

Wissen, technologischer Fortschritt und ökonomisches Wachstum

*Ein Framework zur Analyse technologischen Fortschritts unter besonderer Berücksichtigung
der Rolle der Informations- und Kommunikationstechnologie*

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften

eingereicht von

Philip Bacher

Matrikelnummer 0025602

an der
Fakultät für Informatik der Technischen Universität Wien

Betreuung: Ao.Univ. Prof. Mag. Dr. Gerhard Hanappi
Univ.-Prof. i.R. Mag. Dr. Wilfried Schönböck

Diese Dissertation haben begutachtet:

Ao.Univ.-Prof. Mag. Dr. Gerhard Hanappi

o.Univ.-Prof. Dr. Alfred Taudes

Wien, 02.12.2013

Philip Bacher

Erklärung zur Verfassung der Arbeit

Mag. Philip Bacher
Huttengasse 37/23, A-1160 Wien

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quellen als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Wien, 02.12.2013

Philip Bacher

Danksagung

Für Ines und Maximilian!

Kurzfassung

Technologischer Fortschritt ist von zentraler Bedeutung für ökonomisches Wachstum. Dies wird sowohl durch theoretische als auch durch empirische Forschungsergebnisse bestätigt. Bemerkenswerter Weise herrscht jedoch Dissens über die genauen Quellen sowie über die Struktur dieses Prozesses. Einige Stimmen argumentieren, dass neues Wissen die zentrale Quelle technologischen Fortschritts ist, wobei die Konzentration auf Netzwerkstrukturen für ein besseres Verständnis entscheidend ist. Die Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) spielt in diesem Kontext eine besondere Rolle. Sie hat die für alle verfügbare Menge an Informationen sowie die Struktur der Wirtschaft wesentlich verändert. Dies hat direkte Implikationen für die Generierung von neuem Wissen und damit für technologischen Fortschritt.

Auf Basis einer genauen Analyse der zentralen Beiträge der Wachstums- sowie der Netzwerktheorie wird in dieser Dissertation ein Framework zur Analyse technologischen Fortschritts für die Makro- und Mikroebene der Ökonomie erarbeitet. Dabei steht die direkte Beziehung zwischen Wissen und Technologie sowie die Rolle der IKT im Fokus. In Bezug auf die Makroebene wird argumentiert, dass die verfügbaren Technologien sowie das verfügbare Humankapital für technologischen Fortschritt entscheidend sind. Dieser wird jedoch auf der Mikroebene durch das Wachstum des internen Modells ökonomischer Agenten ausgelöst. Das interne Modell stellt dabei ein skalenfreies Netzwerk dar. Dessen Knoten sind Techniken bzw. Wissenentitäten und es dient der Lösung wirtschaftlicher Problemstellungen mittels unterschiedlicher Technologien. Sein Wachstum wird durch Bildung und berufliche Erfahrung bestimmt.

Es ist festzuhalten, dass die enge Beziehung zwischen Wissen und Technologie enorme Konsequenzen für die Wirtschafts- und Bildungspolitik hat. Beide haben dieser Beziehung besondere Beachtung zu schenken, da sie das Potential in sich trägt kontinuierliches Wachstum und damit den langfristigen Wohlstand einer Gesellschaft sicher zu stellen.

Abstract

Technological progress is central to economic growth. This is confirmed by theoretical as well as empirical research results. Thus it is interesting to note that dissent about the exact sources and the structure of technological progress exists. Some argue that new knowledge is the true source. Setting the focus on network structures seems to be crucial for a better understanding. The Information- and Communication Technology (ICT) plays an important role in this context. It influenced the available amount of information and the structure of the economy in a central way. This again has direct consequences for the generation of new knowledge and thus for technological progress.

Based on a detailed analysis of the central contributions within the different streams of economic growth theory and network theory this dissertation presents a framework for the analysis of technological progress on the economic macro and micro level. The focus lies on the direct relationship between knowledge and technology as well as on the role of the ICT. Regarding the macro level it is argued that the available technologies and the available human capital are essential for technological progress. However this progress is triggered by the growth of the internal model of economic agents on the micro level. This model may be viewed as a scale free network consisting of nodes which represent techniques respectively knowledge entities and is used to solve economic problems via technologies. The growth of this network is governed by education and professional experience.

It is time to state that the close relation between knowledge and technology has tremendous implications for economic and educational policy. Both have to pay close attention to this relationship as it has the potential to guarantee continuous growth and thus the well-being of the whole society in the long run.

Inhalt

1. Einleitung.....	10
2. Wissen und Technologie in der ökonomischen Theorie.....	18
3. Die exogene, endogene und evolutionäre Wachstumstheorie	25
3.1. Die exogene Wachstumstheorie: Annahmen, Ergebnisse und Kritik	25
3.2. Die endogene Wachstumstheorie: Annahmen, Ergebnisse und Kritik	31
3.3. Die evolutionäre Wachstumstheorie: Annahmen, Ergebnisse und Kritik.....	36
4. Technologischer Fortschritt in den Wachstumstheorien.....	42
4.1. Technologischer Fortschritt in der exogenen Wachstumstheorie	42
4.2. Technologischer Fortschritt in der evolutionären Wachstumstheorie.....	44
4.3. Technologischer Fortschritt in der endogenen Wachstumstheorie	46
5. Indikatoren für Wachstum und Technologie	48
5.1. Indikatoren für Wachstum, Wissen und Technologie.....	48
5.2. Kennzahlen für Österreich und die EU	50
6. Growth Accounting und Totale Faktorproduktivität	59
6.1. Kritik an Indikatoren und an der Methode des Growth Accountings	63
6.2. Die IKT und das Produktivitätsparadoxon.....	67
6.3. Neues Wissen, Technologie und Wachstum	68
6.4. Graduelle und radikale Innovationen	69
7. Wissen und seine unterschiedlichen Kategorien.....	70
7.1. Die Unterscheidung zwischen Daten, Informationen und Wissen.....	71
7.2. Ökonomisch relevantes und irrelevantes Wissen.....	72
7.3. Kodifizierbares und stilles Wissen.....	74
7.4. Nützliches Wissen	77
7.5. Wissen als öffentliches Gut.....	78
7.6. Wissen und der Produktionsfaktor Kapital	79
7.6.1. Wissen als Teil des gesamtwirtschaftlichen Kapitals.....	79
7.6.2. Kapitalgüter und Wissen	80
8. Die IKT und die Ökonomie	81
8.1. IKT und die Teilung der Ökonomie.....	82
8.2. IKT, Wissen und Software	84
8.3. Das Internet, das Mobiltelefon und die Rolle von Netzwerken in der IKT und Ökonomie.....	87
8.3.1. Formale Eigenschaften von Netzwerken.....	89
8.3.2. Zufallsnetze und skalenfreie Netze.....	91
9. Ein Framework zur Analyse technologischen Fortschritts	99
9.1. Die Makroebene	100
9.1.1. Technologie auf der Makroebene	101
9.1.2. Humankapital auf der Makroebene	104
9.2. Die Mikroebene.....	107
9.2.1. Technologie und Humankapital auf der Mikroebene	108
9.2.2. Instanziierung von Technologien, Informationsverarbeitung und Generierung neuer Technologien.....	109
9.2.3. Das Wachstum und die Struktur des internen Modells	110
9.3. Die Diskrepanz zwischen der Makro- und der Mikroebene	112
9.4. Ein allgemeines Konzept für eine agentenbasierte Simulation.....	113
9.4.1. Zentrale Klassen der Simulation.....	114
9.4.2. Technische Modellierung der Agenten und ihres internen Modell.....	115
9.4.3. Das Wachstum des internen Modells	116
9.4.4. Mögliche Erweiterungen der Simulation.....	118
10. Persönliche Meinung und Schlussfolgerungen für die Politik.....	119

11.	Zusammenfassung	122
12.	Literaturverzeichnis.....	125
13.	Lebenslauf	137

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Codebedeutungen Eurostat (2011e)	50
Tabelle 2: Wachstumsrate des realen BIP für EU17	51
Tabelle 3: Wachstumsrate reales BIP pro Kopf für EU17	53
Tabelle 4: Bruttoinlandsaufwendungen für F&E (GERD)	54
Tabelle 5: Europäische Patentanmeldungen	56
Tabelle 6: Öffentliche Ausgaben für Bildung in EU17	57
Tabelle 7: Anreize für die Generierung und Akkumulation von Wissen	69

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wachstumsrate des realen BIP für DE, FR und AT	52
Abbildung 2: Wachstumsrate reales BIP pro Kopf für DE, FR und AT.....	53
Abbildung 3: Bruttoinlandsaufwendungen für F&E (GERD) für DE, FR, AT	55
Abbildung 4: Europäische Patentanmeldungen DE, FR und AT.....	56
Abbildung 5: Öffentliche Ausgaben für Bildung in Prozent des BIP in DE, FR und AT	58
Abbildung 6: Das interne Modell — ein Netzwerk von Wissensentitäten	109
Abbildung 7: Instanzierung von Technologien	110

1. Einleitung

Die jüngsten Wirtschaftskrisen in Europa zeigten klar, wie fragil das Wachstum diverser Ökonomien teilweise ist. Die drastischen realwirtschaftlichen Folgen und die europaweit initiierten Wachstumsprogramme verdeutlichen auch die praktische Notwendigkeit wachstumstheoretische Zusammenhänge besser verstehen zu müssen. Obwohl die Ursachen dieser Krisen primär auf den Finanzmärkten zu finden sind, führten sie mitunter dazu, dass die Suche nach den zentralen Wachstumsfaktoren die Wirtschaftswissenschaften wieder verstärkt beschäftigt. Aus theoretischer Sicht sind vor allem jene Faktoren von Interesse, die das Wachstum langfristig und unabhängig von monetären sowie fiskalen Aspekten bestimmen. Diese werden bereits seit Mitte des vergangenen Jahrhunderts von den unterschiedlichen Strömungen innerhalb der ökonomischen Theorie eingehend analysiert. Vorreiter bei der Analyse dieser Art von Fragestellungen ist die ökonomische Wachstumstheorie, die seit den 90er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts wieder einen Aufschwung erlebt.

Den Kern der Wachstumstheorie bilden die exogene (auch neoklassischen) und die endogene (auch neue) Wachstumstheorie. Die Entstehung der exogenen Wachstumstheorie wird häufig mit der Publikation einer Arbeit von Robert M. Solow (1956) gleichgesetzt. Die exogene Wachstumstheorie geht davon aus, dass das Niveau der gesamtwirtschaftlichen Produktion durch die Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit bestimmt wird, wobei die unterstellte Produktionstechnologie konstante Skalenerträge aufweist und die Produktionsfaktoren dem „Gesetz“ sinkender Grenzerträge unterliegen. Darüber hinaus wird von vollständiger Konkurrenz auf den Märkten ausgegangen (Gundlach, 2001; Hahn, 1993). Wachstum im Rahmen der neoklassischen Wachstumstheorie wird auf den ersten Blick primär von der Kapitalakkumulation bestimmt. Nur durch Kapitalakkumulation konnte das in der Praxis permanent verzeichnete Wachstum im Rahmen der Theorie jedoch nicht zufriedenstellend erklärt werden. Erst durch die Berücksichtigung technologischen Fortschritts als exogene Variable in den Modellen konnte die neoklassische Theorie den empirischen Beobachtungen gerecht werden.

Im Gegensatz zur exogenen Wachstumstheorie versucht die endogene Wachstumstheorie den technologischen Fortschritt aus den Modellen heraus, das heißt endogen, zu erklären (Aghion und Howitt, 1999 und 2009). Die endogene Wachstumstheorie baut im Wesentlichen auf den Annahmen der exogenen Wachstumstheorie auf, postuliert jedoch in der Regel steigende Skalenerträge sowie konstante oder steigende Grenzerträge in Bezug auf den Produktionsfaktor Kapital. Diese Annahmen resultieren primär aus der Ansicht, dass Wissen als Teil des gesamtwirtschaftlichen Kapitals gesehen werden muss. Die endogene Wachstumstheorie wird im Allgemeinen mit den Arbeiten von Romer (1986, 1990) assoziiert. Neben der exogenen und endogenen Wachstumstheorie gewinnt die evolutionäre Wachstumstheorie immer mehr an Bedeutung. Diese Strömung geht im Wesentlichen auf die Arbeit von Nelson und Winter (1982) zurück, hat jedoch ihre Wurzeln in den Theorien von Joseph A. Schumpeter (1912, 1939, 1943). Die evolutionäre Wachstumstheorie identifiziert analog der zuvor genannten Strömungen technologischen Fortschritt als zentralen Wachstumsfaktor. Im Gegensatz zu den anderen Strömungen betont die evolutionäre Wachstumstheorie jedoch durch technologischen Fortschritt ausgelöste Ungleichgewichte und forciert eine zyklische Betrachtungsweise der wirtschaftlichen Entwicklung. Aus der Sicht dieser Strömung befindet sich das Wirtschaftssystem häufiger im Ungleichgewichts- als im Gleichgewichtszustand. Die Evolution der Ökonomie wird im Wesentlichen von Entscheidungen von heterogenen Agenten mit beschränkter Rationalität auf der Mikroebene bestimmt. Innovationstätigkeit sowie die ständige Veränderung des Wissens der Agenten sind

die Triebkraft technologischen Fortschritts und der Grund warum Ökonomien wachsen (Potts, 2003).

Da die Wachstumstheorie keineswegs ein homogenes Feld repräsentiert, versuchen seit ein paar Jahren einige Autoren die Ansichten der unterschiedlichen Zweige der Wachstumstheorie zu vereinen und eine Art „Unified Growth Theory“ zu etablieren. Diese Strömung betont neben den bereits genannten Faktoren die Rolle des Lernens (siehe z. B. Tang, 2005) sowie Wissen als Quelle technologischen Fortschritts und räumt historischen Analysen mehr Raum in der wachstumstheoretischen Forschung ein. Ergebnisse dieser Strömung sind unter anderem, dass Wissen als eigenständiger Produktionsfaktor angesehen werden sollte und dass institutionelle sowie geografische Aspekte ebenfalls von Bedeutung sind.

Die zuvor erwähnten Strömungen identifizieren letztendlich mehrere Quellen für ökonomisches Wachstum, die im Wesentlichen eine Erklärung für die Konzentration der Wachstumstheorie in den theoretischen Modellen auf drei Produktionsfaktoren – Kapital, Arbeit und technologischen Fortschritt – sind.

Mokyr (1990, S. 4 ff.) identifiziert in diesem Zusammenhang Investitionen, Skaleneffekte, Handel und die Akkumulation von Wissen als Quellen ökonomischen Wachstums. Setzt man diese in Beziehung zu den Produktionsfaktoren, was von Mokyr nicht getan wird, so ergibt sich folgendes Bild.

Investitionen bestimmen die Kapitalakkumulation und stehen in direkter Beziehung zum Produktionsfaktor Kapital. Skaleneffekte treten häufig bei Populationswachstum auf und können daher mit dem Faktor Arbeit assoziiert werden. Handel und die damit verbundene kommerzielle Expansion sind eine weitere Quelle für Wachstum. Augenscheinlich geht es dabei um Arbeitsteilung und Spezialisierung im Sinne von Keynes. Einer immer stärkeren Arbeitsteilung und Spezialisierung liegt jedoch eine immer höhere Konzentration von Wissen und Fähigkeiten zu Grunde. Handel kann daher mit technologischem Fortschritt in Beziehung gesetzt werden. Das Wachstum von Wissen als letzte genannte Quelle steht augenscheinlich in direkter Beziehung zu technologischem Fortschritt. Jeder technologischen Veränderung liegt bei genauerer Betrachtung neues menschlichen Wissens zu Grunde.

Neben den von Mokyr (ibid.) genannten Ursachen sind im Licht der jüngsten weltweiten Finanzkrise natürlich auch monetären Ursachen für ökonomisches Wachstum, wie z. B. expansive Geld- und Kreditpolitik, zu nennen (siehe beispielsweise Aghion und Howitt, 2009, S. 129—150). Dabei handelt es sich jedoch um kurz- bis mittelfristig Wachstumsquellen. Langfristig wird Geld als neutral im Wirtschaftssystem betrachtet. Da hier die tiefen und langfristigen Faktoren für Wachstum analysiert werden, werden monetäre Aspekte hier nicht weiter diskutiert.

In Summe identifiziert die Wachstumstheorie somit 3 Produktionsfaktoren: 1) Kapital, 2) Arbeit und 3) technologischen Fortschritt. Welcher dieser Produktionsfaktoren spielt jedoch die wichtigste Rolle im Wachstumsprozess?

Die Bedeutung des Faktors Kapital liegt augenscheinlich auf der Hand. Ein höherer Kapitalinput ermöglicht im Rahmen der Produktion einen höheren Output. Die Bedeutung der Kapitalakkumulation muss jedoch relativiert werden, da bereits die neoklassische Wachstumstheorie zeigte, dass kontinuierliches Wachstum nur durch reine Kapitalakkumulation insbesondere auf Grund von sinkenden Grenzerträgen des Faktors Kapital nicht möglich ist (Gundlach, 2001, S. 178). Diese ursprünglich theoretische Erkenntnis wird heute von den Ergebnissen der meisten empirischen Untersuchungen gestützt. Diese zeigen, dass der überwiegende Anteil des Wachstums der Industrieländer auf technologischen Fortschritt zurückzuführen ist. Diese Forschungsergebnisse stehen auch im Einklang mit den in der Praxis verzeichneten schwachen Wachstumsraten ressourcenstarker Länder (wie z. B. Afrika). Der Faktor Kapital ist daher mit großer Wahrscheinlichkeit nicht

der „Schlüssel“ zu uneingeschränktem Wachstum. Ein ähnliches „Schicksal“ ereilt den Faktor Arbeit. Ein immer höherer Arbeitsinput gewährleistet ebenfalls nicht kontinuierliches Wachstum. Mit anderen Worten, das in den Industrieländern verzeichnete Wachstum wird verhältnismäßig nur zu einem kleinen Anteil von der Akkumulation der physischen Faktoren Kapital und Arbeit bestimmt (siehe beispielsweise Xingyuan, 2009; Smith, 2002 oder OECD, 1996).¹ Der Großteil dieses Wachstums wird durch technologischen Fortschritt generiert. Die Quelle technologischen Fortschritts ist neues (technologisches) Wissen. Aus diesem Grund ist ein genaues Verständnis der Beziehung zwischen Wissen, technologischem Fortschritt und ökonomischem Wachstum unerlässlich.

Obwohl sich die theoretische und empirische Forschung schon seit längerem mit unterschiedlichen Fragestellungen in Bezug auf technologischen Fortschritt auseinandersetzt, ist ein genaues Verständnis über dessen Natur bis jetzt nur teilweise gegeben. Dies hat unterschiedliche Gründe, wobei 4 vorrangig zu nennen sind. 1) In der theoretischen Forschung und im Speziellen in der endogenen Wachstumstheorie wird häufig die im Rahmen der gesamtwirtschaftlichen Produktion verwendete Technologie mit dem verfügbaren Stock an Wissen gleichgesetzt, ohne eine tiefgehende Analyse der Struktur von Wissen vorzunehmen. 2) Vor allem die Modelle der endogenen Wachstumstheorie lassen sich teilweise nur schwer empirisch überprüfen. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass es kein allgemein akzeptiertes Konzept gibt, welches es erlaubt Wissen zu quantifizieren. 3) Die Analyse makroökonomischer Effekte von neuem Wissen erfordert die Analyse des Entstehungsprozesses von neuem Wissen auf der Mikroebene. Dies bedingt jedoch eine direkte Auseinandersetzung mit der Struktur und dem Wachstum von Wissen auf der Ebene der ökonomischen Agenten. 4) In den meisten Arbeiten wird keine genaue Definition von Wissen vorgenommen. Beispielsweise wird in der Regel nicht zwischen Informationen und Wissen differenziert. In der Folge sind Phänomene rund um das Internet oder rund um das Mobiltelefon teilweise nur schwer mit existierenden ökonomischen Theorien in Einklang zu bringen.

Die grundsätzliche Beziehung zwischen Wissen und Wachstum lässt sich wie folgt zusammenfassen: Wissensaufbau und die Anwendung von neuem Wissen im Rahmen der ökonomischen Produktion führt vorrangig zu zwei Effekten. Auf der einen Seite kommt es zu einer Steigerung der Produktivität auf Grund des neuen Wissens bei der Produktion von Gütern und Dienstleistungen. Das neue Wissen führt somit zu verbesserten Technologien. Unternehmen sind in der Lage mit neuem Wissen effizienter zu produzieren bzw. mehr (gleichen) Output mit gleichem (weniger) Input zu produzieren. Auf der anderen Seite führt neues Wissen zu Innovationen in den unterschiedlichsten Bereichen. So resultiert der Wissensaufbau häufig in Produkt-, Prozess- oder Organisationsinnovationen. In Abhängigkeit von der Art, der Verbreitung sowie dem Anwendungsgebiet der Innovationen können diese selbst Produktivitätssteigerungen bewirken. Insbesondere Prozessinnovationen sowie Innovationen in Bezug auf Organisationsformen haben oftmals produktivitätssteigernde Effekte. Aber auch Produktinnovationen können gravierende Veränderungen im Wirtschaftsgefüge bewirken. Besonders massive Innovationen – sogenannte radikale Innovationen oder Basisinnovationen – sind in der Lage Wirtschaftssektoren strukturell zu verändern oder sogar neue Sektoren zu schaffen. Unter Basisinnovationen sind beispielsweise die Eisenbahn, das Flugzeug oder der Computer zu verstehen.

Die Veränderung der Produktivität und das Phänomen der Innovationen sind Resultate technologischen Fortschritts, der seinen Ursprung in neuem Wissen hat. Das Wissen zur Steigerung der Produktivität resultiert häufig aus gesteigerter Erfahrung im Zuge der wirtschaftlichen Tätigkeit. Das Wissen, welches in Innovationen resultiert, ist oft das Ergebnis von Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, welche einerseits von Unternehmen

¹ Die Rolle technologischen Fortschritts in Bezug auf Wachstum wird auch immer stärker in populärwissenschaftlichen Arbeiten betont. Siehe beispielsweise Clement (2006, S. 357 f.).

und andererseits von Universitäten sowie Forschungseinrichtungen gezielt gesetzt werden. Letztere schaffen primär die theoretische Basis um Innovationen hervorzubringen. Unternehmen schaffen — getrieben vom ökonomischen Wettbewerb — eine Basis von Erfahrung und praktischem Wissen, um Innovationen in die Praxis umzusetzen. Der Staat hat wirtschaftlich gesehen ein vitales Interesse an diesen Aktivitäten und muss diese sowohl durch die Errichtung besonders abgestimmter Programme als auch durch die Etablierung spezieller Institutionen fördern. Das nationale Zusammenspiel der Unternehmen, der Hochschulen und des Staates zur Förderung der Innovationstätigkeit bezeichnet man als nationales Innovationssystem (Antonelli und Amidei, 2011; Karlsson et al., 2012; Greenhalgh und Rogers, 2010).

In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass die Fähigkeit neues Wissen zu schaffen und anzuwenden in enger Beziehung mit der Wettbewerbsfähigkeit steht. Dies gilt sowohl für die mikroökonomische als auch für die makroökonomische Ebene. Karlsson et al. (2012, S. 5) weisen beispielsweise darauf hin, dass das Vorhandensein technologischen Wissens ein kritischer Faktor in Bezug auf die Erhaltung und Weiterentwicklung der Wettbewerbsfähigkeit auf der Mikro- und der Makroebene ist. Sowohl Firmen als auch ganze Länder sind gezwungen neues Wissen zu schaffen oder zu absorbieren um daraus technologischen Fortschritt zu generieren. Dies ermöglicht es ihnen die Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu erhalten

Das durch die unterschiedlichsten Aktivitäten der diversen Akteure geschaffene Wissen forciert technologischen Fortschritt. Dieser bringt Innovationen mit unterschiedlichen Auswirkungen hervor und führt zu einer Verschiebung der Produktionsmöglichkeitengrenze (siehe z. B. Mokyr, 1990 oder Dang, 2007) auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. Die Quelle verbesserter oder neuer Technologien ist somit neues Wissen. Durch die Verschiebung der Produktionsmöglichkeitengrenze kommt es zu einer Outputsteigerung ohne den Input quantitativ zu verändern. Wachstum ist schlussendlich die Folge von neuem Wissen (Mokyr, 1990, 2002b; Metcalfe, 2001).

