datei
- Fortschreiben der Modellzeit

Das Modell schreitet nun in jeder Zeitperiode genau ein Jahr voran. Aufgrund der Endogenisierung der Wachstumsrate der Qualität der Vorprodukte sind die Wachstumsraten auf das Jahr festgelegt und können nicht wie im vorigen Modell variiert werden. Eine Änderung der Länge der Zeitperioden ist durch eine Abänderung der entsprechenden Routinen im Programm und exogenen Wachstumsraten möglich.

3 GUI des Modells

Die Abbildung VI.1 zeigt die GUI des erweiterten neoklassischen NetLogo-Modells.

Abbildung VI.1: Das erweiterte neoklassische NetLogo-Modell



Auch sie weist die aus dem einfachen Modell bekannte Dreiteilung auf. Auf der linken oberen Seite befinden sich die Schieberegler, um die exogenen Variablen einzustellen und die Druckknöpfe zum Starten der Prozeduren. Auf der rechten oberen Seite sind die Kurvenschreiber und Anzeigetafeln, um den Verlauf und die exakten Werte der wichtigsten endogenen Variablen festzuhalten. Im unteren Bereich befinden sich die Einstellungen für den automatischen Export der Ergebnisse in eine Excel-Datei.

Zusätzlich zu den bereits bekannten Schieberegler sind noch die Schieberegler *Alpha* und *Rho* hinzugekommen. Diese dienen dem Einstellen des Kostenausgabenanteils der Haushalte für die Konsumgüter und des Zeitdiskontfaktors der Haushalte. Die Schieberegler *Resources – Quality – Growth* und *Worker – Quality – Growth* fehlen, da diese Variablen nun endogen sind.

Vor dem Start der Simulation müssen die exogenen Variablen eingestellt werden. Diese sind

- Kostenausgabenanteil der Haushalte α
- Diskontfaktor der Haushalte ρ
- Der Anteil der qualifizierten Arbeiter der Bevölkerung *Edukated – Part*
- Der Regulierungsparameter der Produktion *Level*
- Die Produktionselastizität β
- Die Substitutionselastizität σ
- Der Forschungserfolgsparameter des Sektor R ω_R
- Der Forschungserfolgsparameter des Sektor L ω_L
- Die Forschungseffizienz im Sektor R ξ_R
- Die Forschungseffizienz im Sektor L ξ_L

Dadurch müssen die Startwerte von Arbeit, Ressourcen, deren Wachstumsraten und die Start-Qualität der Vorprodukte vorgegeben werden. Mit diesen Werten kann nun über den Druckknopf *Calc* die optimale Menge an Start-Kapital ermittelt und über *Set* eingestellt werden.

Über den Druckknopf *Setup* wird die Simulation nun auf die Anfangswerte gesetzt und über die *Go* Druckknöpfe gestartet.

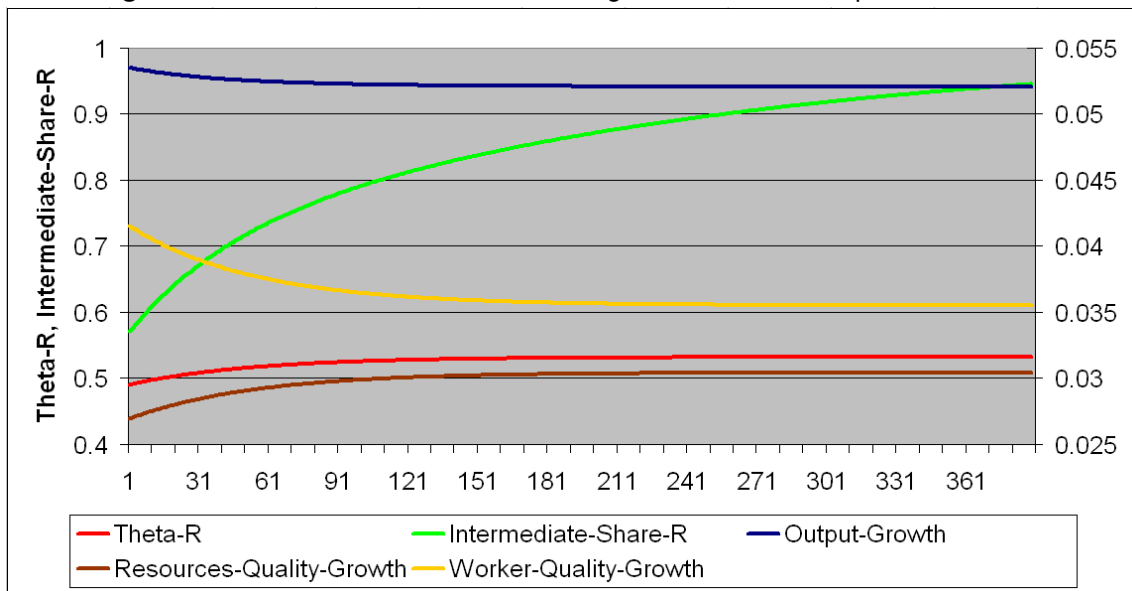
Auch diese Version des Modells von Smulders und de Nooij (2003) kann über die exogenen Variablen und den Druckknopf *Do* während der Simulation beeinflusst werden.

Der Export der Daten kann wieder auf zwei Arten erfolgen. Erstens über einen Rechtsklick auf einen Plot und anschließendes Auswählen von Export. Die zweite Möglichkeit ist die im Modell eingebaute Exportfunktion. Dies erfolgt über das Drücken des Druckknopfes *StartExport* nach dem Betätigen des Druckknopfes *Setup*. Der Export wird wieder durch das Drücken von *EndExport* abgeschlossen.

4 Modellergebnisse

Aufgrund der Endogenisierung der Qualitätswachstumsraten der Vorprodukte benötigt man hier nicht die Fallunterscheidung wie im Modell mit exogenem Wachstum. Nach dem Modellstart mit der optimierten Kapitalmenge befindet sich die simulierte Ökonomie auf dem Sattelpfad hin zum Steady-State. Die Abbildungen VI.2 und VI.3 zeigen die Veränderung der Wachstumsraten der Qualität der Vorprodukte, des Produktionswachstums, des Energiekostenanteils und der Verteilung der Vorprodukte.³¹

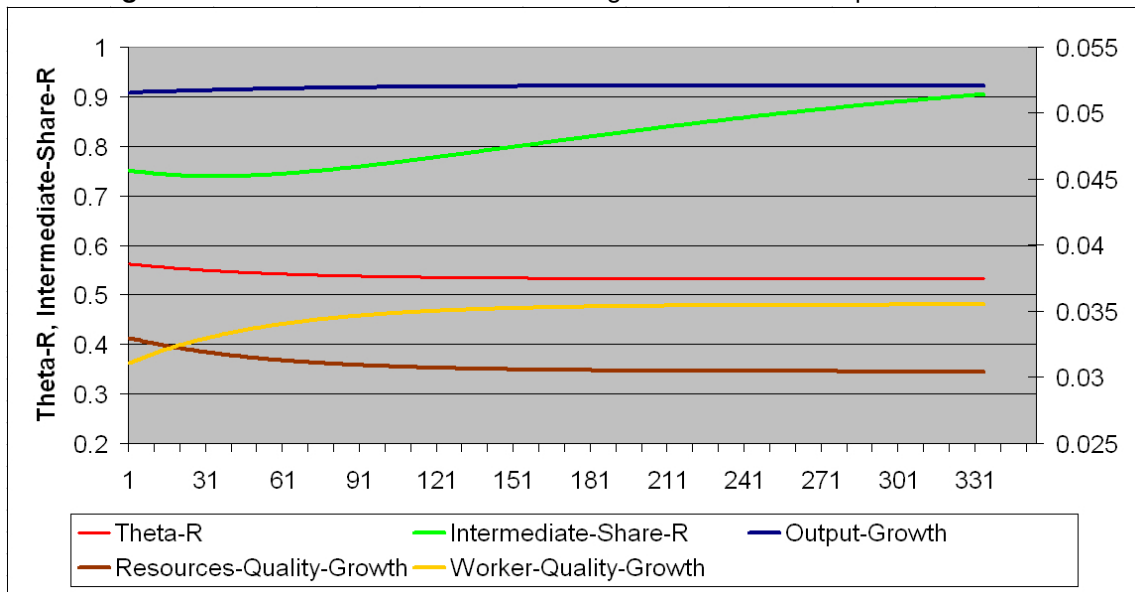
Abbildung VI.2: Erweitertes neoklassisches NetLogo-Modell Wachstumspfad 1



32

³¹Die Steady-State-Werte hängen von den exogenen Variablen ab. Die Anfangswerte sind von den Startwerten der Ökonomie abhängig.

³²Die exogenen Variablen der Abbildungen VI.2 und VI.3 sind gleich groß. Nur die Start-Qualität der arbeitsverwandten Vorprodukte und die daraus resultierende veränderte optimale Kapitalmenge ist in Abbildung VI.3 höher.

Abbildung VI.3: Erweitertes neoklassisches NetLogo-Modell Wachstumspfad 2

Auf dem Sattelpfad gleichen die Wachstumsraten der Qualität der Vorprodukte die Abweichung vom Steady-State Niveau des Verhältnisses von RQ_R zu LQ_L aus. Somit ist bei einer zu geringen Qualität der arbeitsverwandten Vorprodukte deren Wachstumsrate über dem Steady-State-Niveau und die der ressourcenverwandten Vorprodukte unterhalb der des Steady-State-Niveaus und umgekehrt. Auf dem Weg hin zum Steady-State gleichen sich die eben genannten Wachstumsraten ihrem Steady-State-Niveau langsam an, wodurch sich das oben genannte Verhältnis auch langsam dem Steady-State-Niveau nähert.

Der Energiekostenanteil ist im Steady-State-Niveau immer zwischen 0 und 1 und hängt von den exogen gegebenen Variablen ab. Auf dem Sattelpfad nähert er sich langsam diesem Niveau an.

Das Steady-State-Niveau des Produktionswachstums ist durch die exogenen Variablen determiniert. Ob es sich auf dem Sattelpfad langsam von oben oder von unten an dieses Niveau annähert, hängt von den Wachstumsraten der Qualität der Vorprodukte ab. Befindet sich deren Summe unter (über) dem Steady-State-Niveau, so steigt (fällt) das Produktionswachstum auf dem Weg zum Steady-State.

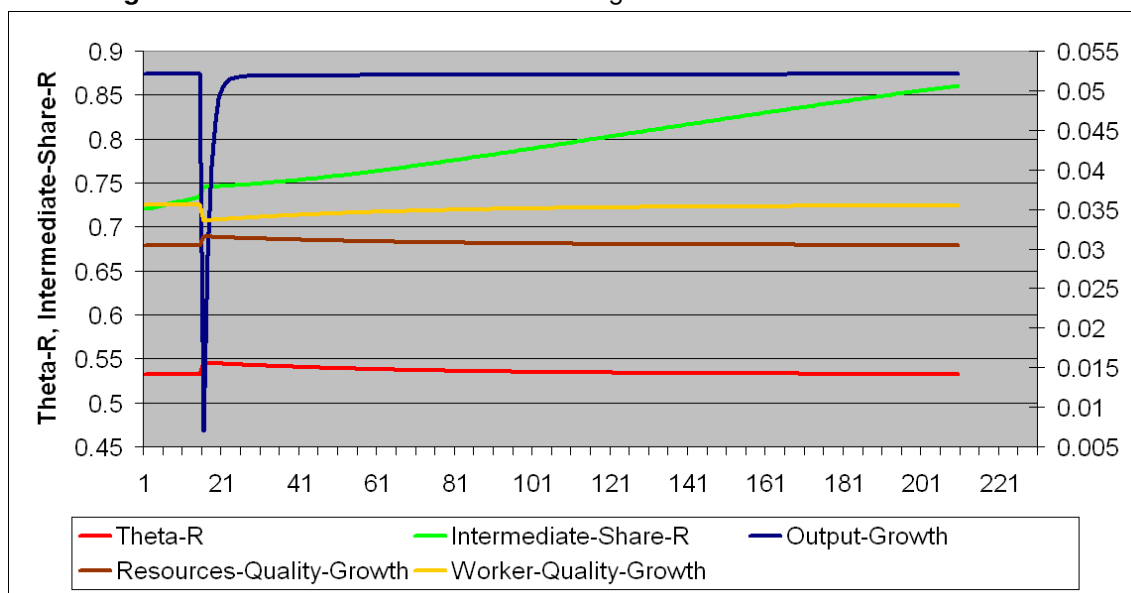
Die Verteilung der Vorprodukte strebt gegen die Werte 0 oder 1. Bei einer Symmetrie der beiden Sektoren ist sie 0,5. Sie gleicht die unterschiedlichen Qualitäts- und Inputfaktormengen aus. Auf dem Sattelpfad kann sich der Trend in der Ver-

teilung der Vorprodukte ändern. Dies geschieht, falls sich die Wachstumsraten der Qualität der Vorprodukte auf diesem schneiden (vgl.: Abbildung VI.3).

Um die Effekte einer einmaligen Ressourcensenkung oder einer Reduktion der Wachstumsrate besser zu analysieren, wurden die Steady-State-Verhältnisse als Startwerte gewählt. Dadurch fallen die Veränderungen der endogenen Wachstumsraten und der Kostenanteile aufgrund des Anpassungsprozesses auf dem Sattelpfad weg. Somit erhält man die direkten Auswirkungen der Eingriffe auf die endogenen Variablen und kann gegebenenfalls auch die unterschiedlichen Steady-States vergleichen.

Die Auswirkungen einer einmaligen Ressourcensenkung sind in Abbildung VI.4 dargestellt.

Abbildung VI.4: Erweitertes neoklassisches NetLogo-Modell Ressourcenreduktion



Man erkennt deutlich, dass sich das Steady-State-Niveau der Variablen nicht verändert. Somit hat dies keine Auswirkungen in der Langzeitsicht auf die Ökonomie. Kurzfristig sind jedoch deutliche Auswirkungen erkennbar.³³ Am deutlichsten sieht man das stark abfallende Produktionswachstum, dass sich nach wenigen Perioden wieder stark dem Steady-State-Niveau angenähert hat.