Angesichts dieser Zusammenhänge verwundert es, dass sich die Wachstumstheorie nicht intensiver mit der Struktur von Wissen sowie deren Beziehung zu technologischem Fortschritt auseinandersetzt. Ein besseres Verständnis dieses Zusammenhangs ist von zentraler Bedeutung für die ökonomische Theorie — insbesondere für die Wachstumstheorie.

In diesem Kontext wird teilweise argumentiert, dass nicht das gesamte Wissen der in der Ökonomie zur Verfügung stehenden Wissensbasis auch ökonomisch nützlich ist. Acs et al. (2007) haben in diesem Zusammenhang beispielsweise das Konzept des Wissensfilters eingeführt. Dieser beschreibt die Tatsache, dass nicht jedes neue Wissen automatisch Wachstumseffekte bewirkt. Nicht jede Wissenseinheit ist sozusagen in der Lage den Filter zu passieren und ist somit auch nicht aus ökonomischer Perspektive nützlich. Es existieren daher Schranken, die Wissen daran hindern können Einfluss auf die Produktionsmöglichkeitengrenze zu nehmen. In der Folge trägt dieses Wissen auch nicht zum Wirtschaftswachstum bei. Diese unsichtbare Barriere in Form des Wissensfilters betont auch, die Rolle unterschiedliche Arten von Wissen. In der ökonomischen Literatur wird in diesem Zusammenhang insbesondere zwischen kodifiziertem und stillem Wissen differenziert.

Kodifizierbares Wissen steht für jenes Wissen, welches von Menschen beispielsweise in Form von Büchern oder als Dateien auf Festplatten kodifiziert und weitergegeben werden kann. In der jüngeren Geschichte verzeichnete man vor allem in den Industrieländern einen massiven Anstieg an kodifiziertem Wissen. Dies steht in engem Zusammenhang mit der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT).

Unter stillem Wissen wird im Allgemeinen jenes Wissen verstanden, welches überhaupt nicht oder nur mit enormem Aufwand kodifiziert werden kann. Praktische und handwerkliche Fähigkeiten oder soziales Wissen sind nur ein paar Beispiele für diese Art von Wissen.

Dessen Aufbau wird primär durch Erfahrung (bzw. „learning by doing“) sowie direkte menschliche Interaktion beispielweise im Rahmen einer Ausbildung forciert. Da beide Arten zumindest theoretisch kodifiziert werden können, sollte man diese Arten eher als explizites und implizites Wissen bezeichnen (Dang, 2007; Cowan et al., 1999; für eine kritischere Sichtweise zur Frage der Kodifizierbarkeit siehe Langlois, 2000).

In der Regel wird davon ausgegangen, dass vor allem kodifiziertes Wissen für das ökonomische Wachstum relevant ist. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass aus der Sicht vieler Ökonomen vor allem das Auftreten von Externalitäten in Zusammenhang mit kodifiziertem Wissen entscheidend ist. Das beispielsweise von einem Unternehmen aufgebaute Wissen kann im Rahmen der Produktion anderer Unternehmen angewendet werden. Dieses neue Wissen kann somit ohne zusätzliche Kosten und ohne das Unternehmen, welches das Wissen geschaffen hat, zu beschränken eingesetzt werden. Durch die Schaffung von Wissen durch ein einziges Unternehmen kann es somit zu positiven externen Effekten für andere Unternehmen kommen. Wissen hat daher (zumindest teilweise) den Charakter eines öffentlichen Gutes. Durch dessen spezielle Eigenschaft werden Externalitäten generiert, die dazu führen können, dass andere Unternehmen produktiver werden ohne dafür in F&E investiert zu haben. Setzt sich dieser Prozess oft genug fort, kann es auf gesamtwirtschaftlicher Ebene zu massiven Wachstumseffekten kommen. Üblicherweise spricht man in diesem Zusammenhang von einem *knowledge spillover*. Deren Existenz führt jedoch auf Grund mikroökonomischer Beweggründe der Unternehmen zu der Situation, dass diese zu wenig in den Wissensaufbau und in F&E investieren. Dies ist insofern verständlich, da ja die Gefahr besteht, dass sie nicht oder nur teilweise „die Früchte ihrer Arbeit ernten“ könnten.

Dabei gilt es zu beachten, dass stilles Wissen nicht oder nur teilweise der spillover-Problematik unterliegt. Aus ökonomischer Perspektive betrachtet repräsentiert stilles Wissen eher ein privates und kein öffentliches Gut (siehe auch Hahn, 1993, S. 434). In Bezug auf die wirtschaftliche Produktion gilt, dass jede Art von kodifiziertem Wissen bestimmtes stilles Wissen erfordert. Dieses ist für den effizienten Einsatz und die Integration von kodifiziertem Wissen entscheidend (Antonelli und Amidei, 2011, S. 87). Vorsichtig kann daher gesagt werden, dass die Rolle von stillem Wissen in Bezug auf ökonomisches Wachstum teilweise unterschätzt wird, wobei diese eine genaue Definition von stillem Wissen voraussetzt (Balconi et al., 2007; Dosi und Grazzi, 2010; Cowen et al.; 1999).

Die Menge an wissenschaftlichen Publikationen, in denen die ökonomische Bedeutung von Wissen betont wird, ist enorm. Der viel zitierte Begriff der *knowledge economy* ist nur ein Beleg für die steigende Relevanz von Wissen innerhalb der Ökonomie (siehe beispielweise OECD, 1996; Europäische Union, 2009; Smith, 2002 oder Xingyuan, 2009). Die Gründe für diese höhere Relevanz sind vielschichtig. In erster Linie ist Wissen als Quelle technologischen Fortschritts von Bedeutung. Darüber hinaus steht technologisches Wissen im engen Zusammenhang mit der Revolution der IKT — insbesondere das zuvor angesprochene technologische Wissen, welches verhältnismäßig einfach in Form von Algorithmen formulierbar ist.

Als Quelle technologischen Fortschritts brachte neues Wissen auch die IKT als solches hervor. Die IKT hat auf der einen Seite realwirtschaftliche Effekte produziert und auf der anderen Seite die Bedeutung von Wissen als eigener Wirtschaftsfaktor verdeutlicht. Smith (2002) argumentiert beispielweise, dass die Bedeutung von Wissen als Produktionsfaktor auf Grund der IKT-Effekte im Wirtschaftssystem gestiegen ist. Der Einfluss der IKT auf die Wirtschaft ist im Großen und Ganzen noch unzureichend erforscht.

Ein Problem der Wachstumstheorie bei der Erklärung technologischen Fortschritts besteht mitunter darin, dass keine klare Trennung zwischen Informationen und Wissen vorgenommen wird. In Bezug auf die Wirkungsweise der IKT ist dies jedoch notwendig. So haben beispielweise Mobiltelefone und das Internet den Zugang und die Verbreitung von

Informationen massiv verändert (siehe beispielsweise Licht, 2009, S. 32 oder Mokyr, 2002b, S. 113 f.). Insbesondere wurden die Zugangskosten zu Informationen massiv reduziert. Dies bedeutet jedoch noch nicht automatisch, dass dies auch den Wissensaufbau uneingeschränkt positiv beeinflusst hat. Ebenso ist der positive Einfluss auf das Wirtschaftswachstum im Sinne positiver Effekte auf Produktivität und Innovationstätigkeit kritisch zu beurteilen. Dies spiegelt sich auch in dem von Solow angesprochenen *Produktivitätsparadoxon* (Solow, 1987; Crafts, 2003) wider. Im Kern besagt dieses, dass die produktivitätssteigernden Effekte der IKT nur sehr schwer empirisch belegbar sind.

Die Erklärung der Wirkungsweise der IKT erfordert somit von der Ökonomie teilweise neue Analyseansätze und Modelle.

Auf der Mikroebene müssen die Auswirkung der IKT auf die Informationsverarbeitung der Agenten und der Zusammenhang zur Akkumulation ihres Wissens berücksichtigt werden. Dies bedeutet eine explizite Auseinandersetzung mit der Informationsverarbeitung sowie der Struktur von Wissen auf der Ebene der ökonomischen Agenten. Da neues Wissen das Ergebnis eines Lernprozesses ist, kann eine enorme Steigerung der zur Verfügung stehenden Informationen unterschiedliche Effekte haben. Insbesondere wenn Informationsverarbeitungskapazitäten beschränkt sind. In diesem Zusammenhang ist zu analysieren, wie ökonomische Agenten technologische und damit wirtschaftliche Probleme lösen und wie dies zu technologischem Fortschritt führt.² Arthur (2000) betont, dass Menschen im Wesentlichen auf Basis von Mustern im Rahmen der Wahrnehmung ökonomische und somit auch technische Probleme lösen. Dieser Prozess ist für ein genaueres Verständnis für die Beziehung zwischen technologischem Fortschritt und Wachstums von signifikanter Bedeutung. Die IKT hat dabei durch einen immer leichteren Zugang zu Informationen die Rahmenbedingungen verändert. Dies führt auch zu Veränderungen auf der Makroebene.

Mokyr (2002b, S. 113) weist darauf hin, dass die IKT eine Art Wissenstechnologie repräsentiert. Informationen über bestehendes Wissen werden durch die IKT immer kostengünstiger und schneller zugänglich und sie ermöglicht die Verarbeitung von Informationen aus unterschiedlichen Wissensbereichen mittels Software. Dadurch beeinflusst die IKT jede bereits vorhandene und verwendete Technologie. Die IKT geht sozusagen Symbiosen mit bestehenden Technologien ein. Man kann somit argumentieren, sowie beispielsweise Greenhalgh und Rogers (2010, S. 154), dass eine enge Beziehung zwischen Wissen und der IKT besteht. Diese Beziehung spielt eine immer wichtigere Rolle im Prozess technologischen Fortschritts.

Des Weiteren hat der rasche technologische Fortschritt innerhalb der IKT auf gesamtwirtschaftlicher Ebene zu einer immer stärkeren Nachfrage nach wissensbasierten Gütern und Dienstleistungen geführt. Die Folge ist ein vergleichsweise starkes Wachstum der betroffenen Sektoren und eine Konzentration der Arbeitskräfte in diesem Bereich (OECD, 2010; Hanappi, 2008a; siehe auch Hanappi 2011a). Dies ist jedoch nur eine Seite der Medaille. Offensichtliche Aspekte wie der Gewinn der IKT-Sektoren auf Kosten der industriellen Sektoren oder der gestiegene Wettbewerbsdruck der Unternehmen auf Grund geringerer Zugangskosten zu (Preis)-Informationen sind die andere. Ein nicht so klar ersichtlicher Aspekt wird dabei oft übersehen. Der Zwang der Individuen immer rascher Informationen auszuwerten und neues Wissen aufzubauen hat einerseits zu einer gestiegenen Bedeutung von Bildung und andererseits auch zu einer Diskrepanz zwischen der Mikro- und der Makroebene geführt. Technologischer Fortschritt bedeutet auch häufig einen Umbruch. Dieser Prozess der Veränderung ist nicht kostenfrei und üblicherweise immer mit gewissen Hürden verbunden. Dies betrifft sowohl die Mikro- als auch die Makroebene. Allerdings sind

² Für eine allgemeine Diskussion aus spieltheoretischer Perspektive siehe beispielsweise Berninghaus et al. (2002). Für ganz allgemeine Überlegungen zu diesem Thema im Zusammenhang mit den Arbeiten von Kurt Gödel siehe Sigmund et al. (2006).

die Aufwände auf der Mikroebene geringer und die Hürden schneller überwunden. Der technologische Wandel auf der Makroebene vollzieht sich daher häufig langsamer als auf der Mikroebene. Mokyr (1990, S. 275—277) deutet in diesem Zusammenhang an, dass die Kosten technologischen Fortschritts auf der Mikroebene geringer sind als auf der Makroebene.

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass die IKT auf der Makroebene eine Art Trennung der Wirtschaft in zwei Welten bewirkt hat (Arthur, 1996; Cortright, 2001; Bailey, 2007). Auf der einen Seite existiert die produzierende Industrie, die im Wesentlichen nach den ökonomischen Gesetzmäßigkeiten der neoklassischen Wachstumstheorie funktioniert. Produzenten versuchen mit den zur Verfügung stehenden Inputfaktoren, die dem „Gesetz“ des sinkenden Grenzertrages unterliegen, ihren Output bzw. ihren Gewinn zu maximieren. Auf der anderen Seite existiert die IKT-Welt. Diese Wirtschaftssektoren werden von anderen „Gesetzmäßigkeiten“ bestimmt, als die klassische Industrie. Phänomene wie Skaleneffekte, steigende Grenzerträge, Lock-In- sowie System-Effekte verdeutlichen den Bedarf einer veränderten Herangehensweise in der Analyse. Varian (2001) zeigt allerdings auch, dass die etablierten Wirtschaftstheorien durchaus — bei leichter Adaptierung vorhandener Modelle — die ökonomischen Prozesse innerhalb der IKT-Welt zufriedenstellend erklären können.

Schlussendlich ist anzuführen, dass durch die IKT die Bedeutung von Netzwerken und insbesondere von Netzwerkstrukturen gestiegen ist. Technologische und ökonomische Systeme werden heute vielfach durch Netzwerkstrukturen bestimmt. Das Internet ist hierfür wohl das prominenteste Beispiel.

In Summe kann argumentiert werden, dass innerhalb der Wachstumstheorie Konsens über die enorme Bedeutung technologischen Fortschritts existiert, allerdings herrscht ein gewisser Dissens über die genauen Quellen und die Struktur dieses Prozesses. Auf Grund der unzureichenden Auseinandersetzung mit der engen Beziehung zwischen Wissen und Technologie durch die Wachstumstheorie wird in diese Dissertation einen anderen Ansatz verfolgt. Diese Arbeit setzt sich explizit mit der Struktur und der Akkumulation von Wissen auseinander, um ein besseres Verständnis des Zusammenhangs zwischen Wissen, technologischem Fortschritt und ökonomischem Wachstum zu erzielen. Auf Basis einer genauen Analyse der zentralen Beiträge der exogenen, endogenen und evolutionären Wachstumstheorie sowie der Netzwerktheorie wird dazu ein Framework zur Analyse technologischen Fortschritts für die ökonomische Makro- und Mikroebene erarbeitet, wobei die enge Beziehung zwischen Wissen und Technologie im Fokus steht. Der Rolle der IKT und ihrer Funktion als Wissenstechnologie wird dabei besondere Beachtung geschenkt.

Die in einer Ökonomie verfügbaren Technologien sowie das verfügbare Humankapital stehen in der Analyse auf der Makroebene im Fokus. Zur Analyse der Veränderung dieser Größen wird hierfür ein Modell auf Basis einfacher Differentialgleichungen erarbeitet. Dabei wird argumentiert, dass die Veränderung der gesamtwirtschaftlichen Technologie entscheidend durch die Kombination bestehender sowie durch die Entwicklung völlig neuer Technologien bestimmt wird. In Bezug auf die Veränderung des Humankapitals wird hingegen argumentiert, dass dieses eine Kombination aus explizitem und implizitem Wissen ist. Ersteres resultiert vorrangig aus Bildung und letztes primär aus beruflicher Erfahrung.

Die Mikroebene des Frameworks geht noch tiefer in der Analyse und setzt sich explizit mit der Struktur von Wissen und der Informationsverarbeitung ökonomischer Agenten auseinander. Im Zuge dessen wird eine direkte Beziehung zwischen Wissen und Technologie im Rahmen eines Modells hergestellt. Dabei wird insbesondere die Rolle des internen Modells ökonomischer Agenten betont, mit dessen Hilfe diese wirtschaftliche Problemstellungen lösen. Im Detail lässt sich die Struktur dieses internen Modells durch ein skalenfreies Netzwerk beschreiben, dessen Knoten Techniken bzw. Wissensentitäten repräsentieren. Technologien sind in der Folge als Wissensstrukturen des internen Modells zu

verstehen, die sich aus einzelnen Techniken zusammensetzen. Das Wachstum dieses Netzwerkes bzw. des internen Modells wird durch Bildung und berufliche Erfahrung bestimmt, wobei ein evolutionärer Prozess eine zentrale Rolle spielt.

Die Arbeit ist wie folgt gegliedert. Nach der Einleitung in Kapitel 1 wird in Kapitel 2 der Zusammenhang zwischen den Begriffen Wissen und Technologie aus der Perspektive der ökonomischen Theorie im Detail analysiert. Kapitel 3 gibt einen Überblick über die aktuellsten Forschungsergebnisse der exogenen, endogenen und evolutionären Ökonomie, wobei im Speziellen deren Annahmen und Ergebnisse in Relation zur Kritik an den Strömungen gesetzt wird. Kapitel 4 beleuchtet eingehend die Sichtweise der genannten Strömungen in Bezug auf technologischen Fortschritt. Kapitel 5 gibt einen kurzen empirischen Überblick über die wichtigsten Wachstums- und Technologieindikatoren für Europa. Kapitel 6 setzt sich anschließend mit den Begriffen Growth Accounting und Totale Faktorproduktivität im Detail auseinander. In Kapitel 7 werden die unterschiedlichen Arten und Definitionen von Wissen analysiert. Kapitel 8 beleuchtet im Detail den Einfluss sowie die Rolle der IKT innerhalb der Wirtschaft. Dabei wird insbesondere die Rolle des Internets und des Mobiltelefons analysiert und die enorme Bedeutung von Netzwerkstrukturen innerhalb der IKT und der Ökonomie aufgezeigt. Dazu wird in kompakter Form auf die wichtigsten Ergebnisse der Netzwerktheorie eingegangen. In Kapitel 9 wird aufbauend auf den Analysen und Ergebnissen der vorangegangenen Kapitel ein Framework zur Analyse technologischen Fortschritts für die Makro- und Mikroebene erarbeitet, welches eine direkte Beziehung zwischen Wissen und Technologie herstellt. Der Analyse der Rolle der IKT wird dabei im gesamten Framework besondere Beachtung geschenkt. Darüber hinaus wird ein allgemeines Konzept für eine agentenbasierte Simulation für das Modell der Mikroebene erarbeitet, welches als Basis für weiterführende Arbeiten dienen kann. Kapitel 10 inkludiert die persönliche Meinung sowie Schlussfolgerungen für die Wirtschafts- und Bildungspolitik. Kapitel 12 enthält das Literaturverzeichnis. Kapitel 13 enthält einen kurzen Lebenslauf.

2. Wissen und Technologie in der ökonomischen Theorie

Der Zusammenhang zwischen Wissen und Technologie aus der Sicht der ökonomischen Theorie steht im Fokus dieses Kapitels. Wenn Ökonomen von Wissen sprechen, dann beziehen sie sich in der Regel indirekt auf den Begriff der Technologie und haben technologisches und daher ökonomisch relevantes Wissen im Sinn. Häufig werden die Begriffe Wissen und Technologie daher synonym benutzt.

Um Güter und Dienstleistungen zu produzieren ist bestimmtes Wissen erforderlich. Produktionstechniken sind im Wesentlichen Instruktionen für die Kombination unterschiedlichster Rohstoffe um ein bestimmtes Endprodukt zu generieren. Das Wissen über diese Kombinationsmöglichkeiten ist essentiell für die wirtschaftliche Produktion. Naturgesetze beschränken in der Regel den maximal zu erzielenden Output für eine gegebene Inputmenge. Dabei handelt es sich um von der Natur aus auferlegte technologische Beschränkungen (Varian, 1999, S. 304). Neues Wissen spielt bei der Überwindung dieser Beschränkungen eine zentrale Rolle. Wissen, welches auf unterschiedliche Arten wie z. B. im Laufe der täglichen Arbeit oder gezielt durch Investitionen in F&E geschaffen wird, ist in der Lage verbesserte Instruktionen (Romer, 1990) hervorzubringen. Immer bessere Techniken erlauben es uns höheren (gleichen) Output mit gleichbleibendem (geringerem) Input im Rahmen der wirtschaftlichen Produktion zu erzielen. Neues Wissen ist somit die Grundlage technologischen Fortschritts (Mokyr, 1990). Dies gilt gleichermaßen für die Produktion auf mikroökonomischer und makroökonomischer Ebene.

Der Begriff der Technologie hat seinen Ursprung in der Mikroökonomie (Varian, 1999; Kistner und Steven, 1999). Er bezieht sich primär auf die Produktionsbeziehung zwischen dem Input und dem Output und deren technologische Eigenschaft. Die funktionale Beziehung der Inputfaktoren mit dem Output wird üblicherweise formal durch eine Produktionsfunktion beschrieben. Die Frage nach der expliziten Form dieser Funktion ist oft sekundär steht jedoch im direkten Zusammenhang mit den unterstellten technologischen Eigenschaften der Produktionsbeziehung. Eine Produktionsfunktion definiert somit eine technische Beziehung zwischen den Inputfaktoren und dem Output und weist stets bestimmte Eigenschaften auf. Diese Eigenschaften spiegeln sich in unterschiedlichen Produktionsfunktionen wider.

Eine zentrale Eigenschaft ist beispielweise das Monotonieverhalten. Der Begriff der Monotonie bringt in diesem Zusammenhang zum Ausdruck, dass mit einer Erhöhung des Inputs zumindest der gleiche Output wie zuvor erzielt werden kann. Ebenso ist von besonderem Interesse, wie der Output auf eine gleichmäßige Erhöhung aller Inputfaktoren reagiert. Diese Eigenschaft wird mit dem Begriff der Skalenerträge angesprochen. Des Weiteren ist die Frage nach der Reaktion des Outputs auf eine marginale Veränderung eines bestimmten Inputfaktors bei Konstanz der übrigen Faktoren relevant. Dies wird unter dem Grenzertrag des jeweiligen Produktionsfaktors verstanden. Die Summe der Eigenschaften charakterisiert eine bestimmte Technologie (Varian, 1999, S. 303—315; Blanchard, 2003, S. 212—218; Otruba et al, 1996, S. 94—108).

Im mikroökonomischen Kontext bezieht sich der Begriff der Technologie häufig auf eine einzelne bestimmte Produktionstechnik für ein bestimmtes Gut sowie die technologischen Eigenschaften dieser Technik.

Im makroökonomischen Kontext bezieht sich der Technologiebegriff üblicherweise auf die funktionale Beziehung der gesamtwirtschaftlichen Produktionsfaktoren und deren Eigenschaften. Ökonomen und im Speziellen Wachstumstheoretiker sind somit vorrangig an der technischen Beziehung der hoch aggregierten Produktionsfaktoren interessiert. Auf der Makroebene repräsentieren die Inputfaktoren allgemein gehaltene Aggregate wie Kapital und Arbeit. Auf der Mikroebene hingegen repräsentieren einzelne Rohstoffe und Zwischengüter die Inputfaktoren. In diesem Zusammenhang weist Hirshleifer (2001, S. 15) darauf hin, dass das Design und der Entwurf einer Technik auf der Mikroebene im Allgemeinen in den

Händen der Ingenieure sowie Techniker liegt. Der effiziente ökonomische Einsatz fällt in den Zuständigkeitsbereich des jeweiligen Unternehmers. Im Gegensatz dazu beschäftigen sich Wachstumstheoretiker primär mit der „Makrotechnologie“ der Produktion.

Hierbei gilt es darauf hinzuweisen, dass in den theoretischen Modellen der Makroökonomie in der Regel das Konzept einer repräsentativen Firma zur Anwendung kommt und eine bestimmte Produktionstechnologie für die gesamte Ökonomie unterstellt wird, wodurch die Grenzen der mikroökonomischen und makroökonomischen Bedeutung des Begriffs fließend sind.

Die Verwendung einer Produktionsfunktion als zentraler Modellbaustein in makroökonomischen Analysen ist im Wesentlichen Robert Solows Verdienst. Solow (1956) stimulierte die Makroökonomie dadurch, dass er das Konzept der Produktionsfunktion mit den Eigenschaften einer Cobb-Douglas-Technologie (Details siehe weiter unten) kombinierte und zur Analyse des gesamtwirtschaftlichen Wachstumsprozesses nutzte (Crafts, 2008). Das Konzept der Produktionsfunktion bildet somit heute einen zentralen Bestandteil der Wachstumstheorie und dient zur Analyse der Produktionszusammenhänge auf gesamtwirtschaftlicher Ebene.

Bei der Analyse von makroökonomischen Wachstumsprozessen ist man im ersten Schritt an den prinzipiellen Eigenschaften der Technologie interessiert. Primär stehen somit Aspekte wie die Eigenschaft der Monotonie, der Skalenerträge sowie der Grenzerträge im Vordergrund. Im zweiten Schritt ist man an der expliziten Form der Produktionsfunktion interessiert. Dies gilt im Wesentlichen auch für die Mikroökonomie. Allerdings ist man dort stärker an der exakten Beziehung der einzelnen Inputs interessiert.

In Bezug auf die gesamtwirtschaftliche Produktion kann unter dem Begriff der Technologie somit ein Aggregat verstanden werden, welches die Menge an in der Ökonomie zur Verfügung stehenden Produktionstechniken, die zur Herstellung von Gütern und Dienstleistungen eingesetzt werden, umfasst (Greenhalgh und Rogers, 2010, S. 6). Die unterschiedlichen Techniken der Firmen bilden somit die einzelnen Bestandteile dieses Aggregats. Diese aggregierte Technologie weist bestimmte Eigenschaften auf, die letztendlich den in einer Ökonomie maximal zu erzielenden Output bestimmen. Durch die Technologie ist somit auch immer eine Produktionsmöglichkeitengrenze gegeben.

Dabei gilt es zu beachten, dass der auf der Makroebene gegebene funktionale Zusammenhang zwischen den Inputfaktoren und dem Output nicht dem funktionalen Zusammenhang auf der Mikroebene entsprechen muss. Die Beziehung der aggregierten Produktionsfaktoren ist im Allgemeinen eine andere als die Beziehung der Produktionsfaktoren auf der Ebene eines einzelnen Unternehmens. In der Folge können sich auch die Eigenschaften der Technologie unterscheiden.

In Summe gilt jedoch, dass sowohl das Produktionsniveau eines einzelnen Unternehmens als auch der Output einer ganzen Volkswirtschaft maßgeblich von der verwendeten Technologie abhängig sind.

Technologischer Fortschritt kann als jener Prozess verstanden werden, bei dem es durch die Anwendung von neuem Wissen zu einer Verbesserung der Technologie kommt. Dies kann entweder die Einführung einer völlig neuen Technologie bedeuten oder eine Verbesserung der bestehenden Technologie. In beiden Fällen spielt die Kombination bestehender Techniken sowie deren Rekombination eine zentrale Rolle (Arthur und Polak, 2004).

Auf mikroökonomischer Ebene ist technologischer Fortschritt in der Regel als Etablierung einer völlig neuen Technologie durch die Anwendung neuer Techniken zu verstehen. Auf makroökonomischer Ebene ist unter technologischem Fortschritt zunächst eine positive Veränderung der gesamtwirtschaftlichen Produktionsbeziehung zu verstehen. In beiden Fällen kommt es zu einer Verschiebung der Produktionsmöglichkeitengrenze und daher zu einer

Erhöhung des maximal zu erzielenden Outputs. Im ersten Fall gilt dies für das jeweilige Unternehmen im zweiten Fall für die gesamte Ökonomie.

Technologische Erfindungen oder Entdeckungen sind gleichbedeutend mit einem Anstieg des zur Verfügung stehenden Wissens. Unternehmergeist gepaart mit der Aussicht auf monopolartige Profite transformiert dieses neue Wissen in Innovationen. Eine Innovation kann somit als die ökonomische Anwendung von neuem Wissen verstanden werden. Dabei sind monopolartige Profite in der Regel das primäre Ziel der handelnden Akteure (siehe auch Corthright, 2001, S. 13 ff.). Letztendlich können Innovationen als Indikatoren technologischen Fortschritts interpretiert werden. Je größer ihre Verbreitung ist, desto größer ist auch ihr wirtschaftlicher und technologischer Einfluss. Ihr Wirkungsgrad ist wiederum richtungweisend für zukünftigen technologischen Fortschritt und das in der Folge induzierte Wirtschaftswachstum. Dabei gilt es zu beachten, dass dies ein Prozess ist, der auf der Mikroebene beginnt und auf der Makroebene endet. Neues Wissen wird von einzelnen Individuen auf der Mikroebene geschaffen und mündet auf der Makroebene in einem höheren Output.

In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob technologischer Fortschritt ein kontinuierlich oder diskontinuierlich Prozess ist. Die ökonomische Standardtheorie unterstellt auf der Makroebene in der Regel einen kontinuierlichen technologischen Fortschritt bzw. eine Veränderung. Innovationstheorien unterstellen üblicherweise diskontinuierlichen Fortschritt. Beide Formen sind in der Praxis beobachtbar. Dabei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen. Je länger man den betrachteten Zeithorizont wählt und je größer die Betrachtungsperspektive ist, umso eher ergibt sich ein kontinuierliches Bild technologischen Fortschritts. Je kürzer der Zeithorizont und umso kleiner die analysierten Einheiten gewählt werden, desto eher zeichnet sich ein diskontinuierliches Bild ab. Auf der Makroebene mag die Annahme eines mehr oder weniger kontinuierlichen Fortschritts gerechtfertigt sein. Auf der Mikroebene dominiert jedoch die plötzliche Veränderung. Ayres und Warr (2009, S. 39 f.) argumentieren beispielweise, dass Diskontinuität ein zentrales Merkmal aller Arten technologischen Fortschritts ist. Da das makroökonomische System jedoch viel langsamer auf technologische Veränderungen reagiert, entsteht auf der Makroebene der Eindruck eines kontinuierlichen technologischen Fortschritts. Aus diesem Grund wird auch in den meisten Modellen der Makroökonomie technologischer Fortschritt als kontinuierlicher Prozess modelliert.

Wissen wird in diesem Kontext häufig als Synonym für den Begriff der Technologie verwendet. Die synonyme Verwendung der Begriffe geht mitunter auf Romer (1986) zurück. Er verwendete als einer der ersten in seiner Arbeit den Begriff Wissen anstatt Technologie, um das Augenmerk auf die Rolle von Externalitäten, die durch neues Wissen ausgelöst werden, zu richten (Greenhalgh und Rogers, 2010, S. 227). Da Romers Arbeiten richtungweisend für die Wachstumstheorie waren, war in nachfolgenden Beiträgen zur Wachstumstheorie kaum mehr eine Begriffsdifferenzierung zu beobachten.

Beim Studium der enormen Masse an Beiträgen in diesem Bereich muss man feststellen, dass es in der Literatur keine einheitliche Definition für Wissen im ökonomischen Kontext gibt. Unterschiedliche Autoren setzen unterschiedliche Schwerpunkte. So betont beispielsweise Romer (1986) den Charakter eines öffentlichen Gutes (siehe auch Langlois, 2000). Kuznets (1965) sowie Mokyr (2002a und 2002b) betonen hingegen den *ökonomischen Nutzen* von Wissen in ihren Definitionen. Dieser Umstand erfordert eine genauere Analyse und Diskussion.

Der übliche Ansatz in der ökonomischen Theorie technologisches Wissen mit Technologie gleichzusetzen, lässt sich am einfachsten anhand der neoklassischen Produktionsfunktion verdeutlichen. Technologisches Wissen wird dabei als eigener Inputfaktor in der Produktion modelliert.

Barro und Sala-i-Martin (2004, S. 23 f.) diskutieren die im Rahmen der Wachstumstheorie verwendeten Inputfaktoren für die aggregierte Produktionsfunktion in ihrer Parameterdarstellung.

$$Y = F(A, K, L) \quad (1)$$

Dabei repräsentiert A den Faktor Wissen oder Technologie, K den Faktor Kapital und L den Faktor Arbeit. Das Kapital repräsentiert dabei ein Aggregat, welches alle Arten von Kapitalgütern sowie Grund und Boden umfasst (siehe auch beispielsweise Aghion und Howitt, 1999, S. 25 ff.). Der Faktor Arbeit repräsentiert die durch Menschen zur Verfügung gestellte Arbeitskraft.

Ursprünglich wurde unter dem Faktor K im Wesentlichen Grund und Boden verstanden. Die Bedeutung von Grund und Boden als Produktionsfaktor nahm jedoch im Laufe der Zeit mit der fortschreitenden Industrialisierung kontinuierlich ab (Ayres und Warr, 2002a, S. 2; Varian, 1999, S. 308 ff.). Im Zuge der Industrialisierung wurde unter Kapital primär industrielles Kapital verstanden, wie z. B. Gebäude oder Maschinen. Heute kann dieser Faktor als Aggregat verstanden werden, welches beliebige Rohstoffe, Gebäude, Maschinen, sowie Grund und Boden umfasst. Hierbei gilt es zu beachten, dass das Aggregat Kapital in diesem Zusammenhang ein homogenes Aggregat repräsentiert. Das heißt, obwohl unterschiedlichste Arten von Kapitalgütern in diesem Aggregat zusammengefasst werden, werden diese auf makroökonomischer Ebene als identische Elemente des Faktors Kapital verstanden. Die Akkumulation von Kapital wird durch Investitionen verursacht. Eine Investition in Grund und Boden hat in diesem Kontext die gleiche kapitalstockerhöhende Wirkung wie eine Investition in Gebäude oder Maschinen. Im Gegensatz zur Investition reduziert der Prozess der Abschreibung den Kapitalstock.

Einleitend wurde erwähnt, dass im Rahmen der Wachstumstheorie in Bezug auf die Produktionsfunktion in der Regel von konstanten Skalenerträgen ausgegangen wird. Die Annahme konstanter Skalenerträge hat die (vor allem aus mathematischer Sicht) vorteilhafte Eigenschaft, dass die Menge an möglichen Funktionen auf die Menge homogener Funktionen erster Ordnung begrenzt wird (Ayres und Warr, 2002a, S. 3). Üblicherweise wird somit für $F(\cdot)$ eine linear homogene Funktion unterstellt. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass für alle derartigen Funktionen das Euler-Theorem angewendet werden kann (siehe beispielsweise Otruba et al., 1996, S. 98). Ein Beispiel für eine derartige Funktion ist die bereits erwähnte und nachfolgend dargestellte Cobb-Douglas-Produktionsfunktion (siehe z. B. Solow, 1956, S. 76), die in der Regel in den Modellen der exogenen und endogenen Wachstumstheorie zur Anwendung kommt. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass sie auf Grund ihrer Form und ihrer mathematischen Eigenschaften auch sehr gut für empirische Schätzungen geeignet ist.

$$Y = AK^\alpha L^{1-\alpha} \quad (2)$$

Die Exponenten können auch als die Produktionselastizitäten in Bezug auf die Faktoren Kapital und Arbeit betrachtet werden. Darüber hinaus werden üblicherweise (vor allem in der exogenen Wachstumstheorie) folgende Eigenschaften unterstellt: $\partial Y/\partial K > 0$ und $\partial Y/\partial L > 0$ sowie $\partial^2 Y/\partial K^2 < 0$ und $\partial^2 Y/\partial L^2 < 0$. Die weiter oben genannte Eigenschaft der konstanten Skalenerträge sowie die letztgenannten positiven aber sinkenden Grenzerträge charakterisieren im Wesentlichen die Cobb-Douglas-Technologie. Der Faktor A ist in der Lage den Output Y bei einem konstanten Niveau von K und L positiv zu beeinflussen. Die Faktoren K und L sind im Allgemeinen potentiell begrenzt. Der Faktor A ist hingegen potentiell unbegrenzt, da der „Rohstoff“ für A neues Wissen ist und dieses kann zumindest rein theoretisch unbeschränkt von Menschen produziert werden.

Wie bereits erwähnt, unterliegt diese Produktionsfunktion dem Euler-Theorem. F_K und F_L repräsentieren in der Folge die Grenzprodukte der Faktoren Kapital und Arbeit. Auf Grund des Euler-Theorems gilt folgende Beziehung (siehe beispielweise Barrow und Sala-i-Martin, 2004, S. 33, Fußnote 9 oder Otruba et al., 1996, S. 61, Fussnote *)

$$Y = F_K K + F_L L. \quad (3)$$

Im Fall der Cobb-Douglas-Produktionsfunktion können die Grenzprodukte der Faktoren beispielsweise wie folgt dargestellt werden:

$$F_K = \alpha A K^{\alpha-1} L^{1-\alpha} = \alpha \frac{Y}{K} \quad (4)$$

$$F_L = (1 - \alpha) A K^{\alpha} L^{-\alpha} = (1 - \alpha) \frac{Y}{L} \quad (5)$$

Substitution dieser Ergebnisse in (3) zeigt die Korrektheit des Ausschöpfungstheorems nach Euler (siehe auch Otruba et al., 1996, S. 98).

$$Y = \alpha \frac{Y}{K} K + (1 - \alpha) \frac{Y}{L} L = \alpha Y + (1 - \alpha) Y \quad (6)$$

In der Folge soll der Parameter A im Fokus stehen.

Da technologischer Fortschritt durch neues Wissen bzw. durch neue technische Instruktionen hervorgerufen wird, wird der Produktionsfaktor Technologie häufig in der Wachstumstheorie mit Wissen gleichgesetzt. So argumentieren auch Barro und Sala-i-Martin in Bezug auf den Faktor A

„Workers and machines cannot produce anything without a *formula* or *blueprint* that shows them how to do it. This blueprint is what we call *knowledge* or *technology*.“
(Barro und Sala-i-Martin, 2004, S. 24, Hervorhebungen im Original).

Sie betonen, dass sich die Technologie auf Grund von neuem Wissen über den Zeitablauf hinweg verbessern kann. Ceteris paribus kann somit durch eine Erhöhung des immateriellen Faktors Technologie ein höherer Output erreicht werden. Eine Erhöhung von A ist in diesem Zusammenhang als eine Verbesserung der Technologie auf Grund von neuem Wissen zu interpretieren. Mathematisch gesehen führt diese Verbesserung zu einer Verschiebung der Produktionsmöglichkeitengrenze (Dang, 2007, S. 2 f.). Man beachte, dass das Outputwachstum in diesem Fall ein Resultat von neuem Wissen ist und ohne eine Veränderung der physischen Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit zustande kommt.

Dabei gilt es zu beachten, dass eine Veränderung des Faktors A in den theoretischen Modellen im Allgemeinen nicht die Struktur der Produktionstechnologie – sprich die explizite Form der Produktionsfunktion – verändert. A wird somit als multiplikativer Faktor definiert, der sich zwar positiv auf den produzierten Output auswirkt, jedoch nicht den funktionalen Zusammenhang, der durch die Technologie gegeben ist, verändert (siehe hierzu auch die Kritik an der exogenen Wachstumstheorie in Baetjer, 1997, S. 161—176). Die Veränderung

der Produktionsbeziehung bzw. der Technologie ist allerdings ein in der Praxis häufig zu beobachtendes Merkmal technologischen Fortschritts.

Wird beispielweise eine Cobb-Douglas-Produktionsfunktion unterstellt, so führt ein derartiger technologischer Fortschritt nicht zu einer Veränderung des grundsätzlichen funktionalen Zusammenhangs, wie er beispielsweise durch Gleichung (2) gegeben ist.

Diese Art der Verschiebung der Produktionsfunktion zeigt, dass es sich bei technologischem Fortschritt um einen exogenen Faktor handelt. Geometrisch betrachtet bedeutet dies, dass der Graph der Funktion nach Außen verschoben wird. Diese Art des technologischen Fortschritts hat daher einen positiven Einfluss auf den Output, selbst wenn sich die physischen Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit weder quantitativ noch qualitativ verändern (Gandolfo, 1997, S. 181 ff.).

Die Verbesserung der Technologie ist somit ein Resultat der Anwendung von neuem Wissen. In der Regel wird dieses Wissen als ökonomisch relevantes Wissen bezeichnet. Greenhalgh und Rogers (2010) definieren ökonomisch relevantes Wissen folgendermaßen:

„Economically relevant knowledge is the whole body of scientific evidence and human expertise that is, or could be, useful in the production and supply of commodities and in the invention and design of new products and processes.“ (Greenhalgh und Rogers, 2010, S. 6).

Die Gesamtheit wissenschaftlicher Erkenntnisse sowie menschlicher Expertisen, die für die Entwicklung und das Design neuer Güter sowie für die Produktion und das Angebot von Gütern relevant sind, bilden somit das ökonomisch relevante Wissen.

An dieser Definition lassen sich die unterschiedlichen Schwerpunkte, die in der Literatur im Zusammenhang mit der Definition von Wissen gesetzt werden, identifizieren. Einerseits wird bei der obigen Definition auf den gesamtwirtschaftlichen Produktionsprozess von Gütern und Dienstleistungen Bezug genommen („production and supply of commodities“, *ibid.*), andererseits wird auf die Rolle von Innovationen bei Produkten und Prozessen hingewiesen. Darüber hinaus wird die Nützlichkeit des Wissens („that is, or could be, useful“, *ibid.*) betont. Es muss nochmals darauf hingewiesen werden, dass die obigen Produktionsfunktionen den Produktionsprozess einer Wirtschaft auf hochaggregierter Ebene darstellen. Der aggregierte Output umfasst dabei sowohl Güter als auch Dienstleistungen. Eine Veränderung von A wirkt somit gleichermaßen auf alle einzelnen Techniken, die implizit durch die Produktionsfunktion erfasst werden.

Ein einfaches Beispiel für die Produktion einer Dienstleistung ist in diesem Zusammenhang hilfreich. Der Transport von Personen von Punkt A nach Punkt B ist eine Dienstleistung. Die Produktion von Taxifahrten benötigt im Wesentlichen einen Taxifahrer (den Faktor Arbeit) und ein Taxi (den Faktor Kapital). Pro Taxifahrer/Taxi kann theoretisch eine maximale Anzahl an Fahrten an einem Arbeitstag „produziert“ werden. Die Erhöhung eines einzelnen Faktors hat keinen Einfluss auf den maximalen Output. Die Technologie weist somit konstante Proportionen auf (siehe beispielsweise Varian, 1999, S. 306). Wie kann nun Wissen den maximalen Output positiv beeinflussen? Beispielweise kann langjährige Erfahrung des Taxifahrers in Form eines sehr genauen Wissens über das jeweilige Straßennetz sowie über mögliche Stauzonen in der „rush hour“ die maximal möglichen Ausbringungsmenge (*ceteris paribus*) erhöhen. Das Wissen, welches in Form von speziellen Algorithmen in einem Navigationsgerät implementiert ist, kann ebenfalls eine Outputsteigerung ohne die Erhöhung der physischen Inputfaktoren Kapital und Arbeit bewirken. Dies sind Beispiele für eine Erhöhung der Produktivität bei einer prinzipiell unveränderten Technologie (konstante Proportionen). Wenn in einigen Jahrzehnten Roboter mit künstlicher Intelligenz die Taxis steuern, wobei ein Mensch immer mehr Roboter über eine Onlineverbindung kontrolliert, so

hat das technologische Wissen, welches hinter diesen Techniken steht, die Technologie der Produktion von Taxifahrten massiv verändert. Durch neues Wissen hervorgerufener technologischer Fortschritt ist somit in der Lage Produktionstechnologien positiv zu verändern. Dies gilt sowohl für die Produktion einzelner Unternehmen auf der Mikroebene als auch für die gesamtwirtschaftliche Produktion ganzer Länder auf der Makroebene.

Bis jetzt wurde nicht explizit darauf hingewiesen, dass die Faktoren A und L in der Realität in enger Beziehung zueinander stehen und nicht völlig getrennt betrachtet werden können. Dieser Aspekt führt zum Begriff Humankapital.

Die Fähigkeiten, die Erfahrung sowie das Ausbildungsniveau der Arbeitskräfte sind bei der Produktion von Gütern und Dienstleistungen von entscheidender Bedeutung.³ Aspekte wie Aus- und Weiterbildung sind somit für die Entwicklung des Faktors A besonders relevant. So argumentiert beispielsweise Blanchard (2003, S. 236 ff.), dass technologischer Fortschritt in Ökonomien mit besser ausgebildeten Arbeitskräften wesentlich wahrscheinlicher ist, als in Ökonomien mit einem niedrigem Ausbildungsgrad.

Um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass Wissen in der Praxis nicht unabhängig vom Faktor Mensch ist, hat sich der Begriff Humankapital in der Literatur etabliert (Greenhalgh und Rogers, 2010, S. 229). Der Begriff Humankapital umfasst sowohl das Wissen als auch die Fähigkeiten der Menschen. Bildung kann dabei als Investition in das Humankapital verstanden werden. Erfahrung spielt eine zentrale Rolle beim Aufbau von Fähigkeiten. Der Begriff Humankapital bringt mitunter zum Ausdruck, dass der Faktor Arbeit im Rahmen der Produktion nicht auf die reine physische Arbeitsleistung reduziert werden kann. Aspekte wie Ausbildung und Erfahrung spielen daher eine enorm wichtige Rolle im Wachstumsprozess.

Nelson und Phelps (1966) argumentieren in diesem Zusammenhang, dass der Stock an Humankapital vor allem in Bezug auf die Lern- und Innovationsfähigkeit entscheidend ist. Je komplexer berufliche Tätigkeiten sind, desto größer sind die Anforderungen hinsichtlich der Problemlösungs- und Innovationsfähigkeit der jeweiligen Arbeitskraft. Besser ausgebildete Arbeitskräfte sind im Allgemeinen besser in der Lage berufliche Herausforderungen zu meistern und neue bisher unbekannt Problemstellungen im Rahmen der ökonomischen Aktivität zu lösen. Dies gilt auch für monotone Tätigkeiten. Auch diese erfordern von Zeit zu Zeit das Lösen mehr oder weniger komplizierter Problemstellungen für die noch kein Lösungsschema existiert oder bekannt ist. Das Lösen dieser Problemstellungen erfordert in der Regel die Anwendung neuer Techniken oder sogar die Entwicklung neuer Techniken. Neue ökonomische Problemstellungen bedingen somit Innovationen auf technischer Ebene und lösen in der Folge auch technologischen Fortschritt aus. Arbeitskräfte mit höherer Bildung sind dabei häufig schneller in der Lage neues Wissen zu erwerben und anzuwenden. In diesem Sinn fördert ein höheres Bildungsniveau die Problemlösungskompetenz und Innovationsfähigkeit (Nelson und Phelps, 1966).

Neben der engen Verflechtung der Faktoren Kapital und Arbeit ist auch zu berücksichtigen, dass Technologie durch Menschen – bzw. durch den Faktor Arbeit – produziert wird. Auf der einen Seite wird Wissen und in der Folge Technologie in einer Ökonomie explizit durch einen Teil des Faktors Arbeit geschaffen. Dies sind in der Regel Arbeitskräfte in wissensbasierten Sektoren, wie z. B. Universitäten, Forschungslabors und Technologieunternehmen. Auf der anderen Seite wird das Niveau der Technologie massiv durch das Wissen, welches durch Arbeitskräfte bei der täglichen Arbeit aufgebaut wird, bestimmt. Dieses Wissen repräsentiert die Fähigkeiten und die Erfahrung des Faktors Arbeit.

Nicht jede Art von Wissen ist im ökonomischen Kontext isoliert analysierbar. Dies gilt insbesondere für Erfahrungswissen und persönlichen Fähigkeiten. Technologie und Arbeit stehen somit in der Praxis auf unterschiedliche Art und Weise in enger Beziehung.

³ Aiginger (2008) identifiziert die Förderung dieser Punkte beispielsweise als zentral für die österreichische Wirtschaftspolitik.

Zusammenfassend gilt: Wissen steht in der ökonomischen Theorie in engem Zusammenhang mit dem Begriff der Technologie und wird häufig synonym verwendet (Romer, 1990; Cortright, 2001; Foss, 1996; Houghton und Sheehan, 2000). Techniken können als Instruktionen für die Produktion von Gütern und Dienstleistungen verstanden werden, die bestimmte Eigenschaften aufweisen. Durch diese Instruktion wird mit bestimmten Inputfaktoren ein bestimmter Output generiert. In Bezug auf die makroökonomische Ebene bezieht sich der Begriff der Technologie im Allgemeinen auf die funktionale Beziehung zwischen den gesamtwirtschaftlichen Produktionsfaktoren einer Ökonomie und deren mathematische Eigenschaften. Aus Sicht der makroökonomischen Theorie wird der gesamte Output einer Volkswirtschaft somit mit einer bestimmten Technologie produziert. Im Rahmen der Mikroökonomie bezieht sich der Begriff der Technologie jedoch in der Regel auf die Produktion eines bestimmten Gutes.

Technologische Beschränkungen resultieren primär aus naturgegebenen Gesetzmäßigkeiten und können durch neues Wissen überwunden werden. Technologischer Fortschritt entsteht durch den Aufbau von neuem Wissen und führt zu neuen sowie verbesserten Technologien. Wissen und der Faktor Arbeit sind dabei eng verwoben. Diesem Umstand wird durch den Begriff Humankapital Rechnung getragen. In Summe ist neues Wissen die zentrale Triebkraft für ökonomisches Wachstum.