Die plötzlich auftretende Verknappung von Ressourcen verteuert deren Preis, wodurch sich der Energiekostenanteil erhöht. Durch diese schlagartige Vergrö-

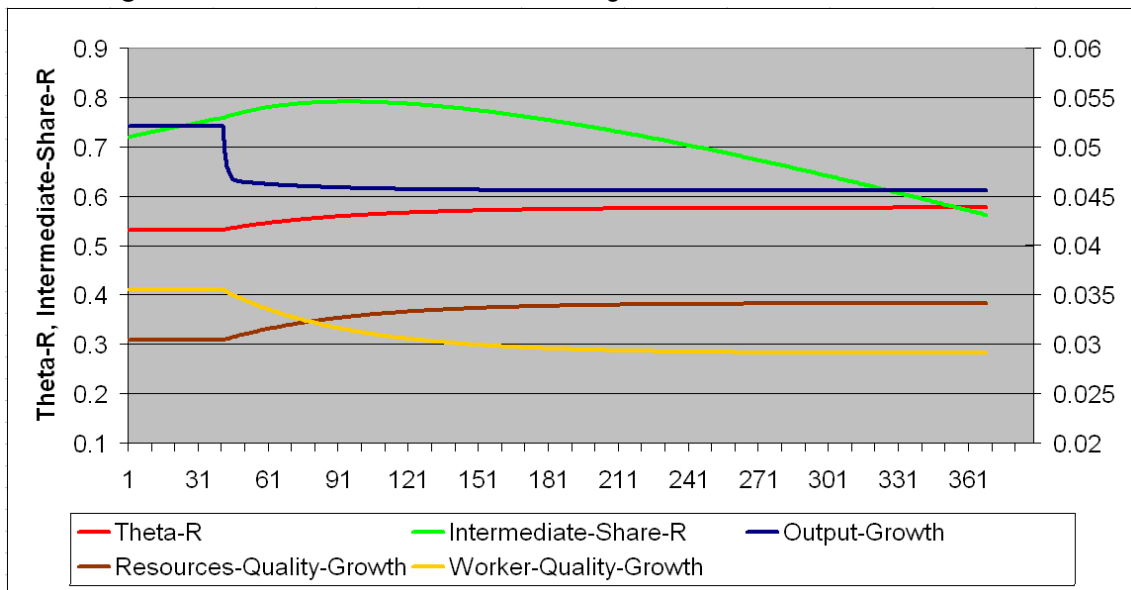
³³Um die Auswirkungen zu verdeutlichen, wurde der Ressourcenbestand um 15% gesenkt.

ßerung (Verkleinerung) des Marktes für ressourcenverwandte (arbeitsverwandte) Vorprodukte werden in diesem mehr (weniger) Vorprodukte produziert. Dies erhöht das Verhältnis der Vorprodukte. Außerdem wird dadurch die Grenzertragsrate der Investitionen in ressourcenverwandte Forschung erhöht. Dies wird durch eine Umverlagerung in den Forschungssektoren von qualifizierter Arbeit hin zur ressourcenverwandten Forschung kompensiert.

Nachdem diese Veränderungen abgeschlossen sind, befindet sich die Ökonomie auf einem neuen Sattelpfad hin zum (alten) Steady-State-Niveau dieser Variablen. In diesem Steady-State ist jedoch das Verhältnis der Inputfaktoren und das Verhältnis der Qualität der Vorprodukte aufgrund der Reduktion von Ressourcen ein anderes.

Die Auswirkungen einer Reduktion der Wachstumsrate der Ressourcen ist in Abbildung VI.5 dargestellt.

Abbildung VI.5: Erweitertes neoklassisches NetLogo-Modell Ressourcenwachstumsreduktion



Das Absenken der Wachstumsrate der Ressourcen hat sowohl Auswirkungen in der Langzeit- als auch in der Kurzzeitbetrachtung.

Dadurch ändert sich das Steady-State-Niveau aller endogenen Variablen und die Produktionswachstumsrate sinkt. Durch die Absenkung der Wachstumsrate der Ressourcen stehen, verglichen mit dem alten Steady-State-Niveau, relativ weniger Ressourcen zur Verfügung. Dadurch erhöht sich der relative Preis der Ressourcen. Dies erhöht den relativen Energiekostenanteil. Durch diese relative

Vergrößerung (Verkleinerung) des Volumen des Marktes für ressourcenverwandte (arbeitsverwandte) Vorprodukte, steigt (sinkt) die relative Grenzertragsrate der Investitionen in ressourcenverwandte (arbeitsverwandte) Forschung. Durch die Veränderten Grenzertragsraten, werden in der Forschung beschäftigte, qualifizierte Arbeiter hin zur ressourcenverwandten Forschung verlagert. Dies erhöht (senkt) die relative Qualitätswachstumsrate der ressourcenverwandten (arbeitsverwandten) Vorprodukte.

Sind die Erfolgsaussichten auf eine erfolgreiche Innovation im ressourcenverwandten Sektor geringer (höher), so senkt (steigert) dies den Einsatz an qualifizierten Arbeitern in der Forschung, wodurch die Wachstumsraten abermals fallen (steigen).

Zu einer Trendänderung der Verteilung der Vorprodukte kommt es, wenn sich die Wachstumsraten der Qualität der Vorprodukte schneiden.

Kurzfristig erfolgt durch das neue Steady-State-Niveau und der damit verbundenen geänderten Planung der Individuen der Ökonomie ein einmaliger Abschlag auf die Produktionswachstumsrate. Die weiteren kurzfristigen Veränderungen ergeben sich aus dem neuen Sattelpfad.

VII Das Modell aus der Thermodynamik

Dieses Modell stammt von Kümmel, Henn, und Lindenberger (2002a) und wurde unter anderem im Arbeitspapier Kümmel und Lindenberger (2002) weiterentwickelt. Das Modell ist aus der Kombination von thermodynamischen Annahmen, insbesondere auf die Rolle der Energie, und den neoklassischen Modellannahmen entstanden.

1 Herleitung der LINEX-Produktionsfunktion

Die Variablen für die Produktion und die Einsatzfaktoren sind hier alle relativ und beziehen sich auf das Basisjahr. Es gilt für:

$$\begin{aligned} \text{die Produktion:} \quad q(t) &= \frac{Q(t)}{Q_0}; & \text{mit } Q(t), \text{ der Produktion der Periode } t \\ \text{das Kapital:} \quad k(t) &= \frac{K(t)}{K_0}; & \text{mit } K(t), \text{ dem Kapital der Periode } t \\ \text{den Arbeitseinsatz:} \quad l(t) &= \frac{L(t)}{L_0}; & \text{mit } L(t), \text{ dem Arbeitseinsatz der Periode } t \\ \text{den Energieeinsatz:} \quad e(t) &= \frac{E(t)}{E_0}; & \text{mit } E(t), \text{ dem Energieeinsatz der Periode } t \end{aligned}$$

Der Index 0 stellt das Basisjahr dar.

Die Produktionsfunktion

$$q = q[k(t), l(t), e(t); t] \quad (\text{VII.1.1})$$

misst die relative Veränderung der aktuellen Produktion im Bezug auf das Basisjahr und ist von Kapital, Arbeit und Energie abhängig.³⁴ Die Einheiten der einzelnen Faktoren entfallen, solange sie über die Zeit konstant bleiben.

Die Wachstumsdynamik wird durch die Funktion

$$\frac{dq}{q} = \alpha \frac{dk}{k} + \beta \frac{dl}{l} + \gamma \frac{de}{e} + \delta \frac{dt}{t} \quad (\text{VII.1.2})$$

beschrieben. Die Terme α , β und γ stellen die Produktionselastizitäten der dazugehörigen Faktoren dar. δ steht für die Veränderung der Produktion durch den

³⁴So bedeutet, $q(20) = 2$, dass in der 20. Periode die Produktion doppelt so hoch (200%) ist wie in der Basisperiode.

menschlichen Erfindungsgeist und die Produktionsstrukturänderungen. Es gilt:

$$\begin{aligned}\alpha(k, l, e) &\equiv \frac{k}{q} \frac{\partial q}{\partial k} \\ \beta(k, l, e) &\equiv \frac{l}{q} \frac{\partial q}{\partial l} \\ \gamma(k, l, e) &\equiv \frac{e}{q} \frac{\partial q}{\partial e} \\ \delta(k, l, e) &\equiv \frac{t}{q} \frac{\partial q}{\partial t}.\end{aligned}\tag{VII.1.3}$$

Im Fall, dass δ gegen Null geht, das heißt der Einfluss des menschlichen Erfindungsgeistes und die dadurch hervorgerufenen Produktionsstrukturänderungen minimal sind, gilt:

$$\gamma = 1 - \alpha - \beta.\tag{VII.1.4}$$

Aus der Bedingung, dass die gemischten Ableitungen 2. Grades von α , β und γ mit Bezug auf die physikalischen Produktionsfaktoren gleich sein müssen, erhält man die drei Differentialgleichungen³⁵

$$\begin{aligned}k \left(\frac{\partial \beta}{\partial k} \right) &= l \left(\frac{\partial \alpha}{\partial l} \right) \\ k \left(\frac{\partial \gamma}{\partial k} \right) &= e \left(\frac{\partial \alpha}{\partial e} \right) \\ l \left(\frac{\partial \gamma}{\partial l} \right) &= e \left(\frac{\partial \beta}{\partial e} \right).\end{aligned}$$

Aufgrund der homogenen Produktionselastizität vom Grade eins (vgl.: Gleichung VII.1.4), kann eine Elastizität eliminiert werden. Für den Fall der Eliminierung von γ gilt für α und β :

$$\begin{aligned}k \left(\frac{\partial \alpha}{\partial k} \right) + l \left(\frac{\partial \alpha}{\partial l} \right) + e \left(\frac{\partial \alpha}{\partial e} \right) &= 0 \\ k \left(\frac{\partial \beta}{\partial k} \right) + l \left(\frac{\partial \beta}{\partial l} \right) + e \left(\frac{\partial \beta}{\partial e} \right) &= 0\end{aligned}$$

³⁵Diese gleichen den Maxwell Beziehungen in der Thermodynamik

Die einfache faktorabhängige Lösung dieser zwei Gleichungen ist:

$$\begin{aligned}\alpha &= a \left(\frac{l+e}{k} \right) \\ \beta &= a \left(c \frac{l}{e} - \frac{l}{k} \right)\end{aligned}\tag{VII.1.5}$$

Für den Fall, dass die menschliche Kreativität berücksichtigt wird, sind a und c zeitabhängig.

Die LINEX-Produktionsfunktion erhält man durch Bildung des Integrals der Gleichung VII.1.2 und Ersetzen von α , β und γ durch die Gleichungen VII.1.5 und VII.1.4:

$$q_{Lt} = q_0 e \exp \left[a(t) \left(2 - \frac{l+e}{k} \right) + a(t)c(t) \left(\frac{l}{e} - 1 \right) \right]\tag{VII.1.6}$$

In der LINEX-Produktionsfunktion gibt der Kapitaleffizienzparameter a das Gewicht an, mit dem die Arbeit/Kapital und Energie/Kapital Kombinationen zur Produktivität des Kapitals beitragen. Der Energienachfrage-Parameter c gibt die Energienachfrage e_A , bei total automatisierter Produktion der Menge q_A unter Ausnutzung des gesamten Kapitalstocks k_A , an ($e_A = c k_A(q_A)$). Die Menge $q - q_A$ wird durch Arbeit gedeckt und erreicht den Wert Null, falls β Null wird.

2 Ermittlung der Produktionselastizitäten

Die Produktionselastizitäten für die gewählten Länder oder Regionen werden anhand von Zeitreihen für die einzelnen Produktionsfaktoren und die produzierte Menge mit Hilfe der Levenberg-Marquadt Methode für nicht-lineare Optimierung bestimmt.³⁶ In der Arbeit von Kümmel, Henn, und Lindenberger (2002a) wurden die Elastizitäten für die USA, Japan und West-Deutschland bestimmt.³⁷ Um den Reaktionen auf die Ölpreiskrisen gerecht zu werden, wurden die Zeitreihen beim Jahreswechsel 1977/78 getrennt.

³⁶Press et al. 1992

³⁷Bei der Bestimmung der Elastizitäten wurden die Zeitreihen von der produzierten Menge (q), vom Kapitaleinsatz (k), vom Arbeitseinsatz (l) und vom Energieverbrauch (e) verwendet. Die Zeitreihen beziehen sich aus der USA auf den Sektor 'industries' im Zeitraum von 1960 bis 1993, aus Japan auf den Sektor 'industries' im Zeitraum von 1965 bis 1992 und aus Deutschland auf den Sektor 'Warenproduzierendes Gewerbe' von 1960 bis 1989.

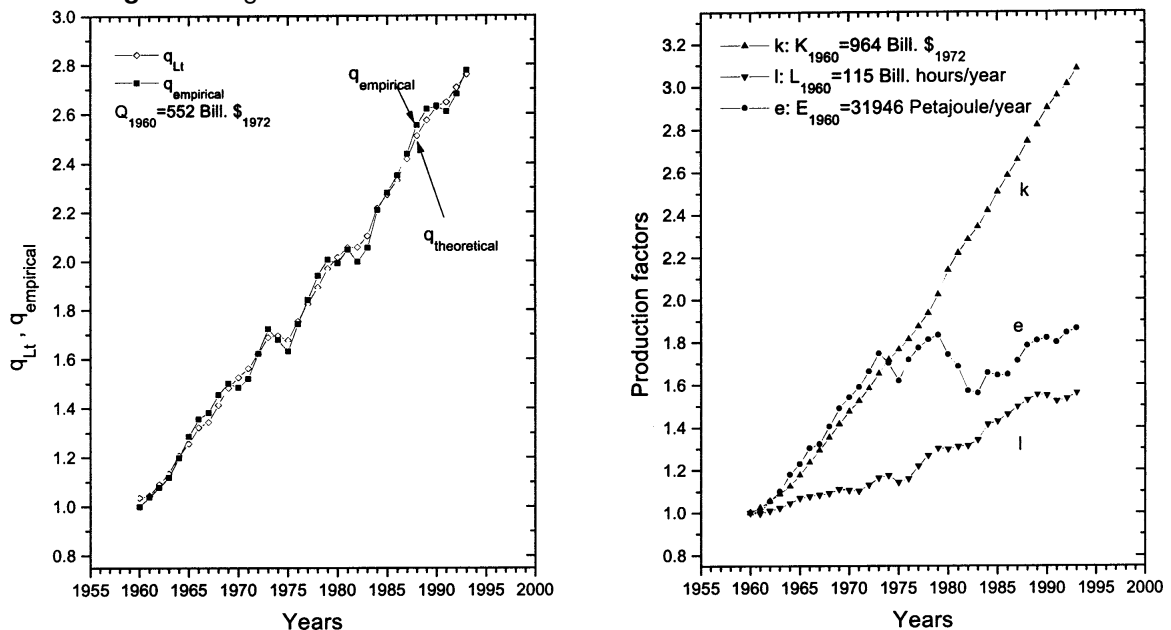
Aus den erhaltenen Produktionselastizitäten sind die Durchschnittswerte:

Tabelle VII.1:
Durchschnittliche Produktionselastizitäten

Land	$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	$\bar{\gamma}$
USA	0.36	0.10	0.54
Japan	0.34	0.21	0.45
West-Deutschland	0.45	0.05	0.50
Standardabweichung ± 0.1			

Die Abbildung VII.1 zeigt links die real produzierte Menge und die über die Gleichung VII.1.6 mit den ermittelten a und c Werten theoretisch produzierte Menge. Die eingesetzten Faktormengen sind rechts dargestellt.

Abbildung VII.1: Ergebnis der LINEX-Produktionsfunktion für die USA



Quelle: Kümmel, Henn, und Lindenberg (2002a, Seite 423)

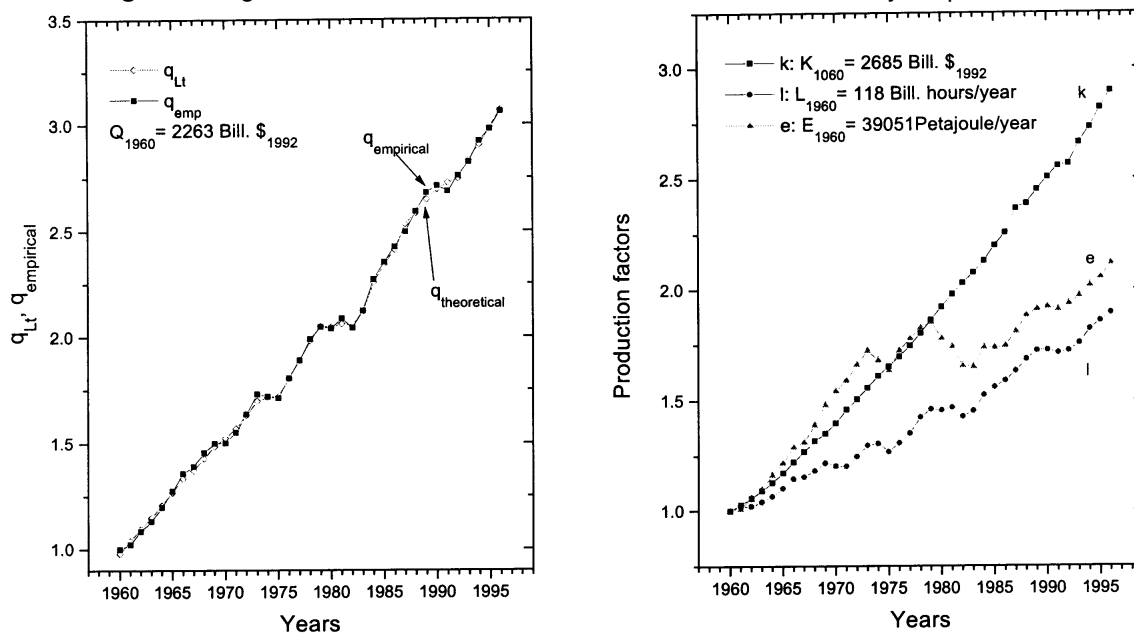
Obwohl hier nur für zwei Zeiträume die Werte von a und c ermittelt wurden, wodurch unterstellt wurde, dass nur im Übergangsjahr die menschliche Kreativität eine signifikante Rolle spielt, sind die Abweichungen nur minimal. Für eine realistischere Ermittlung der theoretischen Werte, wodurch die Standardabweichung

gesenkt wird, ist es nötig die Werte von a und c schrittweise in jeder Periode zu modifizieren. Mit dem '1-year-pulse' Modell gleiten die Parameter a und c sanft vom aktuellen Wert zum Wert der nächsten Periode.³⁸

In diesem Modell sinkt der Parameter für die Energienachfrage $c(t)$ für alle Länder nach der 1. Ölpreiskrise signifikant, während der Parameter $a(t)$ etwas ansteigt. Diese sanfte Veränderung in den kapitalverwandten Technologie-Parametern zeigt den Wechsel zu weniger energieintensiven Produktionsmethoden und den technologischen Strukturwandel zu energieeffizienteren Einsatzverhältnissen von Kapital, Arbeit und Energie auf. Dieser Zusammenhang ist in vielen anderen empirischen Studien ebenfalls nachgewiesen.³⁹

Die Ergebnisse des '1-year-pulse' Modells sind in der Abbildung VII.2 dargestellt.

Abbildung VII.2: Ergebnis der LINEX-Produktionsfunktion für die USA - '1-year-pulse' Modell



In der linken Seite der Abbildung VII.2 ist die bessere Annäherung an den empirischen Wert, vor allem um den 2. Ölpreisschock herum, deutlich zu erkennen.

³⁸vgl.: Kümmel, Henn, und Lindenberger 2002b

³⁹z.B. Watanabe 1999

Die Tabelle VII.2 zeigt die durch das '1-year-pulse' Modell ermittelten durchschnittlichen Produktionselastizitäten, mit der dazugehörigen Standardabweichung in Klammern, das R^2 ⁴⁰ und den Durbin-Watson Koeffizient d_W ⁴¹.

Tabelle VII.2:
Durchschnittliche Produktionselastizitäten - '1-year-pulse' Modell

Land	$\bar{\alpha}_R$	$\bar{\beta}_R$	$\bar{\gamma}_R$	$\bar{\delta}_R$	R^2	d_W
USA	0.36 (\pm 0.01)	0.07 (\pm 0.01)	0.51 (\pm 0.02)	0.06 (\pm 0.03)	0.997	0.95
Japan	0.19 (\pm 0.08)	0.12 (\pm 0.09)	0.61 (\pm 0.15)	0.08 (\pm 0.17)	0.998	1.58
West-Deutschland	0.30 (\pm 0.10)	0.04 (\pm 0.10)	0.64 (\pm 0.15)	0.02 (\pm 0.45)	0.994	1.63

Vergleicht man die Ergebnisse aus den Tabellen VII.1 und VII.2, sieht man, dass sich diese nicht signifikant unterscheiden. Gut erkennbar ist dies beim Vergleich von $\bar{\gamma}$ und $\bar{\gamma}_R$. Dies bestätigt die hohe und in vielen Modellen unterschätzte Produktivität der Energie.

3 Modellergebnisse

Das '1-year-pulse' Modell mit LINEX-Produktionsfunktion stellt eine sehr gute Annäherung der real produzierten Menge dar. Selbst den Produktionsrückgang nach den beiden Ölpreiskrisen und den anschließenden Anstieg der Produktion erfasst dieses Modell sehr gut. Durch das Einbeziehen von Energie in die Produktionsfunktion sinken die Residuen des technischen Fortschritts deutlich gegenüber den klassischen neoklassischen Modellen, die nur Arbeit und Energie einbeziehen. Aus der Analyse der Zeitreihen von Produktion, Kapital, Arbeit und Energie erkennt man, dass in den oben angesprochenen Modellen nur die Produktionselastizität von Kapital überwiegend richtig dargestellt wird und dem realen Faktorgrenzkostenanteil entspricht. Die Produktionselastizität von Arbeit ist deutlich über dem realen Faktorgrenzkostenanteil, was den neoklassischen Annahmen widerspricht. Der reale Faktorgrenzkostenanteil von Energie ist deutlich unter der Produktionselastizität von Energie, weshalb deren Bedeutung unterschätzt wird.⁴² Des weiteren erkennt man, dass mit zunehmender Zeit die Kapi-

⁴⁰Maximaler Erklärungsgrad der Schätzung ist bei einem R^2 von 1

⁴¹Die besten Werte sind 1 und 2

⁴²Dies wird am Produktionsrückgang durch den geringeren Einsatz von Energie nach dem 1. Ölpreisschock sehr deutlich. Gemessen an dem Faktorgrenzkostenanteil der Energie war der

taleffizienz $[a(t)]$ steigt und die Energienachfrage $[c(t)]$ sinkt. Aus diesen Erkenntnissen kann man ableiten, dass solange die Energiekosten unterhalb der Grenzproduktivität liegen, teure Arbeit-Kapital-Kombinationen durch wesentlich billigere Energie-Kapital-Kombinationen substituiert werden, was zu einem weiteren Abbau von Arbeitsplätzen führt.

Das '1-year-pulse' Modell mit LINEX-Produktionsfunktion kann durch die Ermittlungen von unterschiedlichen Produktionselastizitäten für die einzelnen Sektoren, wie z.B. in der Arbeit von Kümmel und Lindenberger (2002) geschehen, noch ergänzt werden. Durch diese und andere Erweiterung können noch zusätzliche Erkenntnisse gewonnen werden.

VIII Das neo-schumpeterianische Modell

Das in diesem und im nächsten Kapitel verwendete Modell ist ein selbst entwickeltes Modell. Dieser Schritt war nötig, da in der aktuellen Fachliteratur im neo-schumpeterianischen Bereich kein vergleichbares Modell aufzufinden ist, das verwendet werden konnte. Für die Entwicklung des Modells wurden unter anderem die Ergebnisse und Modelle von Nelson und Winter (1982), Aghion und Howitt (1998), Cantner und Pyka (1998) und Dosi, Orsenigo, und Sylos Labini (2005) herangezogen. Das Modell konzentriert sich auf die Modellierung von Firmen, die entweder in einem arbeitsverwandten oder in einem ressourcenverwandten Sektor tätig sind. Diese Firmen produzieren ein Vorprodukt und investieren in die Weiterentwicklung aktueller Produkte oder in die Erforschung neuer Produkte. Die Entscheidungsprotokolle der Firmen sind neo-schumpeterianisch.

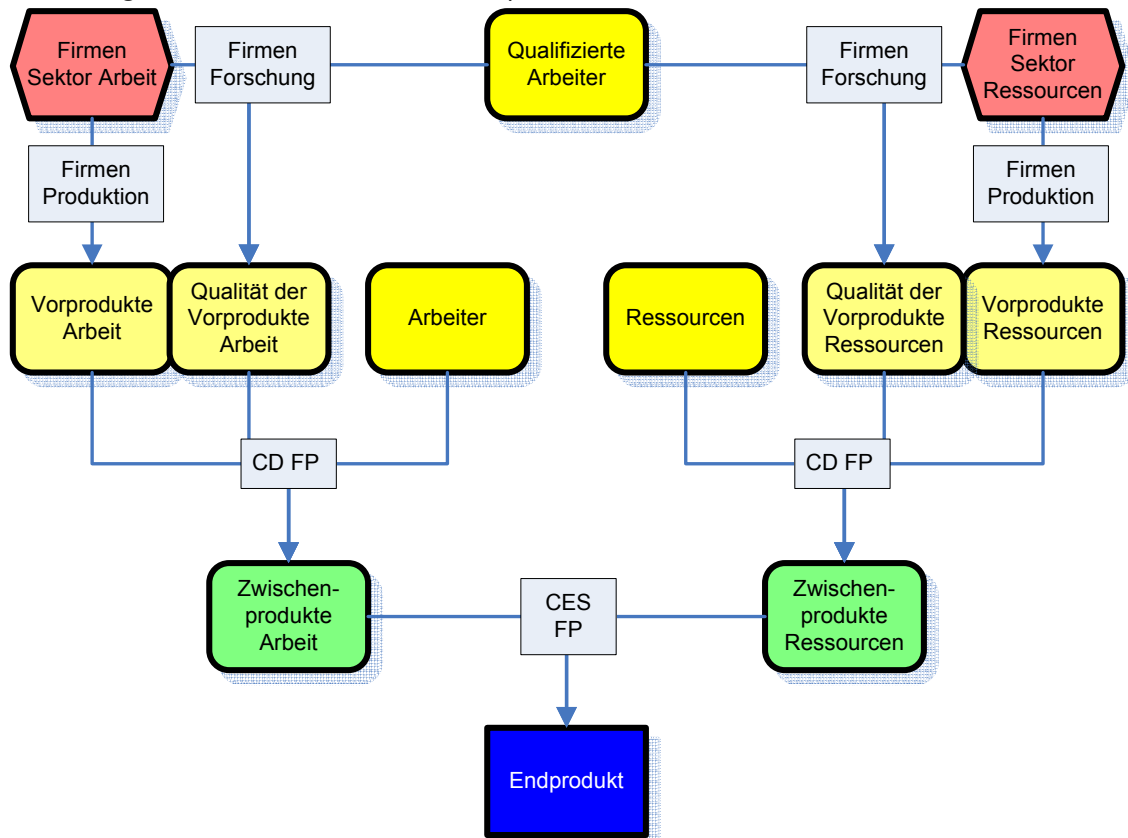
1 Modellvoraussetzungen

In diesem Modell ist das Volumen der Investitionen in Forschung und Entwicklung durch einen exogen gegebenen prozentualen Anteil am Gewinn festgelegt. Des Weiteren sind die durchschnittlichen Startwerte für Kapital, Produktqualität und der Startwert des technischen Fortschritts für die Firmen exogen gegeben. Die Anzahl der Firmen in den einzelnen Sektoren ist sowohl durch die exogen gegebenen Startwerte für Ressourcen, Arbeit und Kapital, als auch durch die exogen gegebenen Wachstumsraten für die Ressourcen und die Bevölkerung festgelegt. Die Parameter für die Erfolgswahrscheinlichkeit und der Grad der Spillovereffekte müssen für die Erforschung und Entwicklung von Prozess- und Produktinnovation exogen festgelegt werden. Für die Erforschung und Entwicklung von Produktinnovationen muss zusätzlich noch ein Parameter für die Innovationsdiffusion angegeben werden. Zur Bestimmung der (nicht auf die neo-schumpeterianische Weise ermittelten) Produktnachfrage werden noch die Produktionselastizitäten der einzelnen Sektoren, die Substitutionselastizität der Zwischenprodukte und ein Regulierungsparameter für das Endprodukt benötigt. Der Parameter für die Geschwindigkeit der Anpassung des Angebots auf einen Nachfrageüberhang, sowie die Routine für den Forschungswechsel ist ebenfalls exogen gegeben.

2 Modellaufbau

Die Abbildung VIII.1 zeigt das vereinfachte Schema des Modellaufbaus.

Abbildung VIII.1: Schema des neo-schumpeterianischen Modells



Jede Firma k im Sektor i kann pro Periode genau ein Vorprodukt x_{ik} für den Sektor i , und nur diesen, der produktiven Qualität $q_{ik}^{\kappa_{ik}}$ produzieren. Die produktive Qualität besteht aus der Qualität q_{ik} und dem technologischen Level $\kappa_{ik} \in (0, 1)$ der Firma. Sie produziert, falls für ihre produktive Qualität eine Nachfrage besteht. Zur Ermittlung der individuellen Nachfrage wird solange das Produkt mit der höchsten produktiven Qualität nachgefragt, bis die Gesamtnachfrage im entsprechenden Sektor gedeckt ist. Die Kosten der Produktion sind $q_{ik}^{\kappa_{ik}}$.

Zur Verbesserung der produktiven Qualität investiert jede Firma einen exogen gegebenen Anteil des möglichen Gewinns bei der aktuellen produktiven Qualität in Forschung und Entwicklung. Jedes Unternehmen kann diesen Betrag entwe-

der in Qualitätsverbesserungen⁴³ oder in die Erforschung und Entwicklung eines neuen technologischen Levels⁴⁴ investieren.

Für die weitere Darstellung werden die folgenden Notationen verwendet:

- n_i ist die Anzahl der Firmen im Sektor i
- n_{ik} ist die Anzahl der Firmen im Sektor i , die den technologischen Level der Firma k im Sektor i aufweisen
- D_{ik} ist die von der Firma k im Sektor i in Forschung und Entwicklung investierte Menge
- $\tilde{D}_{ik} \equiv D_{ik} q_{ik}^{-\kappa_{ik}}$ ist der Einsatz an qualifizierter Arbeit der Firma k im Sektor i ⁴⁵
- \tilde{D}_{ikt} ist der bisherige Einsatz an qualifizierter Arbeit für Produktinnovationen der Firma k im Sektor i auf dem aktuellen technologischen Level⁴⁶
- ξ_{iN} ist die Forschungseffizienz im Sektor i für Prozessinnovationen
- ξ_{iA} ist die Forschungseffizienz im Sektor i für Produktinnovationen
- ω_{iN} ist der Parameter für den Anteil der erfolgreichen Innovationen im Sektor i für Prozessinnovationen
- ω_{iA} ist der Parameter für den Anteil der erfolgreichen Innovationen im Sektor i für Produktinnovationen
- $(1 - \omega_{iN})$ ist der Parameter für den Anteil des Spillovers von Prozessinnovationen aus anderen Unternehmen auf das eigene
- $\tilde{\xi}_i$ ist der Parameter für die Diffusion von Produktinnovationen

Die durchschnittliche Qualität der Firmen im Sektor i mit dem gleichen technologischen Level wie die Firma k ist

$$Q_{ik} \equiv \frac{1}{n_{ik}} \sum_{m=1, \kappa_{im}=\kappa_{ik}}^{n_i} q_{ik}. \quad (\text{VIII.2.1})$$

⁴³Dies entspricht einer Prozessinnovation.