3. Die exogene, endogene und evolutionäre Wachstumstheorie

Den Kern der Wachstumstheorie bilden die exogene und die endogene Wachstumstheorie. Nebenläufig zu diesen Strömungen hat sich die evolutionäre Wachstumstheorie als spezieller Zweig der evolutionären Ökonomie etabliert. Dieses Kapitel fasst die zentralen Annahmen und Ergebnisse dieser Strömungen zusammen. Darüber hinaus wird auf häufig genannte Kritikpunkte eingegangen.

Das primäre Ziel dieses Kapitels besteht darin, die wichtigsten Erkenntnisse der unterschiedlichen Strömungen auf Basis ihrer zentralen Modelle sowie die daraus resultierenden wissenschaftlichen Diskussionsschwerpunkte herauszuarbeiten und *nicht* eine detaillierte Darstellung der einzelnen Modelle zu präsentieren. Ausführliche Darstellungen der Modelle sind beispielsweise in Barro und Sala-i-Martin (2004) oder Aghion und Howitt (1999, 2009) sowie Gandolfo (1997) zu finden.

3.1. Die exogene Wachstumstheorie: Annahmen, Ergebnisse und Kritik

Die exogene Wachstumstheorie wird im Allgemeinen auch als neoklassische Wachstumstheorie bezeichnet und häufig mit den Arbeiten von Robert M. Solow (1956, 1957) assoziiert.

Die gesamte neoklassische Schule und somit auch die neoklassische Wachstumstheorie basiert im Wesentlichen auf dem Gleichgewichtsgedanken. Unter wirtschaftlichem Gleichgewicht wird dabei ein Zustand verstanden, bei dem sich Angebot und Nachfrage exakt ausgleichen und in der Folge keine Überschüsse oder Defizite auf den Märkten existieren. Die Idee zu dieser Annahme entstand primär mit Bezug auf Gütermärkte. In der Theorie wurde sie aber auf alle Güter- und Faktormärkte ausgeweitet. Bei einem globalen Gleichgewicht handelt es sich somit um einen Zustand der Ökonomie, bei dem sich alle Märkte im Gleichgewicht befinden.

Der Gleichgewichtsgedanke geht hauptsächlich auf John Maynard Keynes – dem geistigen Vater der Nationalökonomie – zurück. Im Speziellen handelt es sich bei dem in der neoklassischen Theorie unterstellten Gleichgewicht um ein sogenanntes kompetitives

Gleichgewicht. Das Konzept eines kompetitiven Gleichgewichts geht im Wesentlichen auf Leon Walras zurück (Ayres und Warr, 2009, S. 142 f.).

Hinter dem Konzept des kompetitiven Gleichgewichts steht die Überlegung, dass sich die Güterpreise in Relation zur Überschussnachfrage gemäß einer Art Auktionsmechanismus auf den Märkten bilden. Walras nannte diesen Mechanismus „tâtonnement“. Beginnend bei einem Initialpreis für ein Gut werden von einem fiktiven Auktionator die Gebote hinsichtlich Angebot und Nachfrage entgegengenommen. Existiert eine Überschussnachfrage, so steigt der Preis des Gutes. Existiert ein Überschussangebot, so sinkt der Preis des Gutes. Dieser Prozess setzt sich so lange fort, bis das Gleichgewicht erreicht wurde. Der Austausch der Güter zwischen Anbieter und Nachfrager findet erst im Gleichgewicht statt, andernfalls würden sich die Anfangsausstattungen der Anbieter ändern (Ayres und Warr, 2002a, S.1; Gandolfo, 1997, S. 280). Man beachte, dass die Annahme eines fiktiven Auktionators sehr ähnlich der Annahme der unsichtbaren Hand von John Maynard Keynes ist.

Im Zusammenhang mit der Wachstumstheorie ist entscheidend, dass die Überlegungen von Keynes und Walras statische Modellen implizierten (Ayres und Warr, 2002a; Hahn, 1993). Das Wachstum einer Ökonomie konnte damit jedoch nicht uneingeschränkt erklärt werden, da es sich bei Wachstum um einen dynamischen Prozess handelt. Des Weiteren muss beachtet werden, dass die resultierenden Modelle stark von den mathematischen Bausteinen der Physik geprägt waren. Die Physik diente sozusagen als Lieferant des mathematischen Apparats für die Ökonomie. Die Modelle wurden allerdings auch bis zu einem gewissen Grad durch die in der Physik genutzten mathematischen Modellbausteine eingeschränkt.

Solow (1956, 1957) verknüpfte die mikroökonomische Produktionstheorie mit den Grundannahmen der neoklassischen Theorie und konstruierte das neoklassische Wachstumsmodell zur Analyse des gesamtwirtschaftlichen Wachstumsprozesses. Solows Grundmodell repräsentiert ein General Equilibrium Model (GEM) mit einem Sektor. Folgende Annahmen bilden (üblicherweise) die Basis dieses Modells (Solow, 1956, S. 66—73 und S. 76 f.; 1957, S. 312 f.; siehe auch Ayres und Warr, 2002a, S. 3 f.): 1) Der Output (bzw. das Einkommen) einer Wirtschaft wird mit den Inputfaktoren Kapital und Arbeit produziert. 2) Die Produktionsfunktion hat in der Regel eine Cobb-Douglas-Form [siehe Gleichung (2)] und somit weist die unterstellte Technologie konstante Skalenerträge auf. Technologischer Fortschritt wird dabei als rein exogener Prozess modelliert. 3) Sowohl der Faktor Kapital als auch der Faktor Arbeit weisen positive aber sinkende Grenzerträge auf. 4) Auf dem einzigen Sektor des Modells herrscht die Marktform der vollständigen Konkurrenz. Gemäß dem repräsentativen Agentenansatz wird eine repräsentative Firma unterstellt, die das Ziel der Gewinnmaximierung verfolgt. Auf Grund der vollständigen Konkurrenzannahmen erachtet diese repräsentative Firma das Preisniveau für die Faktoren Kapital und Arbeit als gegeben und daher durch die eigenen Produktionsentscheidungen als nicht beeinflussbar. 5) Aus der Sicht der Firma existiert keine Unsicherheit über die Modellentwicklung und es kommt zu keinen Prognosefehlern. Sie hat alle Informationen in Bezug auf den Markt und versteht vollständig die Struktur des Modells und kann auf Grund dessen auch die optimalen wirtschaftlichen Entscheidungen treffen. Man beachte, dass diese Annahme das Gewinnen von neuem Wissen ausschließt (siehe hierzu auch Hanappi, 2008a, S. 2, Fußnote 2). 6) Ein konstanter Anteil des generierten Outputs wird zum Aufbau des Kapitalstocks genutzt bzw. in die Kapitalakkumulation investiert.

Zusätzlich sollte darauf hingewiesen werden, dass im Modell selbst kein Geld existiert. Monetäre Effekte sind somit ausgeschlossen. Allerdings existieren Preise für Faktoren Kapital und Arbeit (dazu später mehr).

Unter diesen Annahmen gibt es 3, die entscheidende Konsequenzen in Bezug auf die daraus resultierenden mathematischen Modelle haben. Dies sind die Annahmen in Bezug auf konstante Skalenerträge, sinkende Grenzerträge sowie die Annahme der vollständigen

Konkurrenz (Gundlach, 2001, S. 176). Etliche Jahre war es nicht möglich diese 3 Annahmen zu lockern, ohne dass dies zu inkonsistenten Modellen führte. Die Arbeit von Romer (1986) war ein wichtiger Beitrag und änderte diesen Umstand.

Investitionen repräsentieren einen zentralen Bestandteil des neoklassischen Modells. In dem Modell wird ja ein Teil des Outputs zur Akkumulation von weiterem Kapital genutzt. Dabei gilt es insbesondere zu beachten, dass die Eigenschaft sinkender Grenzerträge impliziert, dass jede weitere Investition einen immer geringeren Ertrag als die vorherige Investition erwirtschaftet.

Technisch gesehen repräsentiert das neoklassische Wachstumsmodell im Kern eine nicht lineare Differentialgleichung erster Ordnung. Im Speziellen handelt es sich dabei um eine Bernoulligleichung, welche mittels einer linearen Transformation in die Form einer linearen Differentialgleichung erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten gebracht werden kann (siehe hierzu Gandolfo, 1997, S. 178—181). Diese Form ist wiederum mit Standardmethoden lösbar.

Die zentralen Ergebnisse und Vorhersagen des neoklassischen Wachstumsmodells lassen sich wie folgt zusammenfassen. Abstrahiert man von Bevölkerungswachstum, so basiert das Outputwachstum im Rahmen des neoklassischen Modells auf der Kapitalakkumulation. Wachstum ist ein rein quantitatives Phänomen. Die Erhöhung des Kapitalstocks ist das Resultat von Investitionen in den Faktor Kapital. Ein höherer Kapitalstock ermöglicht einen höheren Output. Die Wachstumsrate des Outputs nimmt jedoch auf Grund der Annahme positiver aber sinkender Grenzerträge des Faktors Kapital ab. Somit nimmt auch die Wachstumsrate des Pro-Kopf-Outputs in diesem Modellrahmen langfristig ab. Hahn (1993, S. 432) ebenso wie Gundlach (2001, S. 178) weist dabei in Bezug auf das neoklassische Modell darauf hin, dass auch wirtschaftspolitische Eingriffe diesen Umstand nicht ändern können.

Langfristig endet somit auf Grund der immer geringer werdenden Erträge der Inputfaktoren die wirtschaftliche Aktivität bzw. das Wachstum im neoklassischen Modell. Es existiert kein endogener Mechanismus, der das in der Praxis kontinuierlich verzeichnete Outputwachstum erklärt.

Im Gleichgewicht werden gemäß der Theorie die Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit mit ihren Grenzprodukten entlohnt (siehe beispielweise Barro und Sala-i-Martin, 2004, S. 31 ff.; Gundlach, 2001, S. 180 oder Otruba et al., 1996, S. 98). Daraus folgt des Weiteren, dass die repräsentative Firma im Optimum indifferent zwischen einer Ausweitung oder einer Reduktion der Produktion ist. Diese Bedingung ist notwendig, da die repräsentative Firma andernfalls auf Grund der Annahme konstanter Skalenerträge den Output und somit auch die Gewinne zumindest theoretisch endlos steigern könnte. Diese Option würde eine gewinnmaximierende Firma natürlich nicht ausschlagen.

Leider werden einige Vorhersagen des neoklassischen Modells der Empirie nicht gerecht. Die Prognose, dass die ökonomische Aktivität auf Grund sinkender Grenzerträge der Faktoren zum Erliegen kommt, ist empirisch nicht haltbar (siehe hierzu auch Gundlach, 2001, S. 178 sowie de Castro, 1998, S. 69). Exogen gegebener technologischer Fortschritt ist der einzige Mechanismus im Modell, der kontinuierliches Wachstum gewährleistet.

Ein weiteres Prognoseproblem existiert in Bezug auf die Konvergenz der Wachstumsraten armer und schwacher Länder. Das neoklassische Modell zeigt, dass die Wachstumsrate einer Ökonomie in direkter Beziehung zur Entfernung der betrachteten Ökonomie vom Gleichgewicht steht (Gandolfo, 1997, S. 187). Je ärmer die betrachtete Ökonomie ist, desto höher ist ihre Wachstumsrate und desto schneller konvergiert diese Ökonomie in das Gleichgewicht. Die Wörter arm und reich beziehen sich in diesem Kontext auf das Niveau der Kapitalintensität und des Pro-Kopf-Outputs der betrachteten Ökonomie. Länder mit einer geringerer Anfangsausstattung in Bezug auf das Niveau der Kapitalintensität und des Pro-Kopf-Outputs verzeichnen gemäß der neoklassischen Theorie stärkere Outputwachstumsraten

als Länder mit einer vergleichbar besseren Anfangsausstattung, bei sonst äquivalenten ökonomischen Größen und Strukturen (Ayres und Warr, 2002b, S. 4).

Unterstellt man nun, dass mehrere Ökonomien bis auf die Entfernung vom Gleichgewicht identisch sind, so prognostiziert das neoklassische Modell ein schnelleres Wachstum der armen Länder. Gandolfo (1997, S. 187) weist darauf hin, dass diese Aussage jedoch nur unter der Annahme gilt, dass die verglichenen Ökonomien gegen exakt dasselbe Gleichgewicht konvergieren und dass sich die verglichenen Ökonomien dabei nur hinsichtlich der Entfernung vom Gleichgewicht unterscheiden. Diese in der Literatur als Konvergenzhypothese bekannte Modellvorhersage ist bis heute umstritten, da weder die Konvergenz noch die Divergenz „armer“ Ökonomien in Richtung „reicher“ Ökonomien eindeutig empirisch belegt werden kann. Dabei gilt es zu beachten, dass es sich im zuvor diskutierten Kontext um die sogenannte *bedingte Konvergenz* handelt. Im Gegensatz dazu würde die *absolute Konvergenz* implizieren, dass die verglichenen Ökonomien in unterschiedliche Gleichgewichte tendieren und arme Ökonomie trotzdem stärkere Wachstumsraten verzeichnen würden (Gandolfo, 1997).

In der Literatur wird des Weiteren zwischen der so genannten β - und σ -Konvergenz differenziert. Erstere bezieht sich auf Konvergenz, wie sie oben beschrieben wurde. Das Konzept der β -Konvergenz ist mitunter das Ergebnis der Arbeiten von Barrow und Sala-i-Martin (2004, S. 462—465). σ -Konvergenz bezieht sich hingegen auf die Streuung in Bezug auf das Pro-Kopf-Einkommen. Diese kann beispielweise mittels der log-Standardabweichung bzw. der Varianz in Bezug auf den Pro-Kopf-Output gemessen werden. σ -Konvergenz existiert dann, wenn die Streuung des Pro-Kopf-Outputs einer Gruppe von Ökonomien im Zeitablauf sinkt. Barrow und Sala-i-Martin (2004, S. 462) sowie Gandolfo (1997, S. 187) weisen darauf hin, dass β -Konvergenz zumindest aus theoretischer Sicht σ -Konvergenz bedingt. In einer deterministischen Welt würde β -Konvergenz somit σ -Konvergenz implizieren. Gandolfo argumentiert jedoch, dass in der Realität auf Grund von stochastischen Schocks nicht davon ausgegangen werden kann.

In der Folge verwundert es nicht, dass die Konvergenzhypothese bis heute empirisch nicht vollständig geklärt ist. Eine Vielzahl an Studien bestätigt diese Vorhersage. Ebenso viele Studien widersprechen dieser Vorhersage.

Im Allgemeinen kann relativ sicher gesagt werden, dass je unterschiedlicher die verglichenen Länder sind, desto schwächer konvergieren die Wachstumsraten der armen Länder in Richtung der reichen Länder (Barro und Sala-i-Martin, 2004, S. 14). In Summe ist die Qualität der Modellvorhersage in Bezug auf die Konvergenz armer und reicher Länder nicht vollständig geklärt.

Für einen guten Überblick zur Konvergenzhypothese siehe Barro und Sala-i-Martin (2004, S. 461—509). Für die allgemeine Unterscheidung zwischen β - und σ -Konvergenz siehe Gandolfo (1997, S. 187 ff.) und für eine empirische Konvergenzuntersuchung speziell für den Euroraum siehe Cornett und Sørensen (2012, S. 81—108).

Aus der Sicht der endogenen Wachstumstheorie ist vermutlich der folgende Aspekt des neoklassischen Modells am kritischsten. Gundlach (2001, S. 178) weist darauf hin, dass insbesondere die Modellvorhersage, dass das Wachstum des Outputs langfristig auf Grund sinkender Grenzerträge endet, dazu führte, dass Solow (1956) technologischen Fortschritt als exogenen Mechanismus in das Modell integrierte. Dieser garantiert nämlich im neoklassischen Rahmen ein langfristiges Outputwachstum und sichert dadurch die empirische Relevanz des gesamten Modells. Die Ursachen und Gründe für technologischen Fortschritt werden im Modell jedoch nicht endogen erklärt. Dies führt zu den zentralen Kritikpunkten am neoklassischen Modell.

Auf der einen Seite wird die Modellprognose, dass arme Länder *ceteris paribus* stärker wachsen als reiche Länder heftig diskutiert. Die kritischen Stimmen müssen jedoch beachten,

dass das neoklassische Modell nicht Konvergenz im Sinn der absoluten Konvergenz prognostiziert. Die Überlegungen und Annahmen, die hinter der bedingten Konvergenz stehen, lassen sich auch nicht 1:1 auf reale Ökonomien übertragen. Darüber hinaus existieren etliche empirische Studien, die die Prognosen des neoklassischen Modells hinsichtlich dieses Punktes stützen.

Auf der anderen Seite bietet die Prognose, dass das Wirtschaftswachstum auf Grund sinkender Grenzerträge endet, mehr Spielraum für qualifizierte Kritik. Diese Vorhersage entspricht auf makroökonomischer Ebene nicht der beobachtbaren Realität. An dem Prognoseproblem im Zusammenhang mit der Annahme sinkender Grenzerträge des Faktors Kapital knüpft die endogene Wachstumstheorie an. In den Modellen der endogenen Wachstumstheorie werden deswegen in der Regel konstante oder sogar steigende Grenzerträge für den Produktionsfaktor Kapital unterstellt (siehe auch Gundlach, 2001, S. 179 oder Hahn, 1993, S. 432).

Einen weiteren Problempunkt stellt die Betrachtung des Faktors Kapitals innerhalb der neoklassischen Theorie dar. Kapital repräsentiert dort eine homogene Bestandsgröße, die alle erdenklichen Arten von Kapitalgütern umfasst. Was genau eine Einheit Kapital darstellt ist unklar. Die Erhöhung jeder Art von Kapitalgut wirkt sich gleich auf den Produktionsfaktor Kapital und in der Folge positiv auf den Output aus. Baetjer (1997, S. 164 f.) sieht dies als eine der größten Schwächen der neoklassischen Theorie und argumentiert, dass das aktuell in der Ökonomie verwendete Kapitalkonzept unrealistisch ist.

Neben den Modellvorhersagen und der Sichtweise in Bezug auf den Faktor Kapital muss auch bemängelt werden, dass Wachstum im neoklassischen Modell ein rein quantitatives Phänomen ist. Die einzige relevante Größe ist die Menge an Output. Die neoklassische Theorie lässt beispielweise die Veränderung der Kapitalstruktur völlig außer Acht. Dieser Aspekt steht im engen Zusammenhang mit der Annahme einer *gegebenen* Technologie. Wie bereits erwähnt, wird in der Regel von einer Cobb-Douglas-Technologie ausgegangen. Die gegebene Technologie bzw. der funktionale Zusammenhang zwischen den Produktionsfaktoren verändert sich im Zeitablauf nicht. Technologischer Fortschritt zeichnet sich jedoch häufig durch eine Veränderung dieser Beziehung aus. Dies gilt sowohl für die Mikro- als auch für die Makroebene. Dies führt zum letzten und am häufigsten genannten Kritikpunkt an der neoklassischen Theorie – die Modellierung des technologischen Fortschritts als exogenen Prozess.

Technologischer Fortschritt repräsentiert auf Basis theoretischer und empirischer Ergebnisse den zentralen Wachstumsfaktor, jedoch müsste dieser Mechanismus in einem realitätsnahen Modell auch endogen erklärt werden. Die Tatsache, dass dieser im neoklassischen Modell exogen gegeben ist, wird bis heute zu Recht massiv kritisiert. Exogener technologischer Fortschritt wird üblicherweise durch die Möglichkeit eines knowledge spillover aus einem anderen Land gerechtfertigt (Greenhalgh und Rogers, 2010, S. 224). Diese Annahme ist jedoch insbesondere für moderne Industrienationen nicht plausibel. Diese Ökonomien generieren den Großteil ihres technologischen Fortschritts selbst (das heißt endogen). Da technologischer Fortschritt der einzige Mechanismus ist, der ein kontinuierliches Wachstum des Pro-Kopf-Einkommens bzw. -Outputs garantiert, wird auch das Wachstum des Pro-Kopf-Einkommens nur unzureichend erklärt. Einer der wichtigsten Wachstumsquellen (wenn nicht die wichtigste) wird somit nicht plausibel innerhalb des neoklassischen Modells erklärt.

Abschließend muss angemerkt werden, dass die neoklassische Theorie trotz der Kritikpunkte noch immer die Wachstumstheorie dominiert und häufig für wirtschaftspolitische Entscheidungen herangezogen wird. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass das zentrale Modell von Solow ein elegantes und im Vergleich zu den Modellen der endogenen Wachstumstheorie verhältnismäßig einfaches Modell repräsentiert. Darüber hinaus ist es auf Grund der Modellstruktur auch sehr gut für empirische Schätzungen bzw. Untersuchungen geeignet.

Aus der Sicht dieser Dissertation liegt der größte Beitrag der exogenen Wachstumstheorie in der Erkenntnis, dass langfristiges Wachstum ohne technologischen Fortschritt nicht möglich ist. Ohne die Einbeziehung der Effekte von neuem Wissen ist die Erklärung eines ständig steigenden Pro-Kopf-Einkommens bzw. -Outputs nur schwer zu bewerkstelligen. Neues Wissen repräsentiert den zentralen Wachstumsfaktor der Zukunft. Dies zeigt auch, dass die reine Akkumulation von Kapital kein Garant für Wachstum und Wohlfahrt ist und deutet gleichzeitig auf zukunftssträchtige Alternativen im Rahmen der Bildungs- und Forschungspolitik hin. Diese Aspekte sind insbesondere für ressourcenarme Länder von Bedeutung.

3.2. Die endogene Wachstumstheorie: Annahmen, Ergebnisse und Kritik

Die endogene Wachstumstheorie trägt ihren Namen auf Grund der Tatsache, dass sie versucht technologischen Fortschritt in den Modellen endogen zu erklären. Die Entwicklung der Technologie wird in diesen Modellen mit unterschiedlichen Annahmen und Konzepten modelliert und technologischer Fortschritt ist daher eine endogene Variable. Dies ist ein entscheidender Unterschied zu den Modellen der neoklassischen Wachstumstheorie. Wie bereits ausführlich erläutert, wird in diesen technologischer Fortschritt ja als exogene Größe modelliert.

Auf Basis der Ausführungen in Ayres und Warr (2009, S. 162—166), Greenhalgh und Rogers (2010, S. 225—237) sowie Maußner und Klump (1996, S. 233—290) kann die endogene Wachstumstheorie im Wesentlichen in drei Stränge untergliedert werden.

Bevor auf diese Stränge näher eingegangen wird, sei erwähnt, dass alle drei Stränge im Wesentlichen auf der Annahme steigender Skalenerträge sowie konstanter oder steigender Grenzerträge der Inputfaktoren aufbauen. Foss (1996, S. 4) weist darauf hin, dass sich die Modelle dieser Zweige im Wesentlichen nur dahingehend unterscheiden, ob von einem kompetitiven oder einem monopolistische Gleichgewicht ausgegangen wird. Es wird somit zwischen vollkommener und monopolistischer Konkurrenz auf den Märkten differenziert (siehe auch Hahn, 1993, S. 434).

Der erste Strang oder Zweig kann als Weiterentwicklung der neoklassischen Theorie verstanden werden und wird auch als AK-Ansatz bezeichnet. Diese Bezeichnung resultiert daher, dass das zentrale Modell dieses Zweiges eine Produktionsfunktion mit nur zwei Inputfaktoren Technologie (A) und Kapital (K) repräsentiert. Die zentrale Gleichung dieses Modells lautet daher $Y = AK$. Der Faktor Kapital umfasst annahmegemäß sowohl physisches Kapital als auch die Arbeitskraft, das heißt den Faktor Arbeit inklusive seinem Wissen. Laut Barrow und Sala-i-Martin (2004, S. 63, Fußnote 29) wurde diese Art der Produktionsfunktion interessanterweise erstmals von John von Neumann (1937) verwendet. Entscheidender Aspekt dieses Ansatzes ist die Annahme eines steigenden Grenzertrages des Faktors Kapital. Diese resultiert aus der Überlegung heraus, dass das Zusammenspiel von Arbeit und Kapital zu einem steigenden Grenzertrag des letztgenannten führt.

Der zweite Zweig konzentriert sich auf die Rolle von Wissen und Humankapital im ökonomischen Wachstumsprozess. Üblicherweise wird dieser Zweig mit den Arbeiten von Paul Romer (1986, 1990) assoziiert. Romer setzte im Wesentlichen den Begriff Technologie mit Wissen gleich und konstruierte als erster ein widerspruchsfreies Modell bei dem die Annahme der vollständigen Konkurrenz, einer gewinnmaximierenden repräsentativen Firma, konstanten Skalenerträgen sowie *steigenden* Grenzerträgen des Faktors Kapital kombiniert wurden (siehe auch Gundlach, 2001). Dabei stehen positiven Externalitäten, die durch neues Wissen ausgelöst werden, im Mittelpunkt der Analyse. Romer (1990) repräsentiert eine Weiterentwicklung dieses Modells und unterscheidet sich im Wesentlichen zu Romer (1986) dadurch, dass von monopolistischer Konkurrenz ausgegangen wird. Die Arbeiten von Romer führten in den 1990er Jahren zu einer Wiederbelebung des Interesses an der endogenen Wachstumstheorie und werden daher in der Regel als erstes mit der endogenen Wachstumstheorie in Verbindung gebracht.

Der dritte Zweig konzentriert sich auf die Effekte, die durch Innovationen und F&E ausgelöst werden. Dieser Zweig steht im engen Zusammenhang mit den Ideen von Joseph A. Schumpeter (1912, 1939, 1943). Üblicherweise wird dieser Zweig mit den Arbeiten von Aghion und Howitt (1999, 2009) assoziiert. Sie konstruierten Modelle, die stark auf den Ideen von Schumpeter basierten. Insbesondere stehen das Konzept der kreativen Zerstörung und die Innovationstätigkeit der Firmen im Fokus ihrer Modelle. Letztere ist dabei das Resultat von F&E.

Vor allem jüngere Modelle der endogenen Wachstumstheorie können als Antwort auf die vielen offenen theoretischen Fragen und die wachsende Unzufriedenheit mit dem zentralen Modell der neoklassischen Theorie verstanden werden.

Wie bereits erläutert wurde, liegt das zentrale Problem der neoklassischen Theorie darin, dass das Wachstum der Ökonomie auf Grund der Annahme sinkender Grenzerträge des Faktors Kapital langfristig zum Erliegen kommt. Das heißt, eine Erhöhung des Inputfaktors Kapital wirkt sich zwar positiv auf den Output aus, jedoch nimmt die positive Wirkung mit jeder Erhöhung immer weiter ab. Die Ertragszuwächse werden somit immer geringer (siehe z. B. Otruba et al., 1996, S. 52). Zur Erinnerung: Laut einiger Beiträge konnte dieses Problem in Solow (1956) nur dadurch gelöst werden, dass technologischer Fortschritt als exogener Prozess eingeführt wurde (Gundlach, 2001, S. 178; de Castro, 1998, S. 69 f.).

Das Kernproblem besteht somit darin, dass in Bezug auf den Faktor Kapital von sinkenden Grenzerträgen ausgegangen wird. Im Rahmen einer Cobb-Douglas-Produktionsfunktion $Y(K, L)$ besteht das formale Problem daher in der Annahme $\partial Y/\partial K > 0$ und $\partial^2 Y/\partial K^2 < 0$. Dieses Problem existiert in gleicher Weise für den Faktor Arbeit.

Das soeben beschriebene Problem im Zusammenhang mit der Annahme sinkender Grenzerträge wurde bereits durch die frühen Modelle der endogenen Wachstumstheorie, wie z. B. durch das AK-Modell, adressiert.

Wie bereits erwähnt, repräsentieren die Beiträge von Paul Romer (1986, 1990) die zentralen Arbeiten innerhalb der endogenen Wachstumstheorie. Bis zu einem gewissen Grad repräsentieren diese Arbeiten das Pendant zu Solow (1956, 1957) innerhalb der neoklassischen Wachstumstheorie. Aus diesem Grund werden diese Arbeiten etwas detaillierter beleuchtet.

Romer (1986) konstruiert ein kompetitives Gleichgewichtsmodell mit einem Sektor und endogenem technologischen Fortschritt. Da es sich um ein kompetitives Gleichgewichtsmodell handelt, wird von vollständiger Konkurrenz ausgegangen. Romer (ibid., S. 1003 f.) nennt einige zentrale Grundannahmen, die wie folgt zusammengefasst werden können: 1) Die F&E-Tätigkeit von Firmen kann als die Produktion von neuem Wissen interpretiert werden. Neues Wissen wird von allen Firmen in der Ökonomie generiert, kann jedoch auf Grund der speziellen Eigenschaften von Wissen nicht vollständig patentiert oder geheim gehalten werden. 2) Betrachtet man die Produktion von neuem Wissen aus der Sicht einer einzelnen Firma, so kann neues Wissen auf Basis einer Technologie mit sinkenden Skalenerträgen produziert werden. 3) Da jedoch neues Wissen spezielle Eigenschaften hat kommt es bei der Produktion von Wissen zu positiven Externalitäten. So kommt beispielweise das von einer einzelnen Firma generierte Wissen allen Firmen in der Ökonomie im Rahmen ihrer Produktionstätigkeit zu Gute (siehe auch Gundlach, 2001, S. 179 sowie Hahn, 1993, S. 434). Mit anderen Worten, es produziert positive externe Effekte. Wissen muss daher als eigener Faktor im Rahmen der gesamtwirtschaftlichen Produktion verstanden werden. 4) Auf gesamtwirtschaftlicher Ebene führen diese positiven Externalitäten in der Realität dazu, dass die Technologie der gesamtwirtschaftlichen Produktion nicht konstante, sondern steigende Skalenerträge aufweist und der gesamtwirtschaftliche Produktionsfaktor Kapital einen steigenden Grenzertrag aufweist.

Aus ökonomischer Perspektive betrachtet repräsentiert das Modell somit ein GEM mit einem Sektor bei vollständiger Konkurrenz und profitmaximierenden Agenten. Der Output der Ökonomie wird dabei auf Basis einer Produktionstechnologie mit steigenden Skalenerträgen mit den Faktoren Kapital und Arbeit erwirtschaftet. Der Faktor Kapital inkludiert dabei auch das Wissen innerhalb der Ökonomie (siehe auch Gundlach, 2001, S. 179). Im Detail gliedert sich dieses Wissen in firmenspezifisches Wissen und einen Pool an Wissen, der der gesamten Wirtschaft zur Verfügung steht. Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive betrachtet weist der Produktionsfaktor Wissen in der Folge einen steigenden Grenzertrag auf.

Mathematisch gesehen repräsentiert das Modell ein dynamisches Optimierungsproblem mit einem unbeschränkten Zeithorizont. Das Modell fällt prinzipiell in die Klasse der Kontrollprobleme. Derartige Problemstellungen lassen sich mit Verfahren der optimalen Kontrolltheorie lösen. Die zentralen Verfahren, die in diesem Zusammenhang zu nennen sind, sind die Variationsrechnung, die dynamische Programmierung sowie das Maximumprinzip. Letztes kann als Verallgemeinerung der beiden ersten Verfahren betrachtet werden. Eine umfassende Einführung in diese Methoden wird in Léonard und Van Long (1992) gegeben. Eine kurze deutschsprachige Einführung ist in Maußner und Klump (1996, S. 321—333) zu finden.

Anzumerken ist, dass in Romer (1986, S. 1014—1018) auch eine Modellversion mit beschränktem Zeithorizont präsentiert wird.

Die zentralen Ergebnisse des Modells lassen sich wie folgt zusammenfassen: Durch die Annahme eines steigenden Grenzprodukts des Faktors Kapital ist es möglich Wachstumsmodelle zu formulieren, in denen im Gegensatz zum neoklassischen Wachstumsmodell das langfristige Wachstum des Pro-Kopf-Outputs nicht zum Erliegen kommt. Die Existenz eines eindeutigen Gleichgewichts ist gewährleistet. Dieses Gleichgewicht ist jedoch Pareto-ineffizient (Romer, 1986, S. 1004 f.). Es wäre somit möglich eine effizientere Allokation zu erzielen, ohne jemanden anderen in der Ökonomie schlechter zu stellen. Die Ursache dafür liegt in der zu „egoistischen“ Wahrnehmung der Firmen in Bezug auf die Erträge von F&E. Jede einzelne Firma sieht nur die privaten Erträge, die sie durch ihre Investition in den Wissensaufbau erzielt, nicht jedoch die Erträge auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. Das durch F&E generierte Wissen hat somit nicht nur positive Effekte für die investierende Firma, sondern hat auch im Allgemeinen einen positiven externen Effekt für jede andere Firma innerhalb der Ökonomie. Diese positiven Externalitäten werden von der einzelnen Firma bei ihren ökonomischen Entscheidungen allerdings nicht berücksichtigt. Diese wirtschaftliche Kurzsichtigkeit führt dazu, dass jede gewinnmaximierende Firma einen zu geringen Anteil ihres Einkommens in F&E investiert. In der Folge ist im erzielten Gleichgewicht das Konsumniveau zu hoch und das Niveau an F&E zu niedrig (siehe auch Corthright, 2001; Hahn, 1993; Gundlach, 2001).

Die Prognosen des Modells in Romer (1986, S. 1003) in Bezug auf die Entwicklung von armen Ländern sind im Gegensatz zum neoklassischen Wachstumsmodell nicht sehr optimistisch. Das Pro-Kopf-Einkommen reicher und armer Länder muss *nicht* konvergieren. Es ist sogar wahrscheinlicher, dass hochentwickelte Ökonomien schneller wachsen als schwächer entwickelte. Im schlimmsten Fall kommt es in den schwachentwickelten Ökonomien zu einem Erliegen des Wachstums des Pro-Kopf-Outputs.

Romers zweiter zentrale Beitrag zur endogenen Wachstumstheorie ist Romer (1990). Im Gegensatz zu dem Modell in Romer (1986), bei dem der Fokus auf der Kombination der Annahme steigender Skalenerträge und der Annahme vollkommener Konkurrenz lag, unternimmt Romer in dieser Arbeit explizit den Versuch technologischen Fortschritt als endogene Variable zu modellieren. Technologischer Fortschritt ist in diesem Modell das Ergebnis bewusster Investitionsentscheidungen profitmaximierender Agenten. Das erzielte Gleichgewicht ist ein Gleichgewicht bei monopolistischer Konkurrenz. Ein Gleichgewicht bei vollständiger Konkurrenz ist laut Romer auf Grund der speziellen ökonomischen Eigenschaften von Wissen in dem Modellrahmen nicht möglich. Bemerkenswert ist, dass Romer in dieser Arbeit von Technologien sowie Instruktionen und nicht mehr von Wissen allgemein spricht. Technologischer Fortschritt repräsentiert dabei laut Romer die Verbesserung dieser Instruktionen.

Romer (1990, S. 72) nennt drei grundlegende Annahmen, die seinem Modell zu Grunde liegen: 1) Technologischer Fortschritt repräsentiert den zentralen Wachstumsfaktor und bietet ständig neue Anreize Kapital zu akkumulieren. Die Kombination von Kapitalakkumulation und technologischem Fortschritt ist im Kern für den in der Praxis permanent verzeichneten Anstieg des Pro-Kopf-Outputs in hochentwickelten Ländern verantwortlich. 2) Technologischer Fortschritt ist zum Großteil das Ergebnis von ökonomischen Anreizen. In erster Linie führt das Streben von Firmen nach überdurchschnittlichen Profiten zur Investition in F&E und in der Folge zu neuen Techniken bzw. neuen Instruktionen. 3) Aus ökonomischer Perspektive betrachtet repräsentieren diese Instruktionen spezielle Güter mit besonderen Eigenschaften. Dabei ist insbesondere relevant, dass einmal entwickelte Instruktionen ohne Einschränkung von beliebig vielen Menschen genutzt werden können. Diese multiple Nutzung verursacht keine zusätzlichen Kosten. Dem stehen jedoch hohe Fixkosten für die erstmalige Entwicklung der Instruktion gegenüber. Zeichnen sich physische Güter in ihrer Nutzung durch Exkludierbarkeit sowie Rivalität aus, so treffen diese Eigenschaften nicht auf Techniken bzw. Wissen zu.

Romer (ibid. S. 79 ff.) unterstellt, dass der Output der Wirtschaft mit den Faktoren Kapital, Arbeit, Humankapital sowie Technologie mittels einer Produktionsfunktion mit konstanten Skalenerträgen in drei Sektoren produziert wird.

Der Forschungssektor produziert neues Wissen durch die Nutzung der Faktoren Humankapital und dem vorhandenen Wissen. Der Output dieses Sektors wird in Form von Designs gemessen, das heißt ein neues Design repräsentiert neues Wissen. Arbeit und Kapital werden nicht als Inputfaktoren für die Produktion von neuem Wissen verwendet.

Der Sektor für Zwischengüter nutzt die vom F&E-Sektor produzierte Designs in Kombination mit dem Output aus vorangegangenen Perioden um Zwischengüter als Input für den Sektor der finalen Güter zu produzieren.

Der produzierende Sektor nutzt den Faktor Arbeit, das Humankapital sowie Zwischengüter um Endprodukte zu fertigen. Der finale Output kann konsumiert oder wiederum zum Aufbau des Kapitalstocks verwendet werden.

Die Produktionsentscheidungen des letzten Sektors können mit dem Konzept einer repräsentativen Firma unter der Annahme der vollständigen Konkurrenz beschrieben werden. Dies gilt nicht für den F&E-Sektor oder den Sektor für Zwischenprodukte.

Ein entscheidender Unterschied dieser Modellierung zu den Standardansätzen ist, dass Romer den Faktor Kapital im Rahmen des Sektors finaler Güter nicht als homogenes Aggregat betrachtet. Wie bereits erläutert, wird in der Regel davon ausgegangen, dass alle Kapitalgüter, die im Aggregat K zusammengefasst werden, perfekte Substitute repräsentieren. Romer geht jedoch von unterschiedlichen Kapitalgütern aus, die auch einen unterschiedlichen Beitrag zum Output leisten. Dies kann als ein erster Ansatz zur Modellierung einer sich entwickelnden Kapitalstruktur verstanden werden (siehe hierzu auch Baetjer, 1997, S. 171 f.). Nichtsdestotrotz wird von einem sinkenden Grenzertrag in Bezug auf den Faktor Kapital ausgegangen. Die Produktion im F&E-Sektor weist steigende Skalenerträge auf.

Im Kern repräsentiert Romer (1990) ein neoklassisches Wachstumsmodell mit endogenem technologischem Fortschritt. Mathematisch gesehen repräsentiert dieses Modell ein dynamisches Optimierungsmodell mit einer einzigen Zustandsvariablen.

Die Ergebnisse von Romer (1990) haben wichtige Implikationen in Bezug auf das Humankapital. Eine zentrale negative Schlussfolgerung von Romer ist nämlich, dass zu wenig Humankapital für F&E bereitgestellt wird. Romer (ibid., S. 96 f.) sieht dafür folgende Gründe. Auf der einen Seite führt F&E zu positiven Externalitäten, die nicht verhindert werden können. Diese positiven Effekte von F&E kommen sozusagen nicht nur dem Innovator zu Gute, sondern auch zukünftigen Generationen. Auf der anderen Seite ist die Kompensation für die Entwickler eines neuen Designs in Form des Marktpreises zu gering. In

Summe wird daher der Faktor Humankapital verglichen mit seinem Beitrag zum Output zu gering entlohnt.

Die wesentliche Schlussfolgerung von Romer (ibid., S. 99) ist, dass Ökonomien mit einem größeren Stock an Humankapital schneller wachsen. Ein zu geringer Stock an Humankapital kann als sehr wahrscheinliche Erklärung für das schwache Wachstum von Entwicklungsländern gesehen werden. Dabei spielt die Wirtschaftsverflechtung mit anderen Ländern eine entscheidend Rolle. Internationaler Handel kann ein zu geringes Humankapital kompensieren.

Die zentralen Ergebnisse der endogenen Wachstumstheorie können wie folgt zusammengefasst werden. Der Anfangsbestand und insbesondere der Aufbau von neuem technologischem Wissen sind entscheidend für das Wachstumspotential von Ökonomien. Aus der Perspektive der endogenen Wachstumstheorie repräsentiert Wissen im Wesentlichen ein spezielles Gut. Dieses Gut hat einige außergewöhnliche Eigenschaften. So ist Wissen einerseits ein nicht-rivales Gut und andererseits können Dritte von seiner Nutzung nur teilweise exkludiert werden (Romer, 1990, S. 73—78; siehe auch Cortright, 2001). Diese Eigenschaften sind je nach Standpunkt unterschiedlich zu beurteilen. Aus der Sicht eines einzelnen Unternehmens repräsentieren diese Eigenschaften bis zu einem gewissen Grad Nachteile. Nicht-Rivalität und nur teilweise Exkludierbarkeit führen potentiell dazu, dass die realisierten Erträge des Unternehmens im Vergleich zu den gesamtwirtschaftlichen Erträgen zu gering ausfallen. Aus gesamtwirtschaftlicher Sicht sind diese ungewöhnlichen Eigenschaften jedoch vorteilhaft und gleichzeitig die größte Stärke des Produktionsfaktors Wissen. Dadurch kommt es nämlich bei der Schaffung von neuem Wissen zu positiven Externalitäten. Ist der Effekt dieser Externalitäten groß genug, so muss das (neo-)klassische „Gesetz“ der sinkenden Grenzerträge in Bezug auf den Faktor Kapital nicht unbedingt mehr Gültigkeit haben (Gundlach, 2001, S. 179).

Die Modellierung von endogenem technologischen Fortschritt auf Basis dieser Annahmen kann ein steigendes langfristiges Pro-Kopf-Einkommen im Rahmen eines neoklassischen Rahmens erklären (Greenhalg und Rogers, 2010).

In Bezug auf die Formulierung neuer Modellklassen hat die endogene Wachstumstheorie einen sehr wichtigen Beitrag geleistet. Romer konnte erstmals ein Modell auf Basis vollkommener Konkurrenz, konstanter Skalenerträge sowie steigenden Grenzerträgen formulieren. Die aus diesen Modellen abgeleiteten Prognosen insbesondere in Bezug auf die Konvergenzfrage sind jedoch ebenfalls nicht eindeutig (siehe z. B. Gundlach, 2001, S. 181). Dies führt uns zu den größten Kritikpunkten an der endogenen Wachstumstheorie.

Auch die endogene Wachstumstheorie wird teilweise stark kritisiert. Zentraler Kritikpunkt ist die Art und Weise wie Wissen definiert und modelliert wird.

Mokyr (2002b, S. 4) kritisiert die endogene Wachstumstheorie beispielweise dahingehend, dass sie nicht explizit versucht, die Struktur und Akkumulation von Wissen zu modellieren. Dies ist verwunderlich, da die endogene Wachstumstheorie Wissen als den entscheidenden Wachstumsfaktor identifiziert hat.

Ähnlich argumentiert Foss (1996, S. 6). Auf Grund der Tatsache, dass sich die endogene Wachstumstheorie nicht im Detail mit dem Wachstum von Wissen an sich beschäftigt, werden immer wieder relativ starke und unplausible Annahmen in den Modellen getroffen. Möglicherweise bleiben dadurch tieferliegende Determinanten des Wachstumsprozesses unentdeckt.

Steedman (2001) kritisiert die Arbeiten der endogenen Wachstumstheorie dahingehend, dass keine klare Definition des Begriffs Wissen vorgenommen wird. In der Folge existiert auch keine Methode um Wissen oder dessen Effekt auf das Wachstum zu messen. Diese ungenaue Definition spiegelt sich auch in den unterschiedlichen und vagen Begriffen, die in den

Beiträgen der endogenen Wachstumstheorie für den Parameter A verwendet werden, wider. Oft werden in diesen Arbeiten diverse Begriffe für Wissen verwendet. Beispielsweise werden die Begriffe Instruktion, Technologie, Produktivität oder Design häufig synonym verwendet. Laut Steedman (ibid., S. 3 f.) fehlt somit zunächst ein sauberes theoretisches Konzept. Er stellt die gängige Praxis Wissen als Bestandsvariable zu modellieren stark in Frage. Darüber hinaus ist die Modellierung von Wissen als Inputparameter einer Produktionsfunktion aus seiner Sicht kritisch zu beurteilen. Diese Modellierung unterstellt nämlich implizit, dass Wissen eine kardinale Größe ist. Jede infinitesimale Analyse von A erfordert daher die Existenz eines kardinalen Maßes für A. Weder ist dieses Maß gegeben noch ist klar, ob Wissen überhaupt eine kardinale Größe repräsentieren kann. Sein Urteil über die theoretische Basis in Bezug auf den Parameter A in der endogenen Wachstumstheorie fällt dementsprechend hart aus:

„This is certainly not ‘measurement without theory’; it is theory without the minimal conceptual clarity required to make that theory worthy of attention. No amount of ‘sophisticated mathematical analysis can turn conceptual confusion into meaningful conclusions.“

(Steedman, 2001, S. 3; Unterstreichung im Original).

Ein anderer Kritikpunkt betrifft die Annahmen in Bezug auf den Faktor Kapital. Baetjer (1997, S. 170—173) kritisiert die endogene Wachstumstheorie auf Basis einer Analyse der Arbeiten von Romer (1986, 1990). Er bemängelt, dass der Großteil der Arbeiten keine Unterscheidung hinsichtlich der Vielzahl an existierenden Kapitalgütern macht. Zur Erinnerung: Auch in den Modellen der endogenen Wachstumstheorie wird Kapital in der Regel als eine Art homogene Menge an Kapitalgütern angesehen. Obwohl Romer (1990) steigende Grenzerträge des Kapitals auf Grund von Innovationen im Sinne neuer Kapitalgüter berücksichtigt, differenziert er nicht hinsichtlich ihrer Wirkung auf das Produktionsniveau. Baetjer argumentiert daher, dass in diesen Modellen kein Platz für strukturelle Beziehungen zwischen den Kapitalgütern existiert. Aspekte wie komplementäre Kapitalgüter oder Substitute spiegelt sich in diesem Modell nicht wider. In Summe bietet das Modell keine Möglichkeit eine realistische Veränderung oder Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Technologie zu modellieren.

Zwei weitere Kritikpunkte betreffen die empirische Relevanz der endogenen Wachstumstheorie sowie die Komplexität der Modelle.

Hahn (1993, S. 437) weist darauf hin, dass nicht geklärt ist, ob die Modelle der endogenen Wachstumstheorie eine bessere empirische Erklärungskraft haben. Die Modelle der endogenen Wachstumstheorie lassen sich in der Regel nur schwer empirisch überprüfen. Der Erkenntnisgewinn ist somit beschränkt. Dies liegt nicht zuletzt an der Formulierung von immer komplizierteren Modellen. Folgt man den Argumenten von Hahn, so entsteht teilweise der Eindruck, dass immer stärker der mathematische Modellbau im Vordergrund steht und nicht die Formulierung konsistenter ökonomischer Theorien.

In Summe werden somit die unklare Definition von Wissen sowie die nur schwer überprüfbare empirische Relevanz der Modelle kritisiert. Man kann daher argumentieren, dass die Analyse des Zusammenhangs zwischen Wissen und Wachstum zunächst eine tiefer gehende Analyse von Wissen und dessen Struktur erfordert.

3.3. Die evolutionäre Wachstumstheorie: Annahmen, Ergebnisse und Kritik

Die endogene Wachstumstheorie zeigte, dass auch der neoklassische Modellrahmen mit der Annahme steigender Grenzerträge kompatibel ist.

Generell repräsentiert die Analyse eines gesamtwirtschaftlichen Gleichgewichts, welches das Resultat optimaler Entscheidungen eines vollständig informierten repräsentativen Agenten ist, eine Art Standard innerhalb der traditionellen Ökonomie. Nichtsdestotrotz sehen viele Ökonomen diesen Ansatz als problematisch. Dies führte mitunter zur Etablierung der evolutionären Ökonomie und im Speziellen der evolutionären Wachstumstheorie. Auf Grund des doch radikalen Bruchs der evolutionären Wachstumstheorie mit den traditionellen Annahmen wird diese in der Regel als eigenständiges Feld und nicht als spezieller Zweig der Wachstumstheorie gesehen. Als geistiger Vater der evolutionären Ökonomie wird im Allgemeinen der österreichische Ökonom Joseph A. Schumpeter genannt (siehe beispielweise Fagerberg, 2002 oder Ayres und Warr, 2009, S. 166 ff. oder die Erläuterungen der Japan Association for Evolutionary Economics, 2006).