⁴⁴Dies entspricht einer Produktinnovation.

⁴⁵Die Zusatzkosten der Forschung steigen proportional zur produktiven Qualität, vgl.: ?). Dies entspricht unter anderem den teureren Anschaffungskosten von besseren Forschungshilfen.

⁴⁶In der ersten Periode der Forschung ist für \tilde{D}_{ikt} der Wert 1 zu setzen.

Die durchschnittliche produktive Qualität der Firmen im Sektor i ist

$$Q_{ik} \equiv \frac{1}{n_i} \sum_{m=1}^{n_i} q_{ik}^{\kappa_{ik}}. \quad (\text{VIII.2.2})$$

Der durchschnittliche Einsatz an qualifizierter Arbeit der anderen Firmen im Sektor i mit dem selben technologischen Level wie die Firma k ist

$$\tilde{D}_{ikO} \equiv \frac{1}{n_{ik} - 1} \sum_{m=1, \kappa_{im}=\kappa_{ik}, m \neq k}^{n_i} \frac{D_{ik}}{q_{ik}^{\kappa_{ik}}} \quad (\text{VIII.2.3})$$

Die Qualitätsverbesserungen werden durch die Gleichung VIII.2.4 ermittelt.⁴⁷

$$\dot{q}_{ik} = \xi_{iN} Q_{ik} \tilde{D}_{ikO}^{(1-\omega_{iN})} \tilde{D}_{ik}^{\omega_{iN}} \quad (\text{VIII.2.4})$$

Somit hängt die Qualitätsverbesserung vom Forschungseffizienzparameter, dem Einsatz an qualifizierter Arbeit in Forschung und Entwicklung und zwei Spillover-Effekten ab.

Der erste ist ein intertemporaler Wissens-Spillover-Effekt, der durch die bisherige durchschnittliche Qualitätsakkumulation Q_{ik} dargestellt wird. Die Firma nimmt diese Qualität als gegeben an, und vernachlässigt, dass ihre eigene Forschung diese verändert. Dieser Spillover-Effekt bildet die leichtere Wissensgenerierung fortschrittlicherer Ökonomien, bzw. die Erleichterung des Wissensaufbaus bei einem größeren Grundwissen, ab.

Der zweite ist der intrasektorale Wissens-Spillover-Effekt, der den Nutzen aus der Forschung und Innovation von Konkurrenten darstellt. Dieser ist durch den durchschnittlichen Einsatz an qualifizierter Arbeit der Konkurrenz und den Spillover-Parameter $(1 - \omega_{iN})$ dargestellt. Dieser Effekt stellt das Gegenstück zur nicht vollständigen Absorbtionsfähigkeit, bzw. Umsetzung der eigenen Forschung dar.

Da jedoch die produktive Qualität der Vorprodukte einen abnehmenden Grenznutzen der Qualität besitzt, ist irgendwann der Punkt erreicht, an dem das Produkt so ausgereift ist, dass der Gewinnzuwachs aus Prozessinnovationen die Kosten der Forschung und Entwicklung nicht mehr deckt. Ab diesem Punkt ist es nicht mehr rentabel in Prozessinnovationen zu investieren. Würden die Unternehmen nicht die Möglichkeit besitzen, neue Produkte zu innovieren, so würde das Wirtschaftswachstum auf ein Mittel zwischen Ressourcen und Bevölkerungswachstum zurückfallen.

⁴⁷vgl.: unter anderem Aghion und Howitt 1998 und Smulders und de Nooij 2003

Um ein neues Produkt zu innovieren, müssen die Firmen in Produktinnovationen im Bereich Forschung und Entwicklung investieren. Die Erfolgswahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Einführung eines neuen Produktes ist die Poisson-verteilte Wahrscheinlichkeit⁴⁸

$$P_\lambda(X > 0) = 1 - P_\lambda(X = 0) = 1 - e^{-\lambda} \quad (\text{VIII.2.5})$$

$$\text{mit: } \lambda = \xi_{iN} \tilde{D}_{ikt} \tilde{\xi}_i \tilde{D}_{ik}.$$

Der Erfolg einer Produktinnovation hängt daher vom Forschungseffizienzparameter, der Anzahl der eingesetzten qualifizierten Arbeiter und zwei Spillover-Effekten ab.

Der intertemporale Spillover-Effekt ist hier der Wissensgewinn aus der bisherigen Forschung und Entwicklung des neuen Produktes und durch \tilde{D}_{ikt} dargestellt.

Der zweite Spillover-Effekt ist durch $\tilde{\xi}_i$ dargestellt. Dieser Parameter steigt erst, sobald ein anderer Konkurrent den aktuell zu erforschenden technischen Level erreicht hat. Dadurch wird der Innovationsprozess zu einem Diffusionsprozess, der eine deutlich geringere Eigenleistung benötigt.

Nach der erfolgreichen Innovation bzw. Imitation eines Produktes steigt der Technologielevel κ_{ik} um einen exogen gegeben prozentualen Anteil. Da die Firma eine deutlich geringere Erfahrung mit dem neuen Produkt hat und es technisch nicht so ausgereift ist wie das alte Produkt, sinkt die Qualität des Vorproduktes. Die produktive Qualität des Vorproduktes bleibt jedoch konstant. Dadurch steigt die Grenzproduktivität der Qualität und Investitionen in Forschung und Entwicklung für Prozessinnovationen erhöhen wieder den Gewinn.

Die Vorproduktnachfrage wird durch Gewinnmaximierung über die Produktionsfunktion der Zwischenprodukte

$$Y_i = S_i^\beta Q_{i\kappa} \left(\sum_{m=1}^{n_i} X_{im} \right)^{1-\beta} \quad (\text{VIII.2.6})$$

und die Produktionsfunktion des Endproduktes

$$Y = A \left(Y_L^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + Y_R^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}} \quad (\text{VIII.2.7})$$

ermittelt.⁴⁹ Die Details und die Lösung des Modells in NetLogo werden im nächsten Kapitel beschrieben.

⁴⁸vgl.: unter anderem Aghion und Howitt 1998

⁴⁹Diese Funktionen sind vergleichbar mit denen in Kap V.1 und bei Smulders und de Nooij 2003

IX Das neo-schumpeterianische NetLogo-Modell

Das neo-schumpeterianische NetLogo-Modell wurde aus den im vorigen Kapitel beschriebenen Zusammenhängen entwickelt und verwendet die dort und in diesem Kapitel vorgestellten Gleichungen.

1 Modellgleichungen

Die Nachfrage nach den Vorprodukten x_i wird auf die gleiche Weise wie im Kapitel V.1 ermittelt. Jedoch sind hier die Ausgangsgleichungen VIII.2.6 und VIII.2.7 zu berücksichtigen.

Den durchschnittlichen Preis der Nachfrage $p_{x_i}^D$ nach den Vorprodukten x_i erhält man durch:

$$\frac{\partial Y}{\partial Y_i} \frac{\partial Y_i}{\partial x_i} = p_{x_i}^D = \frac{\partial Y}{\partial x_i}; \quad \text{mit } x_i = \sum_{k=1}^{n_i} x_{ik}.$$

Somit gilt für den durchschnittlichen Preis der Nachfrage:

$$p_{x_i}^D = (1 - \beta)A \left[R^{\beta \frac{\sigma-1}{\sigma}} Q_{R\kappa}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} x_R^{(1-\beta)\frac{\sigma-1}{\sigma}} + L^{\beta \frac{\sigma-1}{\sigma}} Q_{L\kappa}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} x_L^{(1-\beta)\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right]^{\frac{\sigma}{\sigma-1}-1} * \\ * S_i^{\beta \frac{\sigma-1}{\sigma}} Q_{i\kappa}^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} x_i^{(1-\beta)\frac{\sigma-1}{\sigma}-1}.$$

Der Monopolpreis der Vorprodukte

$$p_{x_{ik}}^S = \frac{q_{ik}^{\kappa_{ik}}}{1 - \beta}.$$

Deshalb gilt für den durchschnittlichen Angebotspreis der Vorprodukte

$$p_{x_i}^S = \frac{Q_{i\kappa}}{1 - \beta}.$$

Durch das Gleichsetzen des Angebots- und des Nachfragepreises erhält man das Nachfrageverhältnis der Vorprodukte. Es gilt:

$$x_L^D = x_R^D \left[\left(\frac{R}{L} \right)^{\frac{\beta(\sigma-1)}{\beta-\beta\sigma-1}} \left(\frac{Q_{R\kappa}}{Q_{L\kappa}} \right)^{\frac{-1}{\beta-\beta\sigma-1}} \right]. \quad (\text{IX.1.1})$$

Da die durchschnittlichen Kosten der Produktion der Vorprodukte mit der durchschnittlichen produktiven Qualität $Q_{i\kappa}$ gleich $Q_{i\kappa}$ sind, gilt für das in der Produktion eingesetzte Kapital K die Bedingung

$$K = Q_{R\kappa}X_R + Q_{L\kappa}X_L. \quad (\text{IX.1.2})$$

Aus den Gleichungen IX.1.1 und IX.1.2 erhält man nun die nachgefragte Menge der Vorprodukte.⁵⁰ Diese sind

$$x_L^D = \frac{K \left[\left(\frac{R}{L} \right)^{\frac{\beta(\sigma-1)}{\beta-\beta\sigma-1}} \left(\frac{Q_{R\kappa}}{Q_{L\kappa}} \right)^{\frac{-1}{\beta-\beta\sigma-1}} \right]}{Q_{R\kappa} + Q_{L\kappa} \left[\left(\frac{R}{L} \right)^{\frac{\beta(\sigma-1)}{\beta-\beta\sigma-1}} \left(\frac{Q_{R\kappa}}{Q_{L\kappa}} \right)^{\frac{-1}{\beta-\beta\sigma-1}} \right]} \quad \text{und} \quad (\text{IX.1.3})$$

$$x_R^D = \frac{K}{Q_{R\kappa} + Q_{L\kappa} \left[\left(\frac{R}{L} \right)^{\frac{\beta(\sigma-1)}{\beta-\beta\sigma-1}} \left(\frac{Q_{R\kappa}}{Q_{L\kappa}} \right)^{\frac{-1}{\beta-\beta\sigma-1}} \right]}. \quad (\text{IX.1.4})$$

Die angebotene Menge an Vorprodukten x_i^S lässt sich durch Aufsummierung der aktuellen Produktionskapazitäten der Firmen im entsprechenden Sektor ermitteln.

Um ein Angebots-, bzw. Nachfrageüberhang auszugleichen werden die folgenden Routinen benötigt:

- Bei einem Angebotsüberhang erhöht sich bei Firmen, die kein Produkt verkaufen konnten, die entsprechende firmeninterne Variable. Sollte eine Firma X Runden kein Produkt verkaufen oder aufgrund der Investitionen in Forschung und Entwicklung ohne Verkäufe ein negatives Kapital aufweisen, so scheidet sie mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit aus der Ökonomie aus.
- In jeder Periode nach einem Nachfrageüberhang werden Startups⁵¹ gegründet. Diese weisen zusammen genau $X\%$ des Nachfrageüberhangs an Produktionskapazität auf.

⁵⁰Es ist zu beachten, dass in der produktiven Qualität der Vorprodukte nur die Firmen zu berücksichtigen sind, die produzieren. Dies erreicht man durch Iteration bei einem Angebotsüberhang. Bei einem geringen Angebotsüberhang sind die Abweichungen in den nachgefragten Vorproduktmengen jedoch insignifikant klein.

⁵¹Startups sind Firmen, die versuchen, ein besonders erfolgreiches Produkt zu imitieren und neu in den Markt eintreten

2 Modellaufbau

Das neo-schumpeterianische NetLogo-Programm besteht eigentlich aus vier Programmen:

1. Dem Setup-Programm
2. Der eigentlichen Simulation (Hauptroutine)
3. Dem Programm zum Starten der Simulation und der Kurvenschreiber
4. Dem Programm für X Durchläufe der Simulation und dem Exportieren der Variablen

Durch das Setup-Programm wird die Simulation auf Anfang gestellt, die Startwerte geladen, der optimale Kapitalstock für die exogenen Variablen ermittelt und die Startpopulation der Firmen in den Sektoren erzeugt.

Die Erzeugung der Startpopulation und somit des optimalen Kapitalstocks erfolgt durch Iteration der Anzahl der Firmen in den Sektoren bei Beibehaltung der Startwerte der Simulation, bis sich das Produktionswachstum nicht mehr ändert.

Im eigentlichen Simulationsprogramm schreitet die Ökonomie bei jeder Ausführung eine Periode voran. In der Hauptroutine der Simulation werden die folgenden Algorithmen nacheinander aufgerufen:

- Einstellen der exogenen Variablen, die jede Periode geändert werden können
- Bestimmung der Anzahl der Firmen in jedem Sektor
- Bestimmung der durchschnittlichen Qualität und der durchschnittlichen produktiven Qualität der Vorprodukte
- Bestimmung der Vorproduktnachfrage
- Bestimmung des Vorproduktangebotes
- Bestimmung des Nachfrage-/Angebotüberhangs
- Bestimmung der individuellen Angebotpreise
- Aufteilung der Nachfrage auf die Firmen, Berechnung des Firmengewinns und Ermittlung der Firmen, die keine Produkte verkaufen
- Bestimmung der Investitionen in Forschung und Entwicklung

- Bestimmung der aktuellen Forschungsroutine
- Bestimmung des Qualitätswachstums der einzelnen Firmen
- Ermittlung der neuen Innovationen und Änderung der produktiven Qualität der Firmen
- Bestimmung des Firmenaufteilungsverhältnisses auf die Sektoren und der Kostenanteile der Vorprodukte
- Bestimmung der Produktion und des Produktionswachstums
- Gründung der Startups
- Ausscheiden von Firmen aus der Ökonomie
- Berechnung der Variablen der nächsten Periode
- Änderung der visuellen Firmengrößen
- Änderung des Zeitindexes

Das 3. Programm ruft die Hauptroutine auf und aktualisiert anschließend die Kurvenschreiber.

Das 4. Programm lässt die Simulation N mal X Perioden laufen und hält die Ergebnisse der Variablen für alle $N * X$ Perioden in einer Excel-Datei fest. Zusätzlich können, für alle Wiederholungen in einer bestimmten Periode, die Ereignisse der Ressourcenreduktion und/oder der Ressourcenwachstumsratenreduktion ausgewählt werden.