Die abweichende Vorstellung der evolutionären Ökonomie betreffen primär die Punkte Heterogenität und Informationsstand der Individuen. Darüber hinaus werden die Standardannahmen in Bezug auf das Optimierungsverhalten der Agenten sowie das Gleichgewichtskonzept verworfen. Auf die unterschiedliche Sichtweise hinsichtlich der genannten Punkte wird nachfolgend im Detail eingegangen.

Die evolutionäre Wachstumstheorie unterscheidet sich von der traditionellen Ökonomie zunächst dadurch, dass sie nicht dem repräsentativen Agenten-Ansatz folgt. In Beiträgen der evolutionären Ökonomie findet man daher selten die Annahme eines repräsentativen Agenten. An diesem Punkt ist bereits der Bruch der evolutionären Ökonomie mit der traditionellen Ökonomie klar erkennbar. Der repräsentative Agenten-Ansatz ist ja eines der traditionellen Konzepte der Standardtheorie und somit auch der exogenen und endogenen Wachstumstheorie. Die evolutionäre Wachstumstheorie argumentiert hingegen, dass die Ökonomie ein System heterogener Agenten ist (Fagerberg, 2002, S. 41). Die Heterogenität dieser Individuen ist ein entscheidendes Merkmal und bei der Analyse des ökonomischen Wachstumsprozesses von zentraler Bedeutung.

Was ist jedoch genau unter Heterogenität zu verstehen? Neben unterschiedlichen Präferenzen unterscheiden sich ökonomische Agenten vor allem hinsichtlich ihres Wissens und ihres Informationsstandes. Eine immer stärker wachsende Menge an ökonomisch relevanten Informationen und Zusammenhänge führt dazu, dass ökonomische Agenten nicht in der Lage sein können das strukturelle Modell der Wirtschaft zu kennen. Das Wirtschaftsgeschehen ist stark von Unsicherheit geprägt. Aus der Perspektive der evolutionären Wachstumstheorie haben die Agenten somit weder Sicherheit in Bezug auf die Struktur der Wirtschaft noch haben sie Sicherheit in Bezug auf die Entwicklung der zentralen ökonomischen Variablen. Traditionelle Annahmen wie Perfekte Rationalität widersprechen dieser Vorstellung der ökonomischen Realität massiv.

Da aus dieser Perspektive ein Agent nie vollständig informiert sein kann, kann er auch nicht die optimalen ökonomischen Entscheidungen treffen. So etwas wie Optimierung im Sinne einer optimalen ökonomischen Entscheidung ist wenn überhaupt nur in sehr beschränktem Rahmen möglich. Derartige Annahmen sind eine zu starke Vereinfachung angesichts der immer komplizierter werdenden Zusammenhänge mit denen sich ökonomische Agenten konfrontiert sehen. Die Handlungen der Agenten werden viel mehr durch routinemäßiges Verhalten, als durch gewinnmaximierende Strategien auf Basis der Gesamtheit der verfügbaren Informationen bestimmt.

Der Nobelpreisträger Paul Krugman argumentiert in diesem Zusammenhang wie folgt:

„You can still believe in maximizing individuals and some kind of equilibrium, but the complexity of the situations in which your imaginary agents find themselves often obliges you – and presumably them – to represent their behavior by some kind of ad hoc rule rather than as the outcome of a carefully specified maximum problem.“ (Krugman, 1996, S. 1).

Das gesamte Konzept eines gewinnmaximierenden repräsentativen Agenten, der darüber hinaus noch einen perfekten Informationsstand hat, ist daher aus der Sicht der evolutionären Wachstumstheorie nicht vertretbar. Dies inkludiert insbesondere die repräsentative Firma, die üblicherweise in den Wachstumsmodellen der neoklassischen Theorie unterstellt wird.

Ökonomische Agenten agieren im Allgemeinen nicht rational im Sinne der perfekten Rationalität. Wie Mallard (2011, S. 1 f.) erläutert, bezieht sich das Konzept der Rationalität in diesem Sinn auf die Fähigkeit ökonomischer Agenten optimale Entscheidungen basierend auf den Informationen der Vergangenheit, der Gegenwart sowie der Zukunft zu treffen. Das in der exogenen sowie endogenen Wachstumstheorie vorherrschende Konzept der perfekten Rationalität verschärft die Annahme noch weiter und geht davon aus, dass der Agent die Gesamtheit der für die Problemstellung relevanten und existierenden Informationen als Entscheidungsgrundlage heranzieht.

Eine realistischere Annahme ist, dass ökonomische Agenten beschränkt rational im Sinne des Konzepts von Herbert Simon (1972) agieren. Das Konzept der beschränkten Rationalität geht davon aus, dass ökonomische Agenten bei den meisten ökonomischen Entscheidungen nicht in der Lage sind alle für die Problemstellung relevanten Informationen zu identifizieren und in einer optimalen Weise zu verarbeiten. Die kognitiven Fähigkeiten der Menschen ermöglichen diese Verhaltensweise nicht. Auf Grund dieser Einschränkungen sind ökonomische Agenten gezwungen andere Entscheidungsstrategien anzuwenden (Mallard, 2011).

Als Folge dieser Sichtweise kann es so etwas wie ein wirtschaftliches Gleichgewicht in das eine Ökonomie konvergiert nicht geben. Anders formuliert, das neoklassische Bild der Ökonomie ist mit der Vorstellung eines globalen wirtschaftlichen Gleichgewichts vereinbar, das evolutionäre Bild hingegen nicht (Ayres und Warr, 2009, S. 166). Die evolutionäre Sichtweise tendiert zur Auffassung, dass sich die Ökonomie ständig in einer Art Ungleichgewicht befindet. Sollten sich Gleichgewichte einstellen, dann handelt es sich dabei um lokale und nicht um globale Gleichgewichte, die darüber hinaus noch instabil sind.

Dies führt zur zentralen Frage, welcher Prozess diese ständigen Ungleichgewichte produziert und die ökonomische Entwicklung bestimmt. Die Antwort lautet: Das permanente Wachstum von Wissen und die damit verbundenen Innovationen.

Diesbezüglich stimmen die endogene und die evolutionäre Wachstumstheorie überein. Neues Wissen und technologischer Fortschritt sind die zentralen Faktoren im Wachstumsprozess. Die endogene Wachstumstheorie richtet jedoch den Fokus primär auf die mit neuem Wissen einhergehenden positiven Externalitäten und deren Konsequenzen für das Wirtschaftswachstum (siehe z. B. Gundlach, 2001; Cortright, 2001; Fagerberg, 2002). Im Gegensatz dazu liegt der Fokus in der evolutionäre Wachstumstheorie auf der Rolle von Wissen als Quelle für Innovationen. Das Wirtschaftssystem repräsentiert aus dieser Perspektive heraus ein dynamisches System, welches sich im ständigen Wandel befindet. Wachstum darf nicht nur als quantitatives Phänomen verstanden werden. Es muss berücksichtigt werden, dass der ökonomische Entwicklungsprozess insbesondere durch qualitative Veränderungen getrieben wird. Aus diesem Grund wird in dieser Strömung auch primär von ökonomischer Entwicklung oder Wandel gesprochen und nicht von Wachstum. Diese qualitativen Veränderungen werden durch die unterschiedlichsten Innovationen (wie z. B. neue Technologien, Produkte oder Märkte) repräsentiert. Wissen spielt in dem Prozess

ständiger Veränderung die zentrale Rolle. Es ist sozusagen die treibende Kraft ökonomischen Wandels. Jason Potts verdeutlicht die Sichtweise dieser Arbeiten sehr deutlich. Er argumentiert:

„Knowledge is what the economic system is made of.“
(Potts, 2003, S. 59).

Ökonomisches Wachstum wird durch die Entstehung neuen Wissens ausgelöst. Basierend auf den Arbeiten von Nelson und Winter (1982) wird häufig davon ausgegangen, dass das Wissen in sogenannten Routinen gespeichert wird. Die evolutionäre Wachstumstheorie ist so stark von den Arbeiten dieser Ökonomen geprägt (Dang, 2007 sowie Becker, 2003 und 2005), dass eine genauere Betrachtung angemessen ist.

Nelson und Winter formulierten eine evolutionäre Theorie des ökonomischen Wandels und versuchten damit die Theorie der Firma neu zu formulieren (Mokyr, 1990, S. 274). Dabei nahmen sie stark Anlehnung an den Thesen von Charles Darwin (1859). Dessen Theorien sind bekanntlich der Grundstein der heutigen Evolutionsbiologie (Nelson, 2006 sowie Weber 2002, S. 7—40 und S. 122—126 geben einen guten Überblick über Darwins Thesen).

Zentrales Element ihrer Theorien ist der Begriff der Routine. Routinen repräsentieren Einheiten in denen das ökonomisch relevante Wissen von Firmen gespeichert wird. Diese umfassen sowohl organisatorisches als auch produktionsrelevantes Wissen. Der Output und die Entwicklung von Firmen werden von ihren Routinen bestimmt. Sie sind laut Hodgson (2003, S. 2) somit als eine Art Wissensspeicher zu verstehen.

Hodgson (2003, S. 358) sowie Dang (2007, S. 4) vergleichen die Bestandteile der Theorien von Nelson und Winter mit der biologischen Evolutionstheorie und kommen zu folgenden Ergebnissen (siehe auch Mokyr, 1990, S. 274—278 und Mokyr, 2002a). Eine Firma repräsentiert eine Art Organismus. Das Wissen von Firmen ist in Routinen gespeichert und kann am ehesten mit dem Begriff der Gene gleichgesetzt werden. Der Überlebenskampf von biologischen Organismen um knappe Ressourcen kann mit dem Kampf von Firmen am freien Markt um das ökonomische Überleben verglichen werden. Jene Firmen setzen sich durch, deren Routinen effizienter sind. Fitness kann in diesem Zusammenhang als Erfolg im ökonomischen Wettbewerb interpretiert werden. Der Wettbewerb führt zu einer Selektion der an die Markterfordernisse am besten „angepassten“ Routinen, diese müssen jedoch nicht notwendigerweise im traditionellen ökonomischen Sinn optimal sein.

Routinen können an andere Firmen weitergegeben werden. Ebenso können Routinen kopiert werden. Werden Routinen von anderen Firmen ohne Veränderung übernommen, so kommt es zu einer strikten Weitergabe des Wissens ohne Variation. Werden Routinen verändert oder kombiniert, so kommt es zu Innovationen, die im biologischen Sinn als Mutation interpretiert werden können. Die Übernahme von Routinen anderer Firmen kann als eine Art Vererbung von Wissen interpretiert werden.

Welche Routinen bzw. welches in den Routinen gespeicherte Wissen sich im Wettbewerb durchsetzt, wird somit durch einen evolutionären Prozess bestimmt. Der Prozess wirtschaftlicher Entwicklung wird somit durch die Mechanismen Selektion, Vererbung und Variation bestimmt – die drei zentralen Bestandteile evolutionärer Prozesse (Potts, 2003).

Das in Routinen gespeicherte Wissen entwickelt sich somit gemäß einem evolutionären Prozess. Potts (2003, S. 59) argumentiert, dass dies ein algorithmischer Prozess nach folgendem Muster ist. Innerhalb der Wirtschaft existiert eine bestimmte ökonomische Problemstellung und ein Pool an Wissen, welches die potentiellen Lösungskandidaten für dieses Problem enthält. Ein Selektionsmechanismus dient dazu, die Lösungsmöglichkeiten aus dem Wissenspool gegen das ursprüngliche Problem zu testen und zu bewerten. Die besten Lösungen werden repliziert und die schlechtesten Lösungen werden verworfen. Der Mechanismus der Variation sorgt dafür, dass die potentiellen Kandidaten für die endgültige

Lösung zufällig oder nach einem bestimmten Muster modifiziert werden. Dadurch entstehen neue Lösungskandidaten und der Prozess beginnt von neuem. Das Wachstum einer Ökonomie kann in der Folge als evolutionärer Prozess gesehen werden.

Im Gegensatz zur neoklassischen Theorie zeichnen sich ökonomische Veränderungen im Allgemeinen nicht durch einen kontinuierlichen und glatten Übergang aus. Dies gilt insbesondere für wirtschaftliche Veränderungen auf der Mikroebene. Die neoklassische Sichtweise, dass Ökonomien Schritt für Schritt von einem Gleichgewicht in das nächste tendieren, kann aus der Sicht der evolutionären Wachstumstheorie daher nicht akzeptiert werden. Vielmehr handelt es sich um eine diskontinuierliche Anpassung. Cortright (2001, S. 14) erläutert, dass der österreichische Ökonom Joseph A. Schumpeter das Gleichgewichtskonzept diesbezüglich stark kritisierte. Das Wirtschaftsleben ist durch einen ständigen Wandel geprägt, der durch die Innovationstätigkeit von Firmen ausgelöst wird. Die Innovationstätigkeit wird dabei von der Aussicht auf monopolartigen Renten (bzw. Profite) getrieben. Durch die Generierung von neuen Produkten, neuen Technologien oder Absatzformen (usw.) ist es Firmen möglich zu mindestens kurzfristig höhere Profite als die Konkurrenz zu erzielen. Innovationen versprechen sozusagen überdurchschnittliche Gewinne. Diese Innovationen haben in der Regel den Effekt, dass sie bestehende Produkte, Firmen oder Technologien vom Markt vertreiben. Durch etwas Neues wird somit etwas Altes sozusagen zerstört. Schumpeter nannte dieses Konzept deshalb *kreative Zerstörung*.

Wenn bestehende Technologien schrittweise ineffizient werden, dann steigt gleichzeitig der Anreiz für Firmen F&E zu betreiben. Durch F&E können neue Technologien entdeckt werden, die die Möglichkeit für monopolartige Renten eröffnen. Dabei handelt es sich um einen Mechanismus, der einen qualitativen Wandel der Wirtschaft auf der Ebene der Firmen auslöst. Ab einem gewissen Punkt wurde genug F&E betrieben um eine bestehende Technologie abzulösen (Ayres und Warr, 2009, S. 11) – die Kreativität führt zur Zerstörung. Diese kreative Zerstörung der Firmen führt dazu, dass sich ökonomischer Wandel in der Regel als diskontinuierlicher Prozess abzeichnet (Cortright, 2001, S. 14).

Anzumerken ist, dass das Konzept der kreativen Zerstörung auch ziemlich stark in den Arbeiten der endogenen Wachstumstheorie Einzug gehalten hat. Insbesondere in den Arbeiten von Aghion und Howitt (1999).

Die zentralen Ergebnisse der evolutionären Wachstumstheorie können wie folgt zusammengefasst werden.

Das Wachstum von Ökonomien basiert auf dem Wachstum von Wissen. Die Entwicklung des ökonomischen Systems wird durch die Entstehung von neuem Wissen bestimmt. Wissen verfügt über unterschiedlichste Aspekte, die für den Wachstumspfad einer Ökonomie entscheidend sind. Dabei geht es bei Weitem nicht nur um positive Externalitäten, die mit der Entstehung von neuem Wissen verbunden sind. Wissen muss als gleichverteiltes ökonomisches Phänomen verstanden werden, welches in Firmen primär in Form von Routinen gespeichert ist (Fagerberg, 2002, S. 40). Institutionelle sowie geografische Aspekte spielen dabei ebenso eine Rolle wie steigende Grenzerträge im Rahmen der Produktion oder Lock-In-Effekte.

Innovation ist der zentrale Faktor für ökonomisches Wachstum. Mehr Innovationen führen zu mehr ökonomischer Aktivität. Ohne Innovationen kommt jede ökonomische Aktivität über Kurz oder Lang zum Erliegen. Der Begriff der Innovation ist dabei nicht nur im technologischen Sinn zu verstehen. Innovationen sind in diesem Kontext eher allgemein als Neuheit zu verstehen und können daher auch beispielweise neue Organisationsformen, Technologien, Geldformen oder Märkte repräsentieren. Technologische Innovationen spielen jedoch eine ganz zentrale Rolle im ökonomischen Wachstumsprozess. Dabei geht es sowohl um einen quantitativen als auch um qualitativen Wandel. Wachstum darf nicht nur als quantitatives Phänomen betrachtet werden.

Die Heterogenität der ökonomischen Agenten ist von entscheidender Bedeutung in Bezug auf die Innovationstätigkeit einer Ökonomie. Die Agenten sind dabei nicht vollständig informiert im Sinne der perfekten Rationalität. Ebenso sind sie im Allgemeinen nicht in der Lage alle problemrelevanten Informationen zu sammeln und auszuwerten. Ökonomische Entscheidungen werden daher immer nur auf Basis eines beschränkten Informationsstandes getroffen.

In Summe sind traditionelle ökonomische Konzepte wie das der gewinnmaximierenden repräsentativen Firma oder eines gesamtwirtschaftlichen Gleichgewichts aus der Sicht der evolutionären Wachstumstheorie ungeeignet um ökonomisches Wachstum zu analysieren.

Evolutionäre Gedanken und Theorie sind in den vergangenen Jahren innerhalb der Ökonomie sozusagen in Mode gekommen. Dies hat jedoch auch einige Kritiker auf den Plan gerufen.

Zunächst muss der Punkt genannt werden, dass der zentrale Begriff der Routine in der Literatur nicht unumstritten ist. Vorrangig wird die ungenaue Begriffsdefinition kritisiert. Becker (2005) argumentiert beispielsweise, dass das Konzept der Routinen weder in Bezug auf die Dimension noch auf die Funktion präzise ist und führt einige offene Punkte für eine Forschungsagenda in diesem Zusammenhang an (insbesondere *ibid.*, S. 255—258).

Ein weiterer allgemeinerer Kritikpunkt ist die inflationäre Anwendung evolutionärer Modelle zur Beschreibung ökonomischer Prozesse. Hirshleifer (2001, S. 193) argumentiert, dass evolutionäre Modelle nicht übermäßig eingesetzt werden sollten. Evolution repräsentiert nicht das einzig relevante Muster sozialen Wandels. Hier wäre anzumerken, dass im wirtschaftlichen Kontext vor allem der plötzliche Wandel immer mehr an Bedeutung gewinnt. Dies liegt nicht zuletzt an der globalen Verbreitung der IKT und der damit einhergehenden stärkeren Vernetzung ökonomischer Agenten bzw. ihres Wissens.

Darüber hinaus sind wenige Kritikpunkte an der evolutionären Wachstumstheorie in der Literatur zu finden. Dies verwundet kaum, da diese ja mitunter aus der Kritik an den traditionellen ökonomischen Denkschulen heraus entstanden ist.

4. Technologischer Fortschritt in den Wachstumstheorien

Auf Basis der bisherigen Ausführungen sollte ersichtlich sein, dass technologischer Fortschritt den Wachstumsprozess auf unterschiedliche Art und Weise beeinflusst. Aus wachstumstheoretischer Sicht ist insbesondere dessen Einfluss auf den gesamtwirtschaftlichen Produktionszusammenhang von Bedeutung und damit auf den Output. Im Detail stellt sich die Frage, wie sich technologischer Fortschritt auf die Beiträge der gesamtwirtschaftlichen Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit zum Output auswirken.

Dieses Kapitel beleuchtet die diversen theoretischen Ansätze in kompakter Form. Dabei werden die Unterschiede zwischen der exogenen, endogenen sowie evolutionären Wachstumstheorie verdeutlicht. Zunächst wird auf die unterschiedlichen Effekte technologischen Fortschritts innerhalb der exogenen Wachstumstheorie eingegangen. Danach wird die Sichtweise der evolutionären Ökonomie dargestellt. Da diese oft die Grundlage für innovative Ansätze der Modellierung technologischen Fortschritts in der endogenen Wachstumstheorie bildet, wird zum Schluss auf die Sichtweise der endogenen Wachstumstheorie eingegangen.

4.1. Technologischer Fortschritt in der exogenen Wachstumstheorie

Die unterschiedlichen Varianten technologischen Fortschritts innerhalb der exogenen Wachstumstheorie beziehen sich in der Regel auf ihre unterschiedlichen Effekte in Bezug auf die Produktionsfaktoren. Im Wesentlichen geht es dabei um die Frage, wie sich die Beiträge der Faktoren Kapital und Arbeit zum Output auf Grund technologischen Fortschritts verändern. Im Rahmen einer neoklassischen Produktionsfunktion unterscheidet man dabei üblicherweise 3 Varianten.

Gandolfo (1997, S. 181 ff.), Maußner und Klump (1996, S. 62—67) sowie Barro und Sala-i-Martin (2004, S. 52 f.) führen diese Varianten an. Diese sind 1) Hicks-neutraler, 2) Solow-neutraler und 3) Harrod-neutraler technologischer Fortschritt. Die Namen dieser Varianten gehen auf die Ökonomen John R. Hicks, Robert M. Solow und Roy F. Harrod zurück. Was „neutral“ in diesem Zusammenhang bedeutet, wird in der Folge näher erklärt.

Im Speziellen unterscheiden sich diese Varianten dahingehend, wie sie die existierende Einkommensverteilung oder das Verhältnis der Faktoreinkommen beeinflussen bzw. nicht beeinflussen. Die relevanten Relationen und Größen sind in diesem Zusammenhang analog zu Maußner und Klump (1996, S. 62) wie folgt definiert. Hierbei bezeichnet r den Realzinssatz, w den Reallohn und wie gewohnt K den Faktor Kapital, L den Faktor Arbeit sowie Y den Output bzw. das Einkommen. Das Verhältnis zwischen Lohn- und Kapitaleinkommen ist definiert als $\frac{wL}{rK}$ und kann auch als Kennzahl für die Einkommensverteilung angesehen werden. Der Kapitalkoeffizient und der Arbeitskoeffizient sind wie üblich für $\frac{K}{Y}$ und $\frac{L}{Y}$ und die Kapitalintensität ist definiert als $\frac{K}{L}$ (siehe hierzu auch Kapitel 6).

Maußner und Klump (1996, S. 62 ff.) erläutern, dass sowohl Hicks-neutraler (bei einer gegebenen Kapitalintensität) als auch Harrod-neutraler technologischer Fortschritt (bei einem gegebenen Kapitalkoeffizienten) die Einkommensverteilung unberührt lassen. Im Gegensatz dazu lässt Solow-neutraler technologischer Fortschritt die Beziehung der Faktoreinkommen beim Vorliegen eines konstanten Arbeitskoeffizienten unverändert (ibid., S. 62, Fußnote 8).

Die Bezeichnung „neutral“ drückt somit aus, dass die jeweilige Variante technologischen Fortschritts bestimmte Relationen (wie z. B. eine gegebene Einkommensverteilung) im Rahmen einer neoklassischen Produktionsfunktion nicht verändern. Maußner und Klump (ibid., S. 63) sprechen in diesem Zusammenhang von dem *Neutralitätsprinzip*.

Hierbei gilt es zu beachten, dass in der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur in der Regel ein anderes Prinzip zur Darstellung technologischen Fortschritts verwendet wird. Dieses

Prinzip wurde zu Beginn dieses Kapitels angedeutet. Dabei konzentriert man sich auf den Einfluss technologischen Fortschritts auf die Inputfaktoren. Erhöht technologischer Fortschritt beispielweise den Beitrag des Faktors Kapital, so bezeichnet man diese Variante als kapitalvermehrend (auch *capital augmenting*). Im anderen Fall spricht man von arbeitsvermehrendem (auch *labour augmenting*) Fortschritt. Die Wirkungsweise technologischen Fortschritts ist somit mit einer physischen Erhöhung der Inputfaktoren gleichzusetzen. Mit anderen Worten, technologischer Fortschritt erhöht den Beitrag der Inputfaktoren zum Output. Dabei wird zwischen kapital- oder arbeitsvermehrend differenziert. Diese Herangehensweise kann man in Bezug auf das oben erwähnte Neutralitätsprinzip als *Prinzip der Faktorvermehrung* bezeichnen.

Der genaue Zusammenhang zwischen den beiden Prinzipien lässt sich wie folgt erklären. Hicks-neutraler technologischer Fortschritt wirkt im gleichen Ausmaß sowohl arbeits- als auch kapitalvermehrend. Für Solow-neutralem technologischen Fortschritt kann hingegen gezeigt werden, dass er nur kapitalvermehrend wirkt. Harrod-neutraler technologischer Fortschritt wirkt wiederum nur arbeitsvermehrend (Maußner und Klump, 1996, S. 64). Aus der Perspektive des Neutralitätsprinzips haben beide Varianten somit eine genaue Entsprechung im Prinzip der Faktorvermehrung (für weitere Details siehe Gandolfo, 1997 oder Barro und Sala-i-Martin, 2004).

Hicks-neutraler technologischer Fortschritt bezeichnet somit den Effekt, dass technologischer Fortschritt unabhängig von qualitativen oder quantitativen Veränderungen der Inputfaktoren Kapital und Arbeit den Output erhöht. Die Beiträge beider Faktoren werden gleichmäßig positiv beeinflusst. Hicks-neutraler technologischer Fortschritt wird daher auch als *output augmenting* bezeichnet. Folgt man nun Barro und Sala-i-Martin (2004, S. 52 f.) sowie Gandolfo (1997, S. 182 f.) kann dieser Zusammenhang durch folgende Beziehung dargestellt werden. Dabei drückt $A(t)$ aus, dass technologischer Fortschritt eine Funktion der Zeit ist.

$$Y = A(t)F(K, L). \quad (7)$$

In Bezug auf diese Variante wird in der Literatur häufig davon gesprochen, dass technologischer Fortschritt wie „Manna vom Himmel“ fällt (z. B., *ibid.*, S. 182). Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass technologischer Fortschritt nicht aus dem Modell heraus erklärbar ist und alle Produktionsfaktoren gleichermaßen davon profitieren. Diese Variante technologischen Fortschritts kann in der Praxis in Produktionsbetrieben beispielweise durch Organisationsänderungen erzielt werden.

Solow-neutraler technologischer Fortschritt bezeichnet hingegen den Sachverhalt, dass technologischer Fortschritt den Faktor Kapital produktiver werden lässt. Die Beiträge des Faktors Kapital zum Output werden durch technologischen Fortschritt größer. Daher wird diese Variante auch als *capital augmenting* bezeichnet. Formal kann dies wie folgt ausgedrückt werden

$$Y = F[A(t)K, L]. \quad (8)$$

Der Effekt technologischen Fortschritts führt somit dazu, dass der Faktor Kapital produktiver wird und mehr Beitrag zum Output leistet.

Im Gegensatz zu Solow-neutralem technologischem Fortschritt führt Harrod-neutraler zu einer Produktivitätssteigerung des Faktors Arbeit. Diese Variante wird daher auch als *labour augmenting* bezeichnet.

$$Y = F[K, A(t)L] \quad (9)$$

Gandolfo (1997, S. 182 ff.) weist darauf hin, dass im Rahmen einer Cobb-Douglas-Produktionsfunktion, Hicks-neutraler sowie Solow-neutraler Fortschritt als Harrod-neutraler Fortschritt ausgedrückt werden können. Im Rahmen des neoklassischen Wachstumsmodells ist *nur* Harrod-neutraler Fortschritt kompatibel mit einer Gleichgewichtslösung (Gandolfo, 1997).

Anzumerken ist, dass die soeben diskutierten Arten technologischen Fortschritts im Rahmen einer neoklassischen Produktionsfunktion üblicherweise Beispiele für exogenen technologischen Fortschritt darstellen. $A(t)$ ist somit nicht aus den jeweiligen Modellen heraus erklärbar. Greenhalgh und Rogers (2010, S. 224 f.) argumentieren in diesem Zusammenhang, dass diese Art der Modellierung technologischen Fortschritts für Entwicklungs- oder Schwellenländer nicht völlig unrealistisch ist. Diese Ökonomie können die Technologie und somit das Wissen anderer Länder im Rahmen der ökonomischen Produktion adaptieren und anwenden. Technologischer Fortschritt kann für diese Länder als von außen (exogen) bestimmt betrachtet werden. Für hochentwickelte Ökonomien ist dies jedoch eine eher unrealistische Annahme. Mit anderen Worten, in modernen Ökonomien ist technologischer Fortschritt selbst ein Produkt des Wirtschaftssystems. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass technologischer Fortschritt von einer Vielzahl an Faktoren bestimmt wird. Bis neues (technologisches) Wissen stärkeres Wirtschaftswachstum generiert, muss ein komplexer Transmissionsprozess durchlaufen werden. Dabei sind die Ausgestaltung des Bildungs- und des Rechtssystems bzw. im Allgemeinen die Ausgestaltung des nationalen Innovationssystem entscheidend. Aus wirtschaftspolitischer Sicht lässt sich nur schwer ein Automatismus erkennen, der neues Wissen in höheres Wachstum transformiert. In erster Linie muss die Politik positiv auf die Rahmenbedingungen Einfluss nehmen.

Die zentrale Rolle technologischen Fortschritts für die ökonomische Entwicklung wurde bereits von Schumpeter – dem geistigen Vater der evolutionären Wachstumstheorie – erkannt. Auf das Verständnis der evolutionären Wachstumstheorie in Bezug auf technologischen Fortschritt wird im nachfolgenden Kapitel eingegangen.

4.2. Technologischer Fortschritt in der evolutionären Wachstumstheorie

Die Sichtweise der evolutionären Wachstumstheorie in Bezug auf technologischen Fortschritt bedingt generell nicht eine bestimmten Variante im Sinne von Hicks-, Solow- oder Harrod-neutralen technologischen Fortschritt. Der Ansatz der evolutionären Wachstumstheorie geht viel weiter. Technologischem Fortschritt wird dabei sogar eine höhere Bedeutung zugeschrieben als beispielsweise in der endogenen Wachstumstheorie. Aus Sicht der evolutionären Wachstumstheorie repräsentiert technologischer Fortschritt nämlich das zentrale Element wirtschaftlicher Entwicklung. Diese Perspektive steht in enger Beziehung zu den Arbeiten von Joseph A. Schumpeter und seiner Konjunkturtheorie (siehe hierzu auch beispielsweise Ayres und Warr, 2002b; Fagerberg, 2002; Aghion und Howitt, 2009, S. 85–101; Maußner und Klump, 1996, S. 18–21).

Aus Sicht der evolutionären Wachstumstheorie ist technologischer Fortschritt Dreh- und Angelpunkt wirtschaftlicher Entwicklung. Dieser führt nämlich zu einem ständigen strukturellen Wandel des Wirtschaftssystems. Die bekannte Ansicht der evolutionären Ökonomie, dass Gleichgewichte im Sinne der (neo-)klassischen Theorie eher die Ausnahme bilden, wird dabei durch diesen ständigen Strukturwandel begründet. Entscheidend ist, dass dieser ständige Wandel durch technologischen Fortschritt ausgelöst wird und dieser aus neuem Wissen heraus resultiert.

Die Grundlage für diese Perspektive wurde im Wesentlichen von Schumpeter gelegt. Schumpeter argumentierte, dass technologischer Fortschritt die Triebkraft für die Entwicklung und das Wachstum einer Ökonomie ist. Im Speziellen sind dabei Innovationen

entscheidend. Diese sind das Ergebnis ständigen technologischen Fortschritts und verantwortlich für die permanente Veränderung und somit für das Wachstum der Ökonomie. Der Begriff der Innovationen ist in diesem Kontext breit gefasst und steht für neue Produkte, neue Organisationsformen oder sogar neue Märkte. In dem Prozess technologischen Fortschritts nimmt der Unternehmer als wirtschaftliche Entität eine ganz spezielle Rolle ein (Ricketts, 2002, S. 53—85). Es ist der Unternehmer, der neue technologische Entwicklungen in eine ökonomisch verwertbare Form bringt. Dadurch, dass er technologisches Wissen mit einer ökonomischen Anwendung versieht und dieses in eine vermarktbare Form bringt, macht er daraus Innovationen. Dies ist in der Regel ein äußerst risikobehaftetes Unterfangen. Warum nimmt der Unternehmer dieses Risiko auf sich? Die Aussicht auf monopolartige Profite treibt ihn an. Gelingt es ihm mit einer Innovation am Markt eine Monopolstellung einzunehmen, so ist er in der Lage überdurchschnittlich Gewinne zu lukrieren. Das wirtschaftliche Risiko, welches mit diesem Unternehmergeist verbunden ist, steht jedoch den hohen Profiten gegenüber.

Zwei Aspekte sind an Schumpeters Theorien aus Sicht der evolutionären Wachstumstheorie von besonderer Bedeutung. Auf der einen Seite gilt es zu beachten, dass der Innovationsprozess sowohl ein destruktives als auch ein kreatives Element beinhaltet. Auf der anderen Seite muss beachtet werden, dass das Wirtschaftswachstum eher ein zyklischer als ein kontinuierlicher Prozess ist. Der letzte Aspekt wird laut der Theorie durch neues Wissen bzw. Innovationen bedingt. Daher wird in der evolutionären Wachstumstheorie auch vorrangig von der *Entwicklung* der Ökonomie und nicht von dem *Wachstum* der Ökonomie gesprochen. Beide Aspekte werden in der Folge etwas näher beleuchtet.

Innovationen führen im Allgemeinen dazu, dass eine Innovation aus der Vergangenheit obsolet wird. In Abhängigkeit von der Art der Innovation wird somit ein bestehendes Produkt, eine Organisationsform oder sogar ein bestehender Markt aus ökonomischer Perspektive außer Kraft gesetzt. Schumpeter bezeichnete diesen Effekt sprechend als *kreative Zerstörung* (siehe beispielsweise Aghion und Howitt, 2009, S. 16 oder Ayres und Warr, 2009, S. 11). Durch Kreativität wird etwas Neues geschaffen und gleichzeitig wird etwas Bestehendes zerstört. Dieser Zerstörungsprozess ist entscheidend für den Prozess wirtschaftlicher Entwicklung. Im Kern ist dies die Quelle für wirtschaftliche Entwicklung und strukturellen Wandel. Technologischer Fortschritt ist dabei der Auslöser all dieser Prozesse. Innovationen sind ja die wirtschaftliche Anwendung von neuem Wissen.

Die Konzentration auf Innovationen sowie die Betonung der Rolle des Unternehmers im Prozess technologischen Fortschritts waren wahrscheinlich die größten Beiträge Schumpeters zur Wachstumstheorie. Schumpeter ging jedoch noch weiter und formulierte eine zyklische Konjunkturtheorie, die im Kern auf technologischen Fortschritt basiert (Schumpeter, 1939; Hanappi, 1997, S. 37 f.).⁴ Anzumerken ist, dass Theorien über Konjunkturtheorien im Wesentlichen die Vorreiter der heutigen Wachstumstheorie waren. Schumpeter war überzeugt, dass die Entwicklung der Ökonomie von kurz-, mittel- und langfristigen Wellen bestimmt wird. Diese Wellen bezeichnete er als Kitchin-, Juglar- und Kondratieffzyklus (Hanappi, 1997, S. 38; Maußner und Klump, 2002, S. 218 ff.). Laut Schumpeter steht konzentrierter technologischer Fortschritt in Form von gebündelten Innovationen am Anfang der langen Konjunkturwellen. Da es sich um Wellen handelt, existiert ein zyklischer Trend in der Entwicklung des Wirtschaftssystems. Wachstum muss somit als zyklischer und nicht kontinuierlicher Prozess verstanden werden. Dieser zyklische Aspekt wurde auch empirisch bestätigt (siehe beispielweise Gandolfo, 1997, S. 458). Insbesondere nach dem zweiten Weltkrieg verzeichnet man in den Industrienationen häufig Zyklen von Wachstumsraten des Bruttoinlandsprodukts (BIP) und nicht kontinuierlich steigende Raten.

⁴ Die nachfolgenden Zusammenhänge wurden von mir auch im Rahmen einer Prüfungsarbeit im Sommersemester 2012 an der Technischen Universität Wien zum Thema Evolutionary Economics erläutert.

Das Wachstum von Ökonomien als zyklischen Prozess zu verstehen steht in enger Beziehung zum Kapitalismus. Karl Marx [1969, (1872)] prägte den Begriff des Kapitalismus und argumentiert, dass sich das kapitalistische System zyklisch entwickelt (siehe auch Schumpeter, 1943). Dieser Zyklus wird mitunter durch die Veränderung des Verhältnisses der Arbeiterklasse und der Kapitaleigner ausgelöst. Welche Klasse in der Ökonomie stärker repräsentiert ist, wird primär durch technologischen Fortschritt bedingt.

Technologischer Fortschritt reduziert den Bedarf an Arbeitskräften. In dieser Phase steigen die Profite und dadurch wird die Position der Kapitaleigner gestärkt. Die Verbreitung und Alterung der Technologie führt im Zeitablauf wiederum zu einem steigenden Bedarf an Arbeitskräften. Das Verhältnis zwischen Arbeitern und Kapitaleignern beginnt zu kippen. Beim Auftreten neuer Innovationen beginnt dieser Zyklus von neuem.

Der zyklische Aspekt wurde sehr stark in den Arbeiten von Richard M. Goodwin betont. Goodwin (1965) präsentierte als einer der ersten ein Modell mit Wachstumszyklen in denen die Theorien von Schumpeter und Marx vereint wurden (siehe hierzu auch Metcalfe, 2007). Anzumerken ist, dass sowohl die Konzentration auf den zyklischen Aspekt als auch das formale Modell ein Novum war. Im Speziellen formulierte Goodwin ein Modell auf Basis von Lottka-Volterra Gleichungen (siehe hierzu auch Gandolfo, 1997, S. 458—464) zur Analyse der Ökonomie, welche ein chaotisches Systemverhalten produzieren. Seine späteren Arbeiten konzentrierten sich noch stärker auf die Integration zyklischer Wachstumstheorien (Goodwin, 1985 und 1990).

Entscheidend aus Sicht dieser Arbeit ist, dass technologischer Fortschritt in all diesen Modellen eine zentrale Rolle in Bezug auf den Wendepunkt der Wachstumszyklen spielt. Technologischer Fortschritt ist somit Dreh- und Angelpunkt der unterschiedlichen Theorien und Strömungen innerhalb der evolutionären Wachstumstheorie. Dieser spielt sowohl in Schumpeters Konjunktur- und Innovationstheorien als auch in den kapitalistischen Theorien von Marx eine zentrale Rolle. In der Vielzahl an Beiträgen zu diesen Themen wird leider oft ein entscheidender Aspekt zu wenig betont. Technologischer Fortschritt resultiert aus der Akkumulation von neuem Wissen.

4.3. Technologischer Fortschritt in der endogenen Wachstumstheorie

Wie bereits erwähnt, ist einer der größten Kritikpunkte an den Modellen der exogenen Wachstumstheorie jener, dass technologischer Fortschritt nicht aus den Modellen heraus erklärt wird (Hahn, 1993; Gundlach, 2001). Das Problem des Fehlens einer endogenen Erklärung wurde teilweise durch die endogene Wachstumstheorie gelöst. In dieser Strömung wird die Veränderung der Technologie, das heißt im Detail die Wachstumsrate der Technologie endogen erklärt. Die Erklärung des Produktivitätswachstums auf Basis der Modellgrößen ist somit ein zentraler Bestandteil von Wachstumstheorien. Hierzu baut die endogene Wachstumstheorie mitunter stark auf den Ideen und Ansichten der evolutionären Wachstumstheorie auf.

Das Wesen von Innovationen bestimmt auch sehr stark die Modellierung technologischen Fortschritts innerhalb der endogenen Wachstumstheorie. Der Einfluss von Schumpeters Thesen ist dabei nicht von der Hand zu weisen. In Summe konzentriert man sich dabei auf die Formulierung technologischen Fortschritts als Innovationsprozess, wobei jedoch unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt werden. Wie bereits erläutert, führt technologischer Fortschritt zu neuen oder verbesserten Techniken bzw. Technologien. Diese können neue oder verbesserte Produkte oder Organisationsformen (etc.) hervorbringen. Innovationen repräsentieren somit entweder etwas völlig Neues oder eine Verbesserung von etwas Bestehendem. Diese Zweiteilung spiegelt sich auch stark in der Modellierung technologischen Fortschritts innerhalb der endogenen Wachstumstheorie wider.

Aghion und Howitt (2009, S. 14—18) sprechen in diesem Zusammenhang auch von innovationsbasierten Wachstumsmodellen, die sich im Wesentlichen in zwei Klassen einteilen lassen. Auf der einen Seite sind dies Modelle in denen Innovationen neue Varianten von Produkten hervorbringen. Die Variantenvielfalt bestimmt dabei die langfristige Pro-Kopf Wachstumsrate des Outputs (ibid. S. 15). Ein Beispiel für diese Klasse von Modellen ist mitunter das bereits im Detail erläuterte Modell von Romer (1990). Auf der anderen Seite sind dies Modelle in denen Innovationen Qualitätsverbesserungen bewirken, die darüber hinaus einen Effekt kreativer Zerstörung im Sinne Schumpeters auslösen. Die langfristige Wachstumsrate der Ökonomie wird in diesen Modellen von der endogen bestimmten Rate des technologischen Fortschritts dominiert. Diese hängt wiederum von der Innovationsrate ab (Aghion und Howitt, 2009, S. 16). Beispiele für diese Modellklasse sind Segerstrom et al. (1990) und Aghion und Howitt (1992). Da in diesen Modellen stark der Aspekt der kreativen Zerstörung an technologischem Fortschritt im Vordergrund steht, wird dieser Ansatz auch als *Schumpeter-Paradigma* bezeichnet.

Da jede Theorie — auch jede Wachstumstheorie — letztendlich an ihrer empirischen Erklärungskraft gemessen wird, werden im nächsten Kapitel einige Indikatoren im Zusammenhang mit Wachstum und Technologie diskutiert. Darauf aufbauend werden im Anschluss einige Kennzahlen im Zusammenhang mit den diskutierten Indikatoren für Österreich und die EU präsentiert und diskutiert.

5. Indikatoren für Wachstum und Technologie

In diesem Kapitel werden die zentralen Indikatoren im Zusammenhang mit Wachstum und Technologie diskutiert. Darauf aufbauend werden einige Kennzahlen für ausgewählte Länder präsentiert. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Österreich und der Europäischen Union (EU).

5.1. Indikatoren für Wachstum, Wissen und Technologie

In der Regel wird das BIP als zentraler Indikator für die Wirtschaftsaktivität eines Landes verwendet. Das BIP ist üblicherweise definiert als die Menge an produzierten Gütern und Dienstleistungen innerhalb einer Betrachtungsperiode (siehe z. B. Otruba et al., 1996, S. 2). Bei Verwendung dieser Kennzahl als Wachstumsindikator wird häufig implizit davon ausgegangen, dass die Wirtschaftsaktivität die Qualität des Lebensstandards der Individuen in diesem Land widerspiegelt. In diesem Zugang ist ein höheres BIP gleichbedeutend mit einem höheren Lebensstandard. Steigt das BIP, so steigt auch die Wohlfahrt der Individuen. Das BIP ist das bekannteste Beispiel für eine Stromgröße. Um Verzerrungen bei Ländervergleichen auf Grund unterschiedlicher Bevölkerungszahlen auszuschließen, wird üblicherweise mit dem BIP pro Kopf in empirischen Studien gearbeitet. Die Berücksichtigung der Populationsgröße bzw. der Bevölkerungsentwicklung geht im Wesentlichen auf die Ideen von Thomas Malthus zurück, der im Jahr 1798 als erster die Konsequenzen eines starken Bevölkerungswachstums für den Lebensstandard aufzeigte (Greenhalgh und Rogers, 2010, S. 216, Fußnote 5). Geht man von der durchaus plausiblen Annahme aus, dass höheres Einkommen mit steigendem Lebensstandard positiv korreliert ist, dann muss zusätzlich die Bevölkerungsentwicklung bei der Analyse des Lebensstandards berücksichtigt werden. Wächst der Output schwächer als die Bevölkerung, so würde dies über Kurz oder Lang ceteris paribus zu einer Reduktion des pro Kopf Einkommens und in der Folge des Lebensstandards führen.

Um etwaigen Verzerrungen auf Grund unterschiedlicher Preisniveaus der betrachteten Perioden entgegenzuwirken, wird im Allgemeinen mit dem realen BIP gearbeitet. Durch Definition einer Basisperiode und Bewertung der Daten unterschiedlichen Perioden zu dem Preis der Basisperiode ist eine Berechnung des realen BIP möglich. Das reale BIP weist somit keine monetär bedingten Verzerrungen auf. Zentraler und für Ökonomen in der Regel der interessanteste Indikator ist die Wachstumsrate des realen BIP pro Kopf, wobei dieses üblicherweise mit y bezeichnet wird. Formal bedeutet dies in diskreter und kontinuierlicher Darstellung $(y_{t+1} - y_t)/y_t$ bzw. $(dy/dt)/y$ (siehe beispielweise Carlin, 2009, S. 1).

Im Zusammenhang mit dem Test makroökonomischer Wachstumstheorien dominiert das BIP die wirtschaftswissenschaftliche Literatur. Das BIP ist somit für wachstumstheoretische Fragen wohl die am weitesten verbreiteten Kennzahlen innerhalb der Ökonomie. In Bezug auf technologischen Fortschritt und Wissensakkumulation ist das Bild nicht so klar.

Im Rahmen empirischer Studien wird häufig der Zusammenhang zwischen den Ausgaben für F&E in Prozent des BIP und die daraus resultierenden Innovationen analysiert. Dabei spielt vor allem die Anzahl an angemeldeten Patenten in einem Land oder Wirtschaftssektor eine entscheidende Rolle. Neben dem klassischen Indikator der Patentanmeldungen wurde auch eine Vielzahl an eher weniger bekannten Indikatoren entwickelt. Die Spannweite dabei ist riesig. Ein Beispiel aus diesem Spektrum ist die Anzahl an Open Source Softwareprojekten im Vergleich zu Projekten im Bereich proprietärer Software. Des Weiteren spielt die Anzahl an Hochschulabsolventen bestimmter Studienrichtungen eine wichtige Rolle. Letztere werden oft als Indikator für das Wachstum bestimmter Wissensbereiche herangezogen. Oftmals wird auch der Zusammenhang zwischen der Anzahl an Absolventen technischer und naturwissenschaftlicher Richtungen und der Innovationstätigkeiten eines Landes getestet.

Es dürfte erkennbar sein, dass eine Vielzahl an unterschiedlichsten Technologie-Indikatoren existieren muss. Die Ursache für diese heterogene Menge an Indikatoren liegt mit großer Wahrscheinlichkeit daran, dass Wissen nicht direkt gemessen werden kann (siehe hierzu Hanappi, 2008a, S. 2 f. und auch 2011b). Aus diesem Umstand heraus hat man Indikatoren entwickelt, die sich nicht direkt auf die Entstehung von neuem Wissen konzentrieren, sondern auf die daraus resultierenden Innovationen. Dabei gilt es zu beachten, dass die meisten dieser Indikatoren immer nur einen bestimmten Aspekt der Innovationstätigkeit messen. Indirekt wird somit davon ausgegangen, dass Innovationstätigkeit bis zu einem gewissen Grad ein Indikator für die Akkumulation von neuem Wissens ist. Nach der Messung mit Hilfe bestimmter Indikatoren müssen in der Regel in einem weiteren Schritt die Auswirkungen der Innovationstätigkeiten auf das Wachstum analysiert werden. In diesem Kontext ist die Dominanz der Ausgaben für F&E in Prozent des BIP als zentraler Indikator verständlich. Es existiert somit ein komplexer Transmissionsprozess der bei der Wissensakkumulation beginnt und in einem höheren Wirtschaftswachstum endet. Die Vielzahl an Indikatoren misst stets nur einen bestimmten Teilaspekt dieses Prozesses. So weisen beispielsweise Antonelli und Amidei (2011, S. 111) darauf hin, dass die Ausgaben für F&E oder die Anzahl der beantragten Patente als Indikatoren nur einen Teilaspekt des ökonomischen Prozesses messen, der auf die Kodifizierung von technologischem Wissen abzielt. Aus diesem Wissen kann möglicherweise eine Innovation und in der Folge ökonomisches Wachstum resultieren. Dies ist allerdings eine Kann- und keine Muss-Beziehung. Die Indikatoren zeigen somit immer nur einen Teilausschnitt des gesamten Bildes. Für Ergebnisse der TFP und der Indikatoren im Zusammenhang mit technologischem Fortschritt siehe beispielweise Cameron (1998).