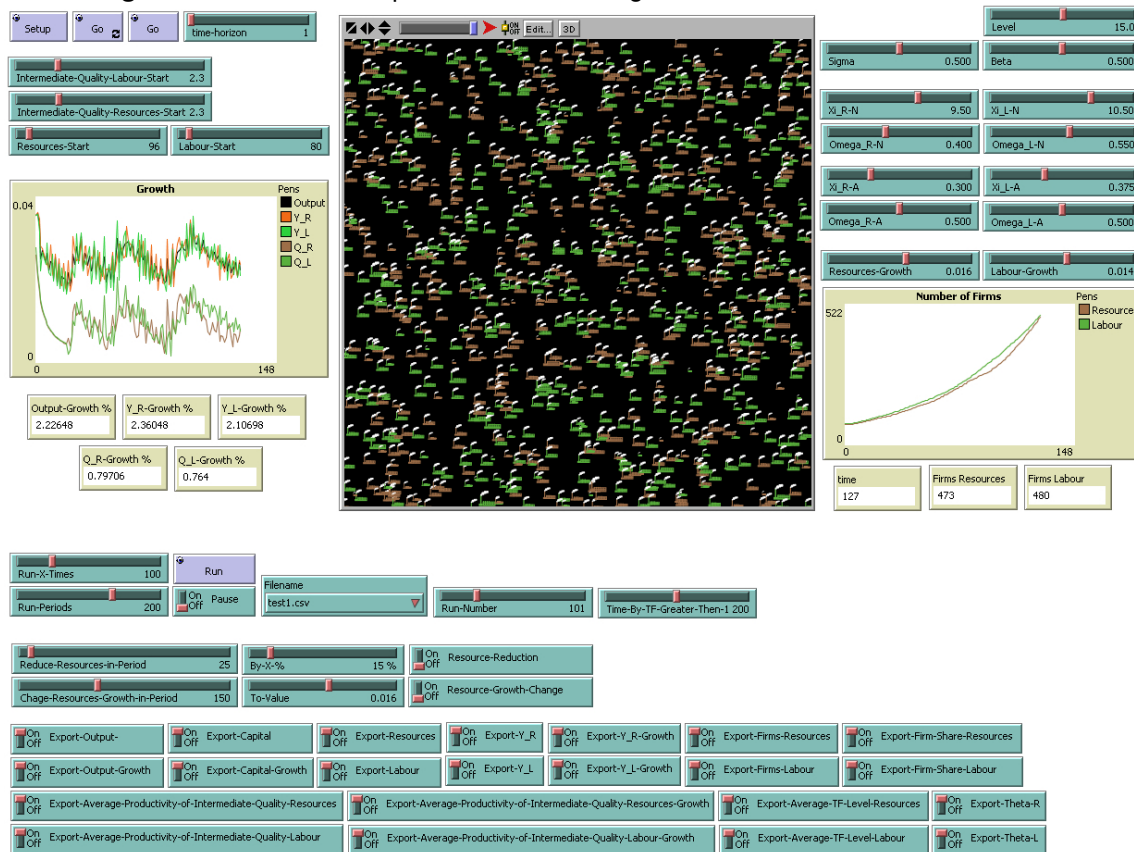
Zur Auswertung der Ergebnisse der Simulation bei N Durchläufen, dient ein Externes Java-Programm⁵². Mit Hilfe dieses Programms lassen sich die Durchschnittswerte, das Maximum und das Minimum der Variablen für alle Perioden ermitteln. Das Programm erzeugt eine Excel-Datei, durch die sich die Ergebnisse einfach darstellen lassen.

⁵²Ebenfalls ein selbsterstelltes Programm

3 GUI des Modells

Die Abbildung IX.1 zeigt die GUI des neo-schumpeterianischen NetLogo-Modells.

Abbildung IX.1: Das neo-schumpeterianische NetLogo-Modell



In der zweigeteilten GUI dient der obere Bereich zum Einstellen der exogenen Variablen, zum Ausführen der Simulation für Einzeldurchläufe und der grafischen Visualisierung. Der untere Bereich ist für Mehrfachdurchläufe und dem Export der Variablen.

Der Druckknopf *Setup*, links oben, bereitet die Simulation auf einen Einzeldurchlauf vor. Durch die Druckknöpfe *Go* wird die Simulation gestartet. Drückt man den 1. der beiden *Go* Druckknöpfe, so läuft die Simulation bis zum erneuten Betätigen des Druckknopfes. Mit dem zweiten schreitet die Simulation die im danebenliegenden Schieberegler *time – horizon* eingestellte Anzahl an Perioden fort.

Über die darunterliegenden Schieberegler *Intermediate – Quality – Labour – Start*, *Intermediate – Quality – Resources – Start*, *Racources – Start* und *Labour – Start*, stellt man die Startwerte für die durchschnittliche Qualität der

arbeits- und ressourcenverwandten Vorprodukte, die Ressourcen und die Arbeitskräfte ein.

Im darunterliegenden Kurvenschreiber werden die Wachstumsraten der aktuellen Simulation von der Produktion, den Zwischenprodukten und Wachstumsraten der Qualität der Vorprodukte festgehalten. Die Anzeigetafeln darunter zeigen jeweils den exakten Wert der aktuellen Perioden an.

Im oberen Bereich mittig ist das Ausgabefenster, in dem die Unternehmen dargestellt werden. Die Größe der Firmen bezieht sich auf ihren technologischen Stand.

Rechts daneben befinden sich die Schieberegler zum Einstellen der exogenen Variablen, die auch in jeder Periode der Simulation variiert werden können. Diese sind:

- *Level*: Für den Regulierungsparameter der Produktionsfunktion
- *Sigma*: Für die Substitutionselastizität der Produktionsfunktion
- *Beta*: Für die Produktionselastizität der CD-Produktionsfunktion der Zwischenprodukte
- $X_{i_R} - N$: Für die Forschungseffizienz für Prozessinnovationen im ressourcenverwandten Sektor
- $X_{i_L} - N$: Für die Forschungseffizienz für Prozessinnovationen im arbeitsverwandten Sektor
- $\Omega_R - N$: Für den Parameter für den Anteil der erfolgreichen Prozessinnovationen im ressourcenverwandten Sektor
- $\Omega_L - N$: Für den Parameter für den Anteil der erfolgreichen Prozessinnovationen im arbeitsverwandten Sektor
- $X_{i_R} - A$: Für die Forschungseffizienz für Produktinnovationen im ressourcenverwandten Sektor
- $X_{i_L} - A$: Für die Forschungseffizienz für Produktinnovationen im arbeitsverwandten Sektor
- $\Omega_R - A$: Für den Parameter für den Anteil der erfolgreichen Produktinnovationen im ressourcenverwandten Sektor

- *Omega_L – A*: Für den Parameter für den Anteil der erfolgreichen Produktinnovationen im arbeitsverwandten Sektor
- *Resources – Growth*: Für die Wachstumsrate der Ressourcen
- *Labour – Growth*: Für das Bevölkerungswachstum

Darunter befindet sich der Kurvenschreiber für die Anzahl der Firmen im jeweiligen Sektor und die Anzeigetafeln für die aktuelle Zeitperiode und die Anzahl der Firmen in den beiden Sektoren.

Im unteren Bereich befinden sich als erstes die Schieberegler *Run – X – Times* und *Run – Periods* zum Einstellen der Anzahl automatischen Durchläufe der kompletten Simulation und der Anzahl der Perioden pro Durchlauf in einer Simulation. Über den Druckknopf *Run* daneben wird der Mehrfachdurchlauf der Simulation mit Export gestartet. Über den Schalter *Pause* wird die Simulation in die Warteschleife geschickt. Das Auswahlmeneü *Filename* dient zum Auswählen der Datei, in die die Variablen exportiert werden. Auf den Schiebereglern *Run – Number* und *Time – TF – Greater – Then – 1*, die nicht verstellt werden sollten, kann die Anzahl der bisherigen Durchläufe und der früheste Zeitpunkt, bei dem die Simulation in einem der Durchläufe ein falsches Ergebnis geliefert hat, abgelesen werden.

Im nächsten Bereich kann in den Schiebereglern *Reduce – Resources – in – Period* und *By – X – %* die Periode und die Prozentzahl der Ressourcenreduktion eingestellt werden. Über den Schalter *Resource – Reduction* wird die Ressourcenreduktion ein- und ausgeschaltet.

Über die Schieberegler *Change – Resources – Growth – in – Period* und *To – Value* kann die Periode und das neue Ressourcenwachstum eingestellt werden. Durch den Schalter *Resources – Growth – Change* wird die Änderung des Ressourcenwachstums ein- und ausgeschaltet.

Durch die Schalter im unteren Bereich werden die Variablen, die exportiert werden, ausgewählt.

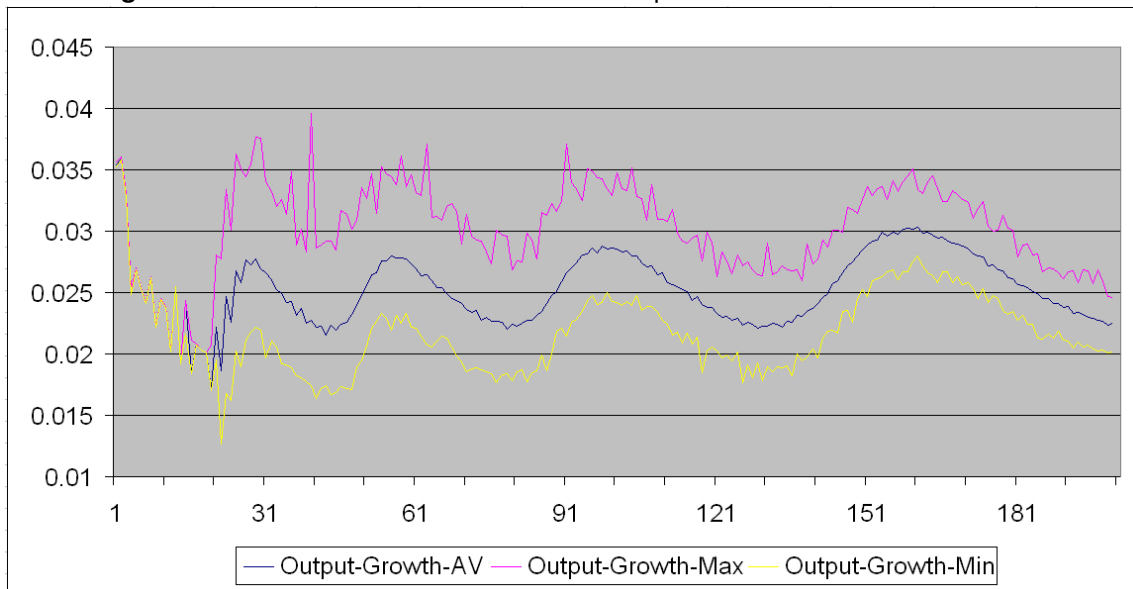
Zum Starten eines Einzeldurchlaufs müssen als erstes die Startwerte und die exogenen Variablen in den Schiebereglern eingestellt werden. Durch anschließendes Betätigen des Druckknopfes *Setup* kann die Simulation über einen der Druckknöpfe *Go* gestartet werden.

Für einen Mehrfachdurchlauf müssen als erstes die Startwerte und die exogenen Variablen eingestellt werden. Anschließend muss die Anzahl der Durchläufe, die Anzahl der Perioden pro Durchlauf, die Zieldatei des Exportes und die zu exportierenden Variablen ausgewählt werden. Nun kann eine oder beide der ressourcenverändernden Prozeduren aktiviert werden. Durch Betätigen des Druckknopfes *Run* wird der Mehrfachdurchlauf mit Export der Variablen gestartet.

4 Modellergebnisse

Da im neo-schumpeterianischen Modell nicht wie in den neoklassischen Modellen allgemein eine Gewinnmaximierung betrieben wird, sondern die heterogenen Akteure nach ihren Routinen handeln und die Produktinnovationserfolgswahrscheinlichkeit poissonverteilt ist, sind die Ergebnisse zeitpfadabhängig. Da sich die Trajektorien voneinander unterscheiden, werden für die Auswertung die Durchschnittswerte aus 100 Durchläufen herangezogen, um den Erwartungswert abzubilden. Zusätzlich muss der maximale und der minimale Wert der Variablen über die verschiedenen Trajektorien beachtet werden, um festzustellen, wie stark diese differieren. In der Abbildung IX.2 sind diese Werte für das Produktionswachstum im Standardmodell⁵³ dargestellt.

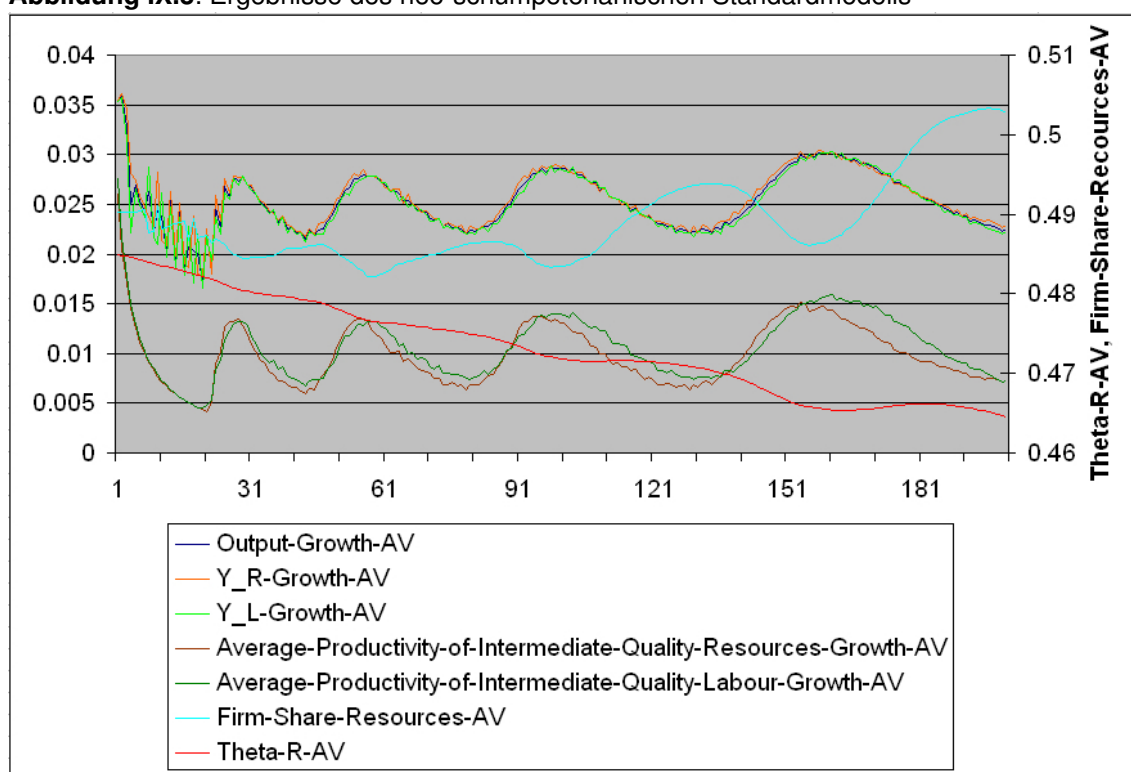
Abbildung IX.2: Produktionswachstum des neo-schumpeterianischen Standardmodells



⁵³Das Standardmodell hat die Parameter: $A = 15$, $\sigma = 0,5$, $\beta = 0,5$, $\xi_{RN} = 9,5$, $\xi_{LN} = 10,5$, $\omega_{RN} = 0,4$, $\omega_{LN} = 0,55$, $\xi_{RA} = 0,3$, $\xi_{LA} = 0,375$, $\omega_{RA} = 0,5$, $\omega_{LA} = 0,5$, $\hat{R} = 0,016$, $\hat{L} = 0,014$

Die ersten 20 Perioden dienen zur Modellstabilisierung und können deswegen nicht ausgewertet werden. Ab der 21. Periode erkennt man in der Abbildung IX.2 die resultierenden Konjunkturzyklen des Erwartungswertes (Durchschnitts). Die minimalen und maximalen Werte des Produktionswachstums sind ebenfalls diesen Zyklen unterworfen. Da das daraus resultierende 95%tige Koinzidenzintervall sehr gleichmäßig und relativ klein ist, wird zur besseren Übersicht in den folgenden Grafiken darauf verzichtet. Die Abbildung IX.3 zeigt die wichtigsten Ergebnisse des neo-schumpeterianischen Standardmodells.

Abbildung IX.3: Ergebnisse des neo-schumpeterianischen Standardmodells



Die durchschnittlichen Wachstumsraten der Zwischenprodukte stimmen aufgrund der neoklassischen Nachfrage nach den Vorprodukten signifikant mit der durchschnittlichen Wachstumsrate des Endproduktes überein und werden deshalb ab sofort in den Grafiken nicht mehr dargestellt.

Anhand der durchschnittlichen Wachstumsraten der durchschnittlichen produktiven Qualität der Vorprodukte erkennt man gut die Produktzyklen. Diese Produktzyklen können in zwei Phasen unterteilt werden.

In der ersten Phase wird ein Produkt von einer Firma innoviert und relativ schnell von vielen anderen nicht so erfolgreichen Firmen imitiert. In dieser Phase steigt

die Wachstumsrate durch Diffusion und das hohe Potenzial der Qualitätsverbesserung des unausgereiften Produktes stark an, bis diese ein Maximum erreichen. In der zweiten Phase, nach dem Maximum, produzieren nahezu alle Firmen das neue Produkt, wodurch die Diffusion abnimmt. Aufgrund der abnehmenden Grenzerträge der produktiven Qualität⁵⁴ sinken die Möglichkeiten der Qualitätsverbesserung der meisten Unternehmen, bis das Minimum erreicht ist. In diesem Minimum können die Investitionen in die Produktqualität den Gewinn nicht mehr steigern und die Firmen beginnen ein neues Produkt zu erforschen, das den nächsten Produktzyklus hervorruft.

Da im Standardmodell die Summe aus der Wachstumsrate der Ressourcen und der Wachstumsrate der produktiven Qualität der ressourcenverwandten Vorprodukte größer ist als die Summe aus der Bevölkerungswachstumsrate und der Wachstumsrate der produktiven Qualität der arbeitsverwandten Vorprodukte, weist der Kapitalkostenanteil der ressourcenverwandten Vorprodukte einen sinkenden Trend auf.⁵⁵ Dies wird aus der Abbildung IX.4 noch deutlicher, da in der 1. Variation des Standardmodells die Differenz dieser Summen noch größer ist. In der 2. Variation des Standardmodells hingegen, dargestellt in Abbildung IX.5, weist der Kapitalkostenanteil der ressourcenverwandten Vorprodukte einen steigenden Trend auf, da hier gilt: $\hat{R} + \hat{Q}_{Rk} < \hat{L} + \hat{Q}_{Lk}$.

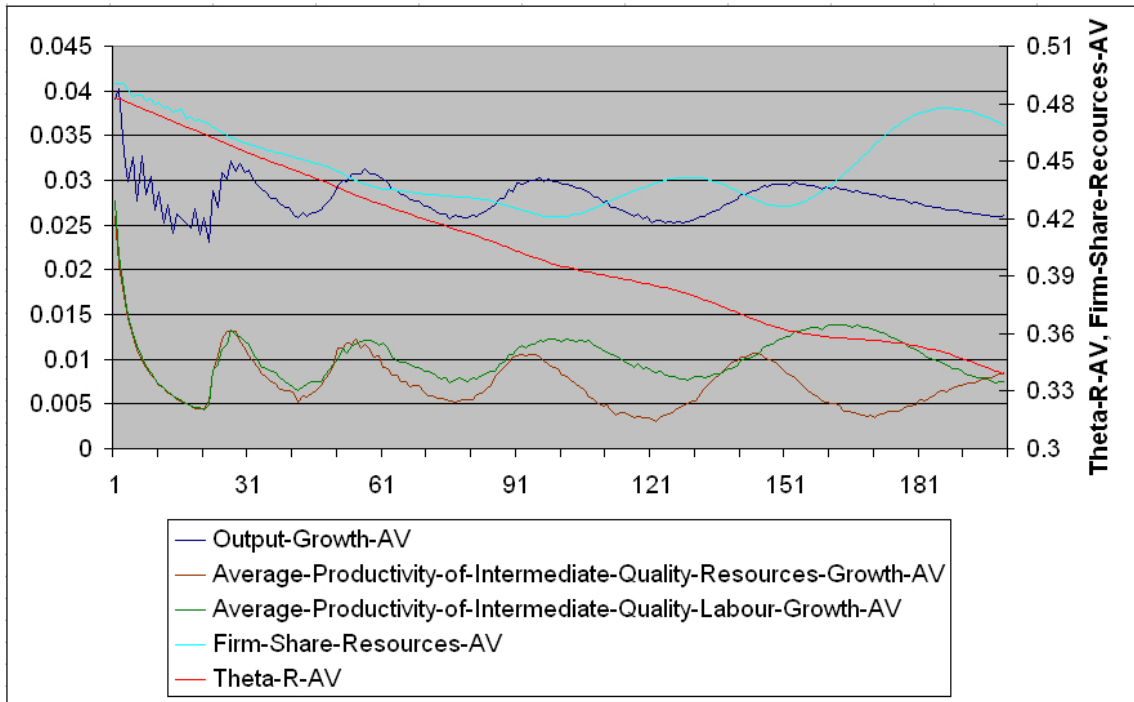
Das Verhältnis der Anzahl der Firmen in den einzelnen Sektoren gleicht die Unterschiede in den Wachstumsratensummen von Ressourcen und der produktiven Qualität des ressourcenverwandten Vorproduktes und von Arbeit und der produktiven Qualität des arbeitsverwandten Vorproduktes aus.

Die Ergebnisse der Variationen des Standardmodells sind in den Abbildungen IX.4 und IX.5 dargestellt.

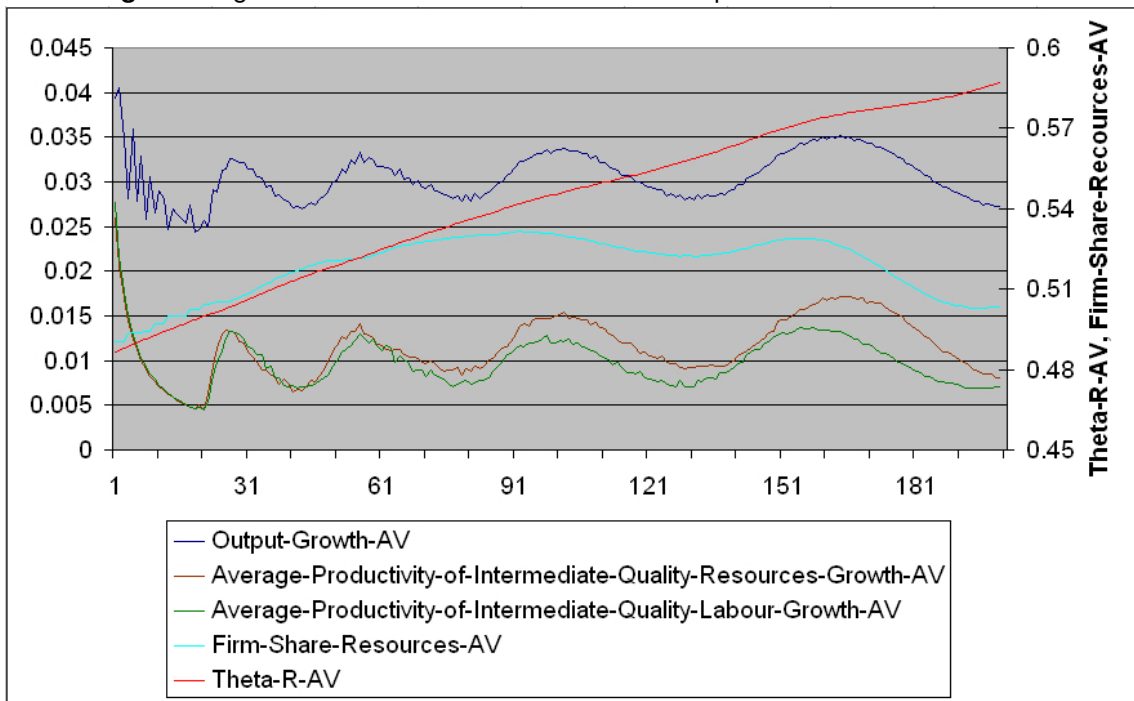
In der 1. Variation des Standardmodells verschieben sich aufgrund der höheren Differenz der Wachstumsraten der Inputfaktoren und der damit verbundenen höheren Differenz der Anzahl an Startups in den Sektoren die Produktzyklen der zwei Sektoren so, dass sie gegen Ende der Grafik fast gegenläufig sind und eine Glättung der Zyklen des Produktionswachstums auftritt.

⁵⁴Dies entspricht den abnehmenden Möglichkeiten der Qualitätsverbesserung bei ausgereiften Produkten.

⁵⁵Dies entspricht: $\hat{R} + \hat{Q}_{Rk} > \hat{L} + \hat{Q}_{Lk} \Rightarrow \theta_R \downarrow$

Abbildung IX.4: Ergebnisse der 1. Variation des neo-schumpeterianischen Standardmodells

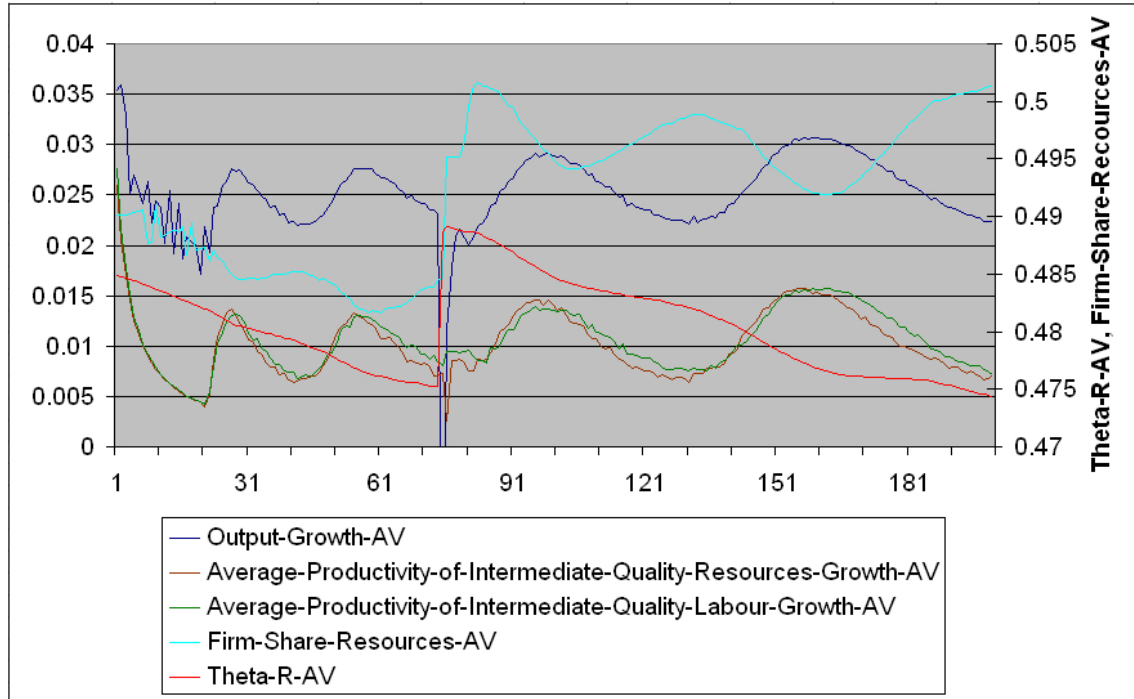
56

Abbildung IX.5: Ergebnisse der 2. Variation des neo-schumpeterianischen Standardmodells

⁵⁶In der 1. Variation ist die Wachstumsrate der Ressourcen, und in der 2. Variation ist die Bevölkerungswachstumsrate um 0,01 höher als im Standardmodell

Die Auswirkungen einer einmaligen Reduktion der Ressourcen um 15% in der 75. Periode auf das Standardmodell sind in der Abbildung IX.6 dargestellt.

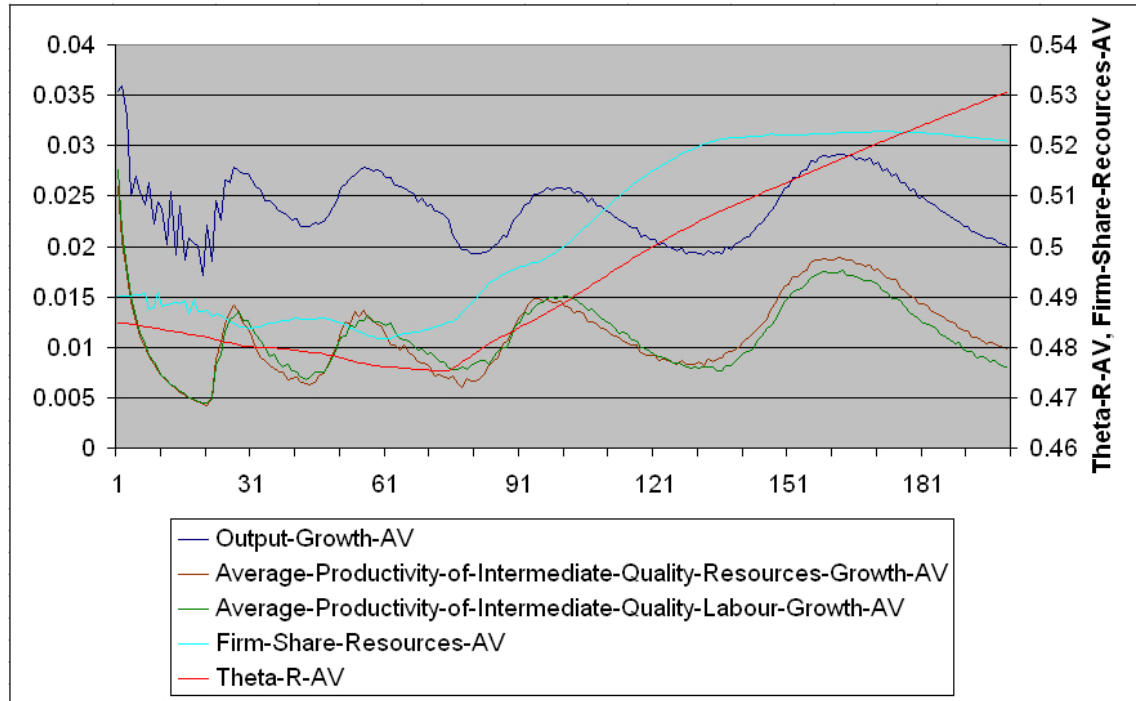
Abbildung IX.6: Ressourcenreduktion im neo-schumpeterianischen Standardmodell



Die einmalige Reduktion der Ressourcen hat überwiegend kurzfristige Auswirkungen auf das Modell. Aufgrund des geringeren Ressourceneinsatzes sinkt die Wachstumsrate der Produktion kurzfristig, bis sie nach ein paar Perioden wieder auf das normale Niveau zurückkehrt. Der Kostenanteil und die Anzahl der ressourcenverwandten Vorprodukte steigt aufgrund der erhöhten Nachfrage kurzfristig schlagartig an. Der Kostenanteil der ressourcenverwandten Vorprodukte gleicht sich anschließend langsam seinem normalen Niveau wieder an. Die Wachstumsraten der produktiven Qualität der Vorprodukte bleiben langfristig ebenfalls unverändert. Kurzfristig sinkt die produktive Qualität der ressourcenverwandten Vorprodukte aufgrund zahlreicher Startups, die die zusätzliche Nachfrage befriedigen und weniger ausgereifte Produkte anbieten. Da bei diesen Firmen jedoch durch Prozessinnovationen die produktive Qualität des Vorproduktes schnell erhöht wird, erreicht diese nach wenigen Perioden wieder das normale Niveau. Die einzigen langfristigen Veränderungen sind der geringere Ressourcenbestand und eine dadurch hervorgerufene, leicht erhöhte Anzahl an Firmen im ressourcenverwandten Sektor.

Die Auswirkungen einer Reduktion der Wachstumsrate der Ressourcen von 16% auf 8% in der 75. Periode auf das Standardmodell sind in der Abbildung IX.6 dargestellt.

Abbildung IX.7: Ressourcenwachstumsratenreduktion im neo-schumpeterianischen Standardmodell



Eine Reduktion der Wachstumsrate der Ressourcen hat im Modell sowohl kurz-, als auch langfristige Auswirkungen. Aufgrund des geringeren Ressourcenmehreinsatzes sinkt die Wachstumsrate des Endproduktes schlagartig und bleibt langfristig auf einem geringeren Niveau als im Standardmodell. Der Trend des Kapitalkostenanteils der ressourcenverwandten Vorprodukte ändert sich dadurch und steigt nun.⁵⁷ Durch die gestiegene Nachfrage nach ressourcenverwandten Vorprodukten, steigt die Anzahl der Firmen in diesem Sektor in jeder Periode mehr als im Standardmodell, wodurch sich das Verhältnis der Firmen erhöht. Durch die höhere Anzahl der Startups im ressourcenverwandten Sektor verändert sich auch die durchschnittliche produktive Qualität der Nachfrage in diesem Sektor langfristig.

⁵⁷Da nun nicht mehr $\hat{R} + \hat{Q}_{Rk} > \hat{L} + \hat{Q}_{Lk}$, sondern $\hat{R} + \hat{Q}_{Rk} < \hat{L} + \hat{Q}_{Lk}$ gilt.

5 Mögliche Modellerweiterungen

Der Zeithorizont des neo-schumpeterianischen Modells ist derzeit durch das Erreichen des technischen Fortschritts von einem Wert größer gleich eins begrenzt. Hier kann durch eine Modifikation der Zeithorizont erweitert werden. Eine solche Modifikation könnte die Erweiterung der produktiven Qualität um einen weiteren Faktor sein, verbunden mit der Einführung einer weiteren Forschungsroutine um diesen zu erhöhen. Dieser Faktor könnte eine übergeordnete Schlüsselerfindung, wie die Dampfmaschine oder den Computer darstellen, und somit die Kondratjew-Zyklen abbilden.

Die Endogenisierung der Höhe der Investitionen in Forschung und Entwicklung durch eine Routine, nach der die Entrepreneurere handeln, ist eine weitere sinnvolle Erweiterung des Modells. So würden sich deutlich mehr Erkenntnisse über die Reaktionen der Firmen, die durch den Druck auf einen der Märkte entstehen, gewinnen lassen. Dadurch könnten sich die Ergebnisse wie in den Varianten des Modells von Smulders und de Nooij (2003) deutlich unterscheiden.

Durch die Erweiterung des neo-schumpeterianischen Modells auf die Nachfrage nach Zwischen- und Endprodukten, bis hin zur Erweiterung des Modells zu einem allgemeinen Modell, das auch die Haushalte umfasst, ließen sich ebenfalls noch interessante Erkenntnisse gewinnen.

X Vergleich der Ergebnisse

Am ehesten lassen sich die Ergebnisse des neoklassische Modell mit exogem technischen Fortschritt und die des neo-schumpeterianische Modells vergleichen. Der Hauptunterschied liegt in der Zeitpfadunabhängigkeit des neoklassischen Modells. Des weiteren stellt sich im neoklassischen Modell ein Steady-State ein und im neo-schumpeterianischen Modell folgen die durchschnittlichen Wachstumsraten den Konjunkturzyklen. Ansonsten sind sich die Ergebnisse einer Ressourcenreduktion und einer Ressourcenwachstumsratenreduktion sehr ähnlich.

Da das Modell aus der Thermodynamik zur Bestimmung der Produktionselastizitäten dient, wodurch ermittelt werden kann, ob die Grenzkosten der Inputfaktoren verzerrt sind, kann es mit den beiden anderen Modellen nicht direkt verglichen werden. Denn diese dienen der Ermittlung der Wachstumsraten und der Veränderungen in den Wachstumsraten bei exogenen Einflüssen. Es ist möglich diese zu vergleichen, wenn sich die empirischen Werte für alle exogenen Variablen für beide Modelle⁵⁸ ermitteln lassen. Als Ergebnis erhält man jeweils den Rückgang der Produktionswachstumsrate, falls man die Wachstumsrate eines Inputfaktors senkt. Im thermodynamischen Modell ermittelt man dies über die Multiplikation der Inputfaktorsenkung mit der geschätzten Produktionselastizität. In den anderen Modellen ist der Rückgang der Produktionswachstumsrate direkt in der Simulation abzulesen. Grundsätzlich ist in den Modellen durch das Energiesparen ein Rückgang des Wirtschaftswachstums zu erkennen.

⁵⁸Für das thermodynamische und das neoklassische oder das neo-schumpeterianische Modell

Anhang A: Rechnungen

1 Berechnung der Gleichungen IV.3.10 bis IV.3.12

Durch Einsetzen von Gleichung IV.2.4 und IV.2.5

$$Y_L = L^\beta \int_0^1 q_{Lk} x_{Lk}^{1-\beta} dk$$

$$Y_R = R^\beta \int_0^1 q_{Rk} x_{Rk}^{1-\beta} dk$$

in Gleichung IV.3.2

$$\frac{Y_L}{Y_R} = \left(\frac{p_{YL}}{p_{YR}} \right)^{-\sigma}$$

erhält man

$$\frac{R^\beta \int_0^1 q_{Rk} x_{Rk}^{1-\beta} dk}{L^\beta \int_0^1 q_{Lk} x_{Lk}^{1-\beta} dk} = \left(\frac{p_{YR}}{p_{YL}} \right)^{-\sigma}.$$

Dies lässt sich mit Hilfe von den Gleichungen IV.2.6 und IV.3.9

$$Q_i = \int_0^1 q_{ik} dk$$

$$x_i \equiv (p_{Yi}(1-\beta)^2)^{\frac{1}{\beta}} S_i = x_{ik} \quad i = R, L; \quad S_i = R, L$$

umformen in

$$\frac{R^\beta Q_R x_R^{1-\beta}}{L^\beta Q_L x_L^{1-\beta}} = \left(\frac{p_{YR}}{p_{YL}} \right)^{-\sigma}$$

$$\frac{R Q_R}{L Q_L} \left(\frac{p_{YR}}{p_{YL}} \right)^{\frac{1-\beta}{\beta}} = \left(\frac{p_{YR}}{p_{YL}} \right)^{-\sigma}$$

$$\frac{p_{YR}}{p_{YL}} = \left(\frac{R Q_R}{L Q_L} \right)^{\frac{\beta}{\beta-\beta\sigma-1}} = \left(\frac{R Q_R}{L Q_L} \right)^{-\frac{\beta}{\nu}}; \quad \text{mit } \nu = 1 - \beta(1 - \sigma).$$

Somit hat man Gleichung IV.3.10 erhalten.

Aus der Gleichung IV.3.9

$$x_i \equiv (p_{Yi}(1-\beta)^2)^{\frac{1}{\beta}} = x_{ik} \quad i = R, L$$

erhält man

$$\frac{x_R}{x_L} = \frac{R}{L} \left(\frac{p_{Y_R}}{p_{Y_L}} \right)^{\frac{1}{\beta}}$$

Substituiert man $p_{Y_i}^B$ durch die Gleichung IV.3.10 erhält man

$$\frac{x_R}{x_L} = \frac{R}{L} \left(\left(\frac{RQ_R}{LQ_L} \right)^{-\frac{\beta}{\nu}} \right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{Q_R}{Q_L} \right)^{-\frac{1}{\nu}} \left(\frac{R}{L} \right)^{-\frac{1-\nu}{\nu}}; \quad \text{mit } \nu = 1 - \beta(1 - \sigma) .$$

Dies entspricht der Gleichung IV.3.11.

Aus der Gleichung IV.3.6

$$w_i = p_{Y_i} \beta A_i; \quad i = R, L$$

erhält man

$$\frac{w_R}{w_L} = \left(\frac{p_{Y_R}}{p_{Y_L}} \right) \left(\frac{x_R}{x_L} \right)^{1-\beta} \left(\frac{Q_R}{Q_L} \right) \left(\frac{R}{L} \right)^{\beta-1}$$

Durch die Substitution von $p_{Y_i}^B$ und x^B aus den Gleichungen IV.3.10 und IV.3.11 kommt man zur Gleichung IV.3.12

$$\begin{aligned} \frac{w_R}{w_L} &= \left(\frac{RQ_R}{LQ_L} \right)^{-\frac{\beta}{\nu}} \left(\left(\frac{Q_R}{Q_L} \right)^{-\frac{1}{\nu}} \left(\frac{R}{L} \right)^{-\frac{1-\nu}{\nu}} \right)^{1-\beta} \left(\frac{Q_R}{Q_L} \right) \left(\frac{R}{L} \right)^{\beta-1} \\ &\Rightarrow \frac{w_R}{w_L} = \left(\frac{Q_R}{Q_L} \right)^{-\frac{1-\nu}{\nu}} \left(\frac{R}{L} \right)^{-\frac{1}{\nu}} \end{aligned}$$

2 Berechnung von Gleichung IV.3.13

Gleichung IV.2.3

$$Y = A \left(Y_L^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + Y_R^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

lässt sich unter Zuhilfenahme von $x_{ik} = x_i$, $\inf_0^1 q_{ik} = Q_i$ und den Gleichungen IV.2.4 und IV.2.5

$$\begin{aligned} Y_L &= L^\beta \int_0^1 q_{Lk} x_{Lk}^{1-\beta} dk \\ Y_R &= R^\beta \int_0^1 q_{Rk} x_{Rk}^{1-\beta} dk \end{aligned}$$

umschreiben in

$$Y = \left((AL^\beta Q_L X_L^{1-\beta})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + (AR^\beta Q_R X_R^{1-\beta})^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}.$$

Durch Ersetzen von x_i durch die Gleichung IV.3.9

$$x_i = (p_{Y_i}(1-\beta)^2)^{\frac{1}{\beta}} S_i \quad \text{mit } i = R, L \text{ und } S_i = R, L$$

und der Annahme $A := (1-\beta)^{2(\beta-1)/\beta}$ erhält man

$$Y = \left(\left(Q_L L p_{Y_L}^{\frac{1-\beta}{\beta}} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} + \left(Q_R R p_{Y_R}^{\frac{1-\beta}{\beta}} \right)^{\frac{\sigma-1}{\sigma}} \right)^{\frac{\sigma}{\sigma-1}}$$

Durch die Verwendung der Gleichungen

$$\frac{p_{Y_R}}{p_{Y_L}} = \left(\frac{Q_R R}{Q_L L} \right)^{-\frac{\beta}{1-\beta+\beta\sigma}}$$

$$1 = A^{-1} (p_{Y_L}^{1-\sigma} + p_{Y_R}^{1-\sigma})^{\frac{1}{1-\sigma}}$$

erhält man die Gleichung IV.3.13

$$Y = \left((Q_L L)^{\frac{\beta\sigma-\beta}{\beta\sigma-\beta+1}} + (Q_R R)^{\frac{\beta\sigma-\beta}{\beta\sigma-\beta+1}} \right)^{\frac{\beta\sigma-\beta+1}{\beta\sigma-\beta}}$$

3 Berechnung von Gleichung IV.3.25

Man kann die Gleichung

$$\widehat{Q}^B = \widehat{Q}_R - \widehat{Q}_L$$

mit Hilfe von $D_L + D_R = D$, $Q^B = Q_R/Q_L$ und $\widehat{Q}_i = \xi_i D_i$ folgendermaßen umformen:

$$\begin{aligned} \xi_L \widehat{Q}^B &= \xi_L \widehat{Q}_R - \xi_L \widehat{Q}_L \\ \xi_L \widehat{Q}_L + \xi_R \widehat{Q}_L &= \xi_R \widehat{Q}_L + \xi_L \widehat{Q}_R - \xi_L \widehat{Q}^B \\ \widehat{Q}_L (\xi_L + \xi_R) &= \xi_R \xi_L D_L + \xi_L \xi_R D_R - \xi_L \widehat{Q}^B \\ \Rightarrow \widehat{Q}_L &= \frac{\xi_R \xi_L}{\xi_L + \xi_R} D - \frac{\xi_L}{\xi_L + \xi_R} \widehat{Q}^B \end{aligned}$$

4 Berechnung von Gleichung IV.3.32

Durch die Loglinearisierung von Gleichung IV.3.16

$$\theta_R = \left[(Q^B S^B)^{\frac{1-\nu}{\nu}} + 1 \right]^{-1} \quad \text{mit } S^B = \frac{R}{L}$$

erhält man

$$\hat{\theta}_R = (-1)(1 - \theta_R) \left(\frac{1 - \nu}{\nu} \right) (\hat{Q}^B + \hat{S}^B)$$

Durch Einsetzen von \hat{w}_D aus Gleichung IV.3.29

$$w_D = \left(\frac{\alpha[1 - (1 - \beta)^2]}{1 - \alpha} \right) \frac{Y}{H - D}$$

in die Gleichung IV.3.20

$$\hat{Q}^B = \beta(1 - \beta) \left(\frac{Y}{w_D} \right) (\omega_L \xi_L + \omega_R \xi_R)(\theta_R - \theta_{NB})$$

unter der Annahme $\beta(1 - \beta)/[1 - (1 - \beta)^2] = \alpha/(1 - \alpha)$ erhält man

$$\hat{Q}^B = (H - D)\omega_L \xi_L + \omega_R \xi_R)(\theta_R - \theta_{NB}).$$

Setzt man dies in die eben loglinearisierte Form von θ_R ein, erhält man die Gleichung IV.3.32

$$\hat{\theta}_R = -(1 - \theta_R) \left(\frac{1 - \nu}{\nu} \right) [(\omega_R \xi_R + \omega_L \xi_L)(H - D)(\theta_R - \theta_{NB}) + g_{R/L}]$$

Anhang B: Variablenverzeichnis

Neoklassische Modelle

$*_i$	= L, R	$*_k$	= vom Monopolisten k
$*^B$	= Relatives Verhältnis R zu L	A	= Regulierungsparameter
A_L	= $\int_0^1 q_{Lk} \left(\frac{x_{Lk}}{L}\right)^{1-\beta} dk$	A_R	= $\int_0^1 q_{Rk} \left(\frac{x_{Rk}}{R}\right)^{1-\beta} dk$
C_H	= Konsumgut aus H	\hat{C}_H	= Wachstumsrate von C_H
C_Y	= Konsumgut aus Y	\hat{C}_Y	= Wachstumsrate von C_Y
D	= Gesamtinvestitionen in F & E	\hat{D}	= Wachstumsrate von D
D_L	= Investitionen in F & E im Sektor L	D_R	= Investitionen in F & E im Sektor R
g	= Pro-Kopf-Produktionswachstumsrate	$g_{R/L}$	= Wachstumsratendifferenz von R und L
H	= Qualifizierte Arbeiter	K	= Kapital
L	= Arbeit	\hat{L}	= Wachstumsrate von L
p_{CH}	= Preis von C_H	\hat{p}_{CH}	= Wachstumsrate von p_{CH}
p_{XL}	= Preis von x_L	p_{XR}	= Preis von x_R
p_{YL}	= Preis von Y_L	p_{YR}	= Preis von Y_R
q_L	= Qualität des Vorproduktes x_L	q_R	= Qualität des Vorproduktes x_R
Q_L	= Durchschnittliche Qualität der Vorprodukte im Sektor L	Q_R	= Durchschnittliche Qualität der Vorprodukte im Sektor R
\hat{Q}_L	= Wachstumsrate von Q_L	\hat{Q}_R	= Wachstumsrate von Q_R
r	= Zinssatz	r	= Kapitalkosten
r_L	= Grenzertragsrate von F & E - Investitionen im Sektor L	r_R	= Grenzertragsrate von F & E - Investitionen im Sektor R
R	= Ressourcen	\hat{R}	= Wachstumsrate von R
S_i	= L, R	t	= Zeit
w_D	= Lohn der Arbeiter in F & E	\hat{w}_D	= Wachstumsrate von w_D
w_L	= Lohn der Arbeit	w_R	= Preis der Ressourcen
x_L	= Vorprodukt für Arbeit	x_R	= Vorprodukt für Ressourcen
Y	= Produktion	\hat{Y}	= Wachstumsrate von Y
Y_L	= Zwischenprodukt aus Arbeit	Y_R	= Zwischenprodukt aus Ressourcen
α	= Konsumausgabenanteil	β	= Produktionselastizität
ζ	= $\frac{\xi_R \xi_L}{\xi_L + \xi_R}$	θ_{NB}	= $\frac{\omega_L \xi_L}{\omega_L \xi_L + \omega_R \xi_R}$
θ_L	= Kostenanteil von Y_L	θ_R	= Kostenanteil von Y_R
$\hat{\theta}_R$	= Wachstumsrate von θ_R	λ_{BTC}	= $\beta(1-\beta) \left(\frac{Y}{w_D}\right) (\omega_L \xi_L + \omega_R \xi_R)$
ν	= $(1-\beta) + \beta\sigma$	ξ_L	= Forschungseffizienz im Sektor L
ξ_R	= Forschungseffizienz im Sektor R	ρ	= Nutzendiskontrate
σ	= Substitutionselastizität	ω_L	= Forschungserfolgsparameter im Sektor L
ω_R	= Forschungserfolgsparameter im Sektor R		

Thermodynamisches Modell

$a(t)$	= Kapitaleffizienz Parameter	$c(t)$	= Energienachfrage Parameter
$E(t)$	= Energieeinsatz der Periode t	$e(t)$	= $\frac{E(t)}{E_0}$
$K(t)$	= Kapitaleinsatz der Periode t	$k(t)$	= $\frac{K(t)}{K_0}$
$L(t)$	= Arbeitseinsatz der Periode t	$l(t)$	= $\frac{L(t)}{L_0}$
$Q(t)$	= Produktion der Periode t	$q(t)$	= $\frac{Q(t)}{Q_0}$
R^2	= Bestimmtheitsmaß	q_W	= Durbin-Watson-Koeffizient
α	= Produktionselastizität des Kapitals	β	= Produktionselastizität der Arbeit
γ	= Produktionselastizität der Energie	δ	= Produktionselastizität der menschlichen Kreativität
$\bar{\alpha}$	= Durchschnitt der Produktionselastizität des Kapitals	$\bar{\beta}$	= Durchschnitt der Produktionselastizität der Arbeit
$\bar{\gamma}$	= Durchschnitt der Produktionselastizität der Energie	$\bar{\delta}$	= Durchschnitt der Produktionselastizität der menschlichen Kreativität
$\bar{\alpha}_R$	= Durchschnitt der Produktionselastizität des Kapitals - '1-year-pulse' Modell	$\bar{\beta}_R$	= Durchschnitt der Produktionselastizität der Arbeit - '1-year-pulse' Modell
$\bar{\gamma}_R$	= Durchschnitt der Produktionselastizität der Energie - '1-year-pulse' Modell	$\bar{\delta}_R$	= Durchschnitt der Produktionselastizität der menschlichen Kreativität - '1-year-pulse' Modell

Neo-schumpeterianische Modelle

$*_i$	= L, R	$*_k$	= vom Monopolisten k
$P_\lambda(X)$	= Poissonwahrscheinlichkeit	A	= Regulierungsparameter
D_{Lk}	= F & E - Investitionen der Firma k im Sektor L	D_{Rk}	= F & E - Investitionen der Firma k im Sektor R
\tilde{D}_{Lk}	= $D_{Lk}q_{Lk}^{-1}$ = Einsatz an Qualifizierter Arbeit	\tilde{D}_{Rk}	= $D_{Rk}q_{Rk}^{-1}$ = Einsatz an Qualifizierter Arbeit
\tilde{D}_{LkO}	= Durchschnittlicher Einsatz an qualifizierter Arbeit der anderen Firmen im Sektor L mit dem gleichen κ wie die Firma k	\tilde{D}_{RkO}	= Durchschnittlicher Einsatz an qualifizierter Arbeit der anderen Firmen im Sektor R mit dem gleichen κ wie die Firma k
\tilde{D}_{Lkt}	= Bisherige Produktinnovationsinvestitionen der Firma k im Sektor L	\tilde{D}_{Rkt}	= Bisherige Produktinnovationsinvestitionen der Firma k im Sektor R
K	= Kapital	L	= Arbeit
n_L	= Anzahl der Firmen im Sektor L	n_R	= Anzahl der Firmen im Sektor R
n_{Lk}	= Anzahl der Firmen im Sektor L mit dem gleichen κ wie die Firma k	n_{Rk}	= Anzahl der Firmen im Sektor R mit dem gleichen κ wie die Firma k
p_{xL}^D	= Durchschnittlicher Nachfragepreis der arbeitsverwandten Vorprodukte	p_{xR}^D	= Durchschnittlicher Nachfragepreis der ressourcenverwandten Vorprodukte
p_{xL}^S	= Durchschnittlicher Angebotspreis der arbeitsverwandten Vorprodukte	p_{xR}^S	= Durchschnittlicher Angebotspreis der ressourcenverwandten Vorprodukte
p_{xLk}^S	= Angebotspreis des arbeitsverwandten Vorproduktes der Firma k	p_{xRk}^S	= Angebotspreis des ressourcenverwandten Vorproduktes der Firma k
q_{Lk}	= Qualität des arbeitsverwandten Vorproduktes der Firma k	q_{Rk}	= Qualität des ressourcenverwandten Vorproduktes der Firma k
\dot{q}_{Lk}	= Veränderung der Qualität des arbeitsverwandten Vorproduktes der Firma k	\dot{q}_{Rk}	= Veränderung der Qualität des ressourcenverwandten Vorproduktes der Firma k
$q_{Lk}^{\kappa_{Lk}}$	= Produktive Qualität des arbeitsverwandten Vorproduktes der Firma k	$q_{Rk}^{\kappa_{Rk}}$	= Produktive Qualität des ressourcenverwandten Vorproduktes der Firma k
Q_{Lk}	= Durchschnittliche Qualität der Firmen im Sektor L mit dem gleichen κ wie Firma k	Q_{Rk}	= Durchschnittliche Qualität der Firmen im Sektor R mit dem gleichen κ wie Firma k
$Q_{L\kappa}$	= Durchschnittliche produktive Qualität des arbeitsverwandten Vorproduktes	$Q_{R\kappa}$	= Durchschnittliche produktive Qualität des ressourcenverwandten Vorproduktes
R	= Ressourcen	S_i	= R, L
x_L	= Anzahl der Vorprodukte im Sektor L	x_R	= Anzahl der Vorprodukte im Sektor R
x_L^D	= Nachfrage nach Vorprodukten im Sektor L	x_R^D	= Nachfrage nach Vorprodukten im Sektor R
x_L^S	= Angebot an Vorprodukten im Sektor L	x_R^S	= Angebot an Vorprodukten im Sektor R
x_{Lk}	= Vroprodukt der Firma k im Sektor L	x_{Rk}	= Vroprodukt der Firma k im Sektor R
Y_L	= arbeitsverwandtes Zwischenprodukt	Y_R	= ressourcenverwandtes Zwischenprodukt
Y	= Endprodukt		

β	=	Produktionselastizität	κ	=	Technologischer Level
λ	=	Poisson-Parameter	σ	=	Substitutionselastizität
ξ_{LN}	=	Forschungseffizienz im Sektor L für Prozessinnovationen	ξ_{RN}	=	Forschungseffizienz im Sektor R für Prozessinnovationen
ξ_{LA}	=	Forschungseffizienz im Sektor L für Produktinnovationen	ξ_{RA}	=	Forschungseffizienz im Sektor R für Produktinnovationen
$\tilde{\xi}_L$	=	Diffusionsparameter für Produktinnovationen im Sektor L	$\tilde{\xi}_R$	=	Diffusionsparameter für Produktinnovationen im Sektor R
ω_{LN}	=	Parameter für den Anteil erfolgreicher Prozessinnovationen im Sektor L	ω_{RN}	=	Parameter für den Anteil erfolgreicher Prozessinnovationen im Sektor R
ω_{LA}	=	Parameter für den Anteil erfolgreicher Produktinnovationen im Sektor L	ω_{RA}	=	Parameter für den Anteil erfolgreicher Produktinnovationen im Sektor R

Literatur

- Aghion, Philippe, und Peter Howitt. 1998. *Endogenous Growth Theory*. Cambridge - London: The MIT Press.
- Cantner, Uwe, und Andreas Pyka. 1998. "Absorbing Technological Spillovers: Simulations in an Evolutionary Framework." Technical Report, Oxford University Prea.
- Dosi, Giovanni, L. Orsenigo, und Mauro Sylos Labini. 2005. In *The Handbook of Economic Sociology*, edited by Neil J. Smelser und Richard Swedberg, 2nd edition. Princeton University Press.
- Erdmann, Georg. 1992. *Energieökonomik*. Zürich u.a.: Verl. d. Fachvereine u.a.
- Kemfert, Claudia. 1998. "Estimated substitution elasticities of a nested CES production function approach for Germany." *Energy Economics* 20 (3): 249–264 (June). Erhältlich unter <http://ideas.repec.org/a/eee/eneeco/v20y1998i3p249-264.html>.
- Kühn, Isabel, und Wolfgang Bräuer. 2000. "Quotenmodelle - was können sie leisten, wo sind ihre Grenzen." Technical Report, ZEW.
- Kümmel, Reiner, Julian Henn, und Dietmar Lindenberger. 2002a. "Capital, labor, energy and creativity: modeling innovation diffusion." *Structural Change and Economic Dynamics* 13 (4): 415–433 (December). Erhältlich unter <http://ideas.repec.org/a/eee/streco/v13y2002i4p415-433.html>.
- . 2002b. "Internet Supplement on the article: 'Capital, labor, energy and creativity: modeling innovation diffusion'." *Structural Change and Economic Dynamics* 13 (4): 415–433 (December). Erhältlich unter <http://theorie.physik.uni-wuerzburg.de/TP1/kuemmel/klecnet.pdf>.
- Kümmel, Reiner, und Dietmar Lindenberger. 2002. "Energy-Dependent Production Functions and the Optimization Model 'PRISE' of Price-Induced Sectoral Evolution." *Int.J. Applied Thermodynamics* 5 (3): 101–107 (September). Erhältlich unter http://www.icatweb.org/vol5/Vol_5.3/lindenberger250902.pdf.
- Kuper, Gerard H., und Daan P. van Soest. 2003. "Path-dependency and input substitution: implications for energy policy modeling." *Energy Economics* 25 (4): 397–407 (July). Erhältlich unter <http://ideas.repec.org/a/eee/eneeco/v25y2003i4p397-407.html>.
- Levy, A. 2000. "From Hotelling to Backstop Technology." Technical Report.
- Nelson, Richard R., und Sidney G. Winter. 1982. *An Evolutionary Theory of*

- Economic Change*. Cambridge: Belknap Press.
- Nordhaus, William D. 1997. *The Swedish Nuclear Dilemma: Energy and the Environment, Resources for the Future*. Washington, D.C: Resources for the Future Press (RFF Press), The Johns Hopkins University Press.
- Press, William H., Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, und William T. Vetterling. 1992. *Numerical Recipes in C*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Puch, Luis A., Antonia Díaz, und María D. Guilló. 2001, May. "Costly Capital Reallocation And Energy Use." Economics working papers we015215, Universidad Carlos III, Departamento de Economía. Erhältlich unter <http://ideas.repec.org/p/cte/werepe/we015215.html>.
- Smulders, Sjak, und Michiel de Nooij. 2003. "The impact of energy conservation on technology and economic growth." *Resource and Energy Economics* 25 (1): 59–79 (February). Erhältlich unter <http://ideas.repec.org/a/eee/resene/v25y2003i1p59-79.html>.
- Vereinte Nationen. 1997. "Protokoll von Kyoto zum Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen." Erhältlich unter <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpger.pdf>.
- Watanabe, Ch. 1999. "Systems Options for Sustainable Development." *OECD (Ed.), Energy: The Next Fifty Years*, pp. 121 – 155.

Danksagung

Ich möchte allen Menschen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, ein Dankeschön aussprechen.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Andreas Pyka und meinem Ansprechpartner beim IPP, Thomas Hamacher, die immer für mich dagewesen sind und eine Antwort für meine Fragen parat hatten. Sie haben mit ihrer ruhigen und optimistischen Art für Aufmunterung gesorgt, falls die Ausarbeitung und Modellierung eines Modells in NetLogo mal wieder länger als geplant gedauert hatte.

Ich danke außerdem allen Kollegen und Mitarbeitern des Lehrstuhls, die durch ihr Interesse an den NetLogo-Modellen und dem Thema meinen Ehrgeiz, Eifer und Elan für diese Arbeit gefördert haben.

Ganz herzlich danke ich auch meiner Familie und meinen Freunden. Besonders danke ich meiner Mutter und ihrem Freund, die mir zwar fachlich nicht helfen können, die aber trotzdem immer wissen, wie sie mir am besten unter die Arme greifen.