Es stellt sich nun die Frage, welche Indikatoren für welche Aspekte am häufigsten eingesetzt werden. Folgende Tendenz ist erkennbar. Bei der empirischen Überprüfung von Theorien, welche Modelle mit expliziter Modellierung des Humankapitals verwenden, dominieren Indikatoren, die sich auf den Ausbildungsgrad der Arbeitskräfte beziehen. Das Humankapital wird in diesen empirischen Studien häufig mit der Dauer an Ausbildungsjahren gleichgesetzt. Die Anzahl an Absolventen bestimmter Ausbildungsstufen repräsentiert daher in diesem Bereich die wichtigste Klasse von Indikator. Üblicherweise wird dabei zwischen dem primären, sekundären sowie tertiären Bildungssektor unterschieden. Der primäre Sektor umfasst beispielsweise Lehrabschlüsse und Hauptschulabschlüsse. Der sekundäre Sektor steht üblicherweise für höhere Schulabschlüsse im Sinne der Matura. Universitätsabschlüsse werden üblicherweise unter dem tertiären Sektor zusammengefasst (siehe beispielsweise David und Metcalfe, 2009, S. 44, Fußnote 41). Jüngere Arbeiten berücksichtigen auch explizit Abschlüsse, die am zweiten Bildungsweg bzw. berufsbegleitend absolviert wurden sowie Abschlüsse, die unter dem Schlagwort „lebenslanges Lernen“ subsumiert werden. Des Weiteren wird der Aspekt der innerbetrieblichen Weiterbildung immer stärker berücksichtigt. Bei der Analyse technologischen Fortschritt und der Innovationstätigkeit auf Firmenebene dominieren Indikatoren wie die Anzahl an angemeldeten sowie gewährten Patenten. Dabei wird üblicherweise nach Sektoren differenziert. Vor allem die Anzahl an gewährten Patenten gewinnt relativ gesehen an Bedeutung. Dies gilt insbesondere für den IKT-Sektor. Dabei ist man primär an dem Zusammenhang zwischen den Ausgaben für F&E und den daraus resultierenden Innovationen – gemessen durch die angemeldeten Patente – interessiert.

Auf makroökonomischer Ebene sind nach wie vor die F&E-Ausgaben in Prozent des BIP der zentrale Indikator. In den letzten Jahren hat jedoch die Analyse der Ausgaben für Bildung für den primären, sekundären und vor allem tertiären Sektor massiv an Bedeutung gewonnen (siehe hierzu beispielweise Korres, 2008, S. 20—37).

In Summe haben sich für den Test makroökonomischer Theorien die Ausgaben für F&E in Prozent des BIP sowie die Bildungsausgaben in Prozent des BIP als zentrale Indikatoren im Laufe der Zeit durchgesetzt. Die Dominanz dieser Indikatoren lässt sich auch leicht durch

einen Blick auf die Webseiten der führenden Statistikinstitute, wie Eurostat oder Statistik Austria, überprüfen. Im Anschluss wird ein kurzer Überblick über die Entwicklung der wichtigsten Indikatoren für Österreich und die EU gegeben.

5.2. Kennzahlen für Österreich und die EU

Um einen Überblick über die Entwicklung der wichtigsten Indikatoren für Österreich und die EU zu geben, werden in diesem Kapitel einige Kennzahlen auf Basis des Datenmaterials von Eurostat präsentiert. Der Fokus liegt hierbei auf der Euro-Zone, da davon ausgegangen wird, dass durch die Bildung der Währungsunion auch eine stärkere Verflechtung der Realwirtschaften und in der Folge der Technologien in den unterschiedlichen Ländern resultierte. Im Speziellen wird dabei die Entwicklung der Länder der europäischen Währungsunion im Zeitraum 2006 bis 2011 betrachtet. Aktuell partizipieren 17 Länder an der Währungsunion. Laut der EZB (2012) sind dies Belgien, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Luxemburg, Malta, Niederlande, Österreich, Portugal, Slowakei, Slowenien, Spanien und Zypern. Zusammen mit jenen Ländern, die den Euro nicht eingeführt haben, sind es aktuell 27 EU-Mitgliedsstaaten. Letztere sind Bulgarien, Dänemark, Großbritannien, Lettland, Litauen, Polen, Rumänien, Schweden, die Tschechische Republik sowie Ungarn.⁵

Ein Grund für die Wahl des Zeitraums 2006 bis 2011 ist, dass die letzte weltweite Wirtschaftskrise des Jahres 2008 in diesen Zeitraum fällt. Angesichts der Tatsache, dass Deutschland und Frankreich in Bezug auf die Wirtschaftsleistung und die politische Macht die dominantesten Teilnehmer der Währungsunion repräsentieren, wird die Entwicklung bestimmter Indikatoren für Deutschland (DE), Frankreich (FR) sowie für Österreich (AT) im Detail grafisch dargestellt. Für die EU17 wird dabei die Entwicklung folgender Indikatoren betrachtet: 1) die Wachstumsrate des realen BIP, 2) die Wachstumsrate des realen BIP pro Kopf, 3) die Aufwände für F&E in Prozent des BIP (GERD-Indikator), 4) die Anmeldungen europäischer Patente und 5) die öffentlichen Ausgaben für Bildung.

Das Datenmaterial der Eurostat ist detailliert. Nichtsdestotrotz existieren für bestimmte Länder in bestimmten Perioden einige Probleme, wie z. B. Zeitreihenunterbrechungen. In anderen Jahren existieren teilweise nur Schätzwerte. Die folgenden Eurostat-Codes werden verwendet, um in den Statistiken auf die jeweiligen Aspekte des Datenmaterials hinzuweisen.

Code	Bedeutung
:	Nicht verfügbar
b	Reihenunterbrechung
e	Geschätzter Wert
f	Prognose
i	Eigener Erläuterungstext (Hinweis: Auf der Eurostat-Homepage konnte für die angeführten Indikatoren im Fall von i keine weiteren Erläuterungen gefunden werden.)
p	Vorläufiger Wert
s	Schätzung

Tabelle 1: Codebedeutungen Eurostat (2011e)

Der erste betrachtete Indikator ist die Wachstumsrate des realen BIP für die EU17. Österreich, Deutschland und Frankreich hatten in den Jahren 2006 und 2007 beispielweise im Vergleich zu der Slowakei moderate Wachstumsraten. 2008 ist der Beginn des Einbruchs klar erkennbar. Im Jahr 2009 wiesen alle EU17 Staaten eine negative Wachstumsrate des realen

⁵ Hinweis: Am 01.01.2014 wird laut EZB (2012) Lettland der Währungsunion beitreten.

BIP auf. Estland und Finnland verzeichneten 2009 mit -14,3% und -8,2% den stärksten Wachstumseinbruch. Im Jahr 2011 konnten alle EU17-Staaten bis auf Griechenland und Portugal bereits positive moderate Wachstumsraten verzeichnen.

Wachstumsrate des realen BIP für EU17											
	2006		2007		2008		2009		2010		2011
Belgien	2,7		2,9		1		-2,8		2,3		2,2 (f)
Deutschland	3,7		3,3		1,1		-5,1		3,7		2,9 (f)
Estland	10,1		7,5		-3,7		-14,3		2,3		8 (f)
Finnland	4,4		5,3		1		-8,2		3,6		3,1 (f)
Frankreich	2,5		2,3		-0,1		-2,7		1,5		1,6 (f)
Griechenland	5,5 (p)		3 (p)		-0,2 (p)		-3,3 (p)		-3,5 (p)		-5,5 (f)
Irland	5,3		5,2		-3		-7		-0,4		1,1 (f)
Italien	2,2		1,7		-1,2		-5,1		1,5		0,5 (f)
Luxemburg	5		6,6		0,8		-5,3		2,7		1,6 (f)
Malta	2,8		4,3		4,3		-2,6		2,9		2,1 (f)
Niederlande	3,4		3,9		1,8		-3,5		1,7		1,8 (f)
Österreich	3,7		3,7		1,4		-3,8		2,3		2,9 (f)
Portugal	1,4		2,4		0		-2,9		1,4		-1,9 (f)
Slowakei	8,3		10,5		5,9		-4,9		4,2		2,9 (f)
Slowenien	5,8		6,9		3,6		-8		1,4		1,1 (f)
Spanien	4,1		3,5		0,9		-3,7		-0,1		0,7 (f)
Zypern	4,1		5,1		3,6		-1,9		1,1		0,3 (f)

Tabelle 2: Wachstumsrate des realen BIP für EU17, Datenquelle: Eurostat (2011a)

Der Verlauf für Österreich, Deutschland und Frankreich zeigt ein relativ homogenes Bild. Bis Anfang 2008 dominierte Österreich in Bezug auf die Wachstumsrate des realen BIP. Deutschland wurde im Jahr 2009 am härtesten getroffen und brach um -5,1% ein. Frankreich verzeichnete den schwächsten Einbruch im Jahr 2009, erholte sich jedoch schwächer als Deutschland und Österreich in den Folgejahren 2010 und 2011.

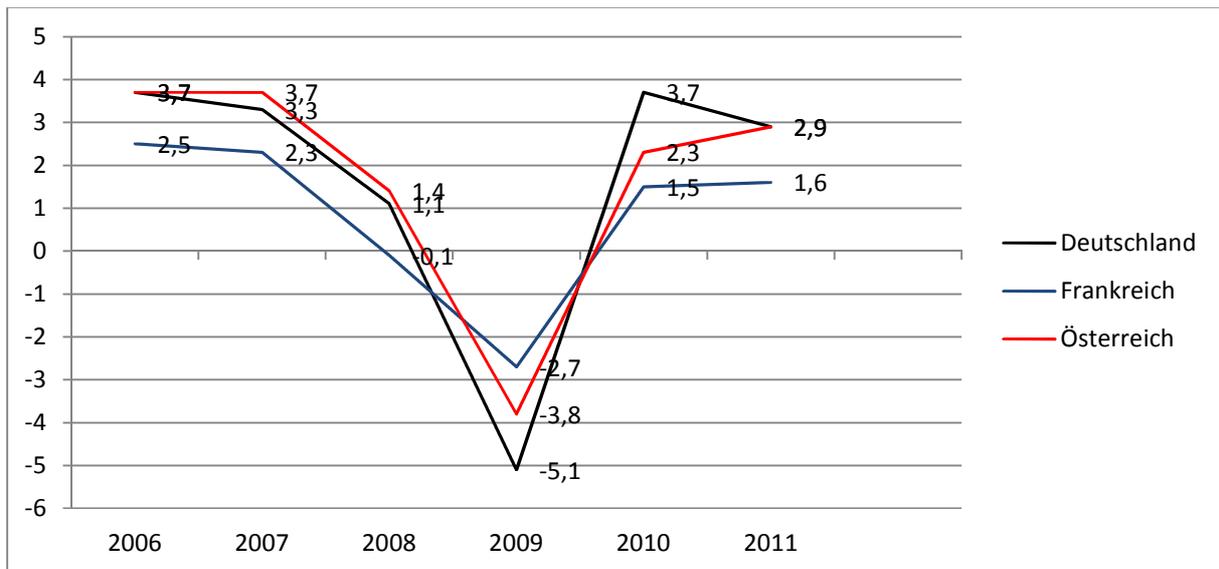


Abbildung 1: Wachstumsrate des realen BIP für DE, FR und AT, Datenquelle: Eurostat (2011a), Eigener Plot

Wie sieht jedoch die Entwicklung des realen BIP unter Berücksichtigung der Bevölkerungsgröße aus? Zur Beantwortung dieser Frage ist nachfolgend die Entwicklung der Wachstumsrate des realen BIP pro Kopf für die EU17-Staaten abgebildet. In den Jahren vor der Krise konnten Estland und die Slowakei enorme Pro-Kopf-Wachstumsraten verzeichnen. Im Jahr 2009 verzeichneten alle EU17-Staaten negative Pro-Kopf-Wachstumsraten. Estland bildet 2009 den negativen Spitzenreiter mit -14,2%, gefolgt von Slowenien mit -8,9%. Estland verzeichnete bereits 2011 wieder eine positive Wachstumsrate von 8%.

Wachstumsrate reales BIP pro Kopf für EU17											
	2006		2007		2008		2009		2010		2011
Belgien	2		2,1		0,1		-3,6		1,4		1,4 (f)
Deutschland	3,8		3,4		1,3		-4,8		3,8		2,8 (f)
Estland	10,3		7,7		-3,6		-14,2		2,3		8 (f)
Finnland	4		4,9		0,5		-8,7		3,2		2,6 (f)
Frankreich	1,8		1,7		-0,6		-3,3		0,9		1 (f)
Griechenland	5,1	(p)	2,6	(p)	-0,5	(p)	-3,6	(p)	-3,7	(p)	-5,7 (f)
Irland	2,8		2,7		-4,7		-7,5		-0,6		0,8 (f)
Italien	1,6		0,9		-1,9		-5,6		1		0,1 (f)
Luxemburg	3,3		4,9		-1		-7,1		0,8		0 (f)
Malta	2,1		3,5		3,5		-3		2,4		1,6 (f)
Niederlande	3,2		3,7		1,4		-4		1,2		1,7 (f)
Österreich	3,1		3,3		1		-4,1		2		2,6 (f)
Portugal	1,1		2,1		-0,1		-3		1,3	(p)	-1,9 (f)
Slowakei	8,3		10,4		5,7		-5,1		4		2,8 (f)
Slowenien	5,5		6,3		3,4	(b)	-8,9	(b)	1	(b)	0,8 (f)
Spanien	2,5		1,6		-0,7		-4,4		-0,4		0,4 (f)
Zypern	2,1		3,6		2,4		-2,7		0,7		-0,4 (f)

Tabelle 3: Wachstumsrate reales BIP pro Kopf für EU17, Datenquelle: Eurostat (2011b)

Bei der Betrachtung der Entwicklung des Pro-Kopf-Wachstums von Österreich, Deutschland und Frankreich zeigt sich ein ähnliches Bild wie für die Entwicklung der Wachstumsrate des realen BIP. Deutschland verzeichnete 2009 den stärksten Einbruch, gefolgt von Österreich und Frankreich. Frankreich verzeichnet nach der Krise im Jahr 2011 das schwächste Wachstum.

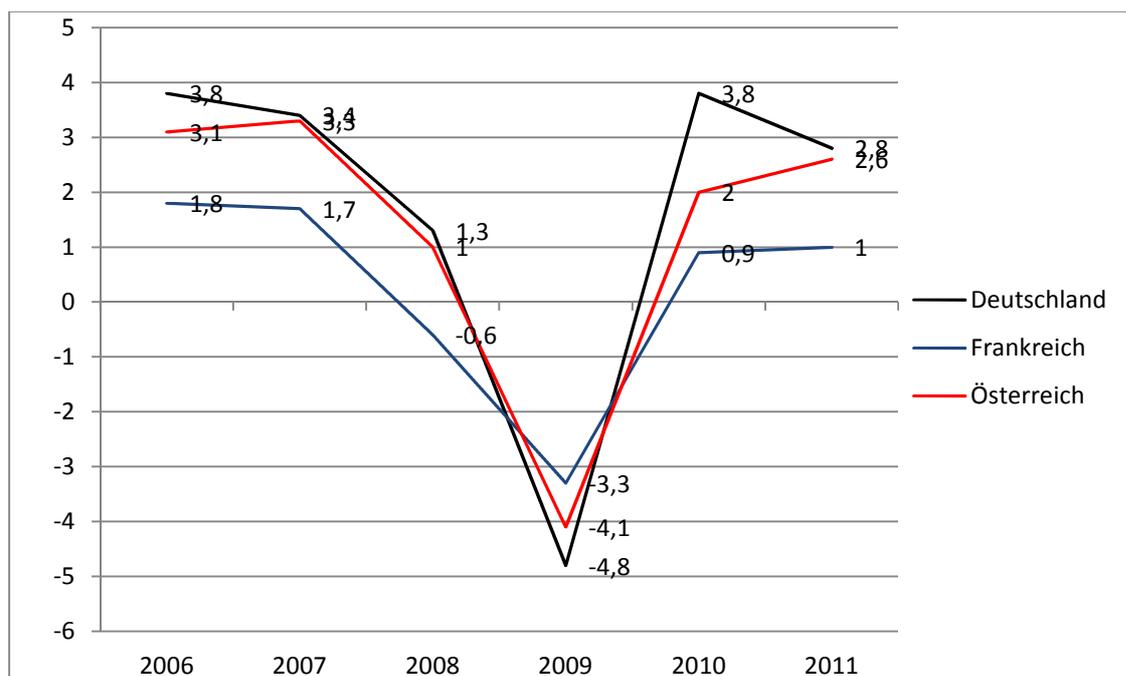


Abbildung 2: Wachstumsrate reales BIP pro Kopf für DE, FR und AT, Datenquelle: Eurostat (2011b), Eigener Plot

Neben den Wachstumsraten des BIP sind die Aufwendungen für F&E von besonderer Bedeutung im Zusammenhang mit technologischem Fortschritt und Wachstum. Insbesondere sind die Aufwendungen für F&E in Prozent des BIP von Interesse. Seit Jahren ist Finnland diesbezüglich der Spitzenreiter mit weit über 3% des BIP. Zypern und die Slowakei bilden bei den Aufwendungen das Schlusslicht. Dies ist insbesondere bemerkenswert, da die Slowakei in den vergangenen Jahren signifikante Wachstumsraten verzeichnete.

Aufwendungen für Forschung und Entwicklung (F&E)/GERD-Indikator										
	2006		2007		2008		2009		2010	
Belgien	1,86		1,89		1,97		2,03		1,99	(p)
Deutschland	2,54		2,53		2,69		2,82		2,82	(e)
Estland	1,13		1,08		1,28		1,43		1,62	(p)
Finnland	3,48		3,47		3,7		3,92		3,87	
Frankreich	2,11		2,08		2,12		2,26		2,26	(p)
Griechenland	0,59	(e)	0,6	(e)	:		:		:	
Irland	1,24		1,28		1,45		1,74	(e)	1,79	(ep)
Italien	1,13		1,17		1,21		1,26		1,26	(p)
Luxemburg	1,66		1,58	(e)	1,57		1,66		1,63	(p)
Malta	0,62		0,58		0,56		0,54		0,63	(p)
Niederlande	1,88		1,81		1,77		1,82		1,83	(p)
Österreich	2,44		2,51		2,67	(e)	2,72		2,76	(ep)
Portugal	0,99	(e)	1,17		1,5		1,64		1,59	(p)
Slowakei	0,49		0,46		0,47		0,48		0,63	
Slowenien	1,56		1,45		1,65	(b)	1,86		2,11	(p)
Spanien	1,2		1,27		1,35		1,39		1,39	(p)
Zypern	0,43		0,44		0,43		0,49		0,5	(p)

Tabelle 4: Bruttoinlandsaufwendungen für F&E (GERD), Datenquelle: Eurostat (2011c)

Die Aufwendungen von Österreich, Deutschland und Frankreich für F&E sind in den vergangenen Jahren relativ konstant. In Deutschland und Österreich sind die Aufwendungen in den Jahren 2007 bis 2010 stetig gestiegen. Die Aufwendungen bewegen sich dabei im Bereich von ca. 2,4 bis 2,8% des BIP. Frankreich investiert deutlich weniger und verzeichnete in den Jahren 2009 und 2010 keinen Anstieg der Aufwendungen.

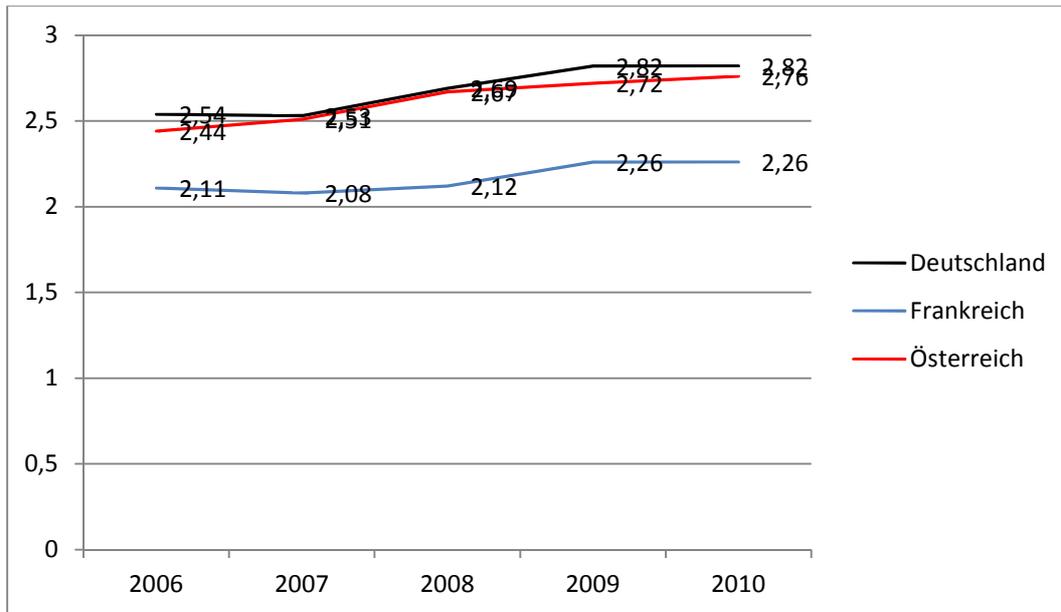


Abbildung 3: Bruttoinlandsaufwendungen für F&E (GERD) für DE, FR, AT, Datenquelle: Eurostat (2011c), Eigener Plot

Patentanmeldungen werden häufig als Bewertungskriterium für den Erfolg oder Misserfolg von F&E-Aktivitäten herangezogen. Nachfolgenden werden die europäischen Patentanmeldungen für die EU17-Staaten sowie jene von Japan und den USA dargestellt.

Im Speziellen beziehen sich die europäischen Patentanmeldungen auf Anträge zum Schutz einer Erfindung beim Europäischen Patentamt (EPA). Laut Eurostat (2011d) können die Anträge dabei direkt beim EPA eingereicht werden oder das EPA wird auf Basis des Patentszusammenarbeitsvertrages (Euro-PCT) als Adressat bei einer Anmeldung genannt. Ob eine Gewährung des Patents tatsächlich erfolgt, wird nicht berücksichtigt. Mehrfachmeldungen werden dadurch vermieden, dass ein gleichmäßiges Aufteilen der Anmeldung inklusive der Berücksichtigung der Wohnorte der Erfinder erfolgt, sofern mehrere Erfinder bei einer Patentanmeldung beteiligt sind (Eurostat, 2011d). Dies erklärt auch die Kommazahlen bei den Gesamtmeldungen.

Die Jahre 2006 bis 2009 zeichnen ein klares Bild. Innerhalb der EU17 sind Deutschland, Frankreich, die Niederlande und Österreich aber auch Spanien stark hinsichtlich der Patentanmeldungen. Deutschland und Frankreich dominieren allerdings innerhalb der EU17. Weltweit gesehen führen die USA gefolgt von Deutschland und Japan die Liste an.

Europäische Patentanmeldungen EU17, Japan und USA								
	2006		2007		2008		2009	
Belgien	1.465,62		1522,74		1.526,81 (e)		1.544,25 (e)	
Deutschland	23.741,43		23.797,31		24.064,13 (e)		24.152,12 (e)	
Estland	21,22		28,22		34,68 (e)		44,12 (e)	
Finnland	1.323,2		1234,3		1.189,31 (e)		1.148,72 (e)	
Frankreich	8.362,53		8.500,23		8.567,22 (e)		8.644,79 (e)	
Griechenland	105,08		104,18		116,97 (e)		119,05 (e)	
Irland	279,42		310,94		325,51 (e)		344,61 (e)	
Italien	4981,5		4.826,34		4.910,15 (e)		4.921,46 (e)	
Japan	21.183,44		20.587,88		19.852,01 (e)		19.290,99 (e)	
Luxemburg	107,87		70,72		81,91 (e)		76,39 (e)	
Malta	7,85		6,83		7,11 (e)		5,73 (e)	
Niederlande	3.655,21		3.223,29		3.084,84 (e)		2.959,23 (e)	
Österreich	1.715,6		1.669,89		1.746,36 (e)		1.824,76 (e)	
Portugal	107,22		122,83		144,28 (e)		152,4 (e)	
Slowakei	39,56		37,85		43,6 (e)		47,7 (e)	
Slowenien	99,09		119,11		121,19 (e)		125,73 (e)	
Spanien	1.335,95		1.368,25		1.421,5 (e)		1.446,03 (e)	
Vereinigte Staaten	32.675,1		30.067,4		28.541,66 (e)		26.157,96 (e)	
Zypern	6,33		9,33		10,44 (e)		8,32 (e)	

Tabelle 5: Europäische Patentanmeldungen, Datenquelle: Eurostat (2011d)

Betrachtet man die Europäischen Patentanmeldungen für Österreich, Deutschland und Frankreich, so zeigt sich, dass die Anmeldungen im Zeitraum 2006 bis 2009 nahezu konstant blieben.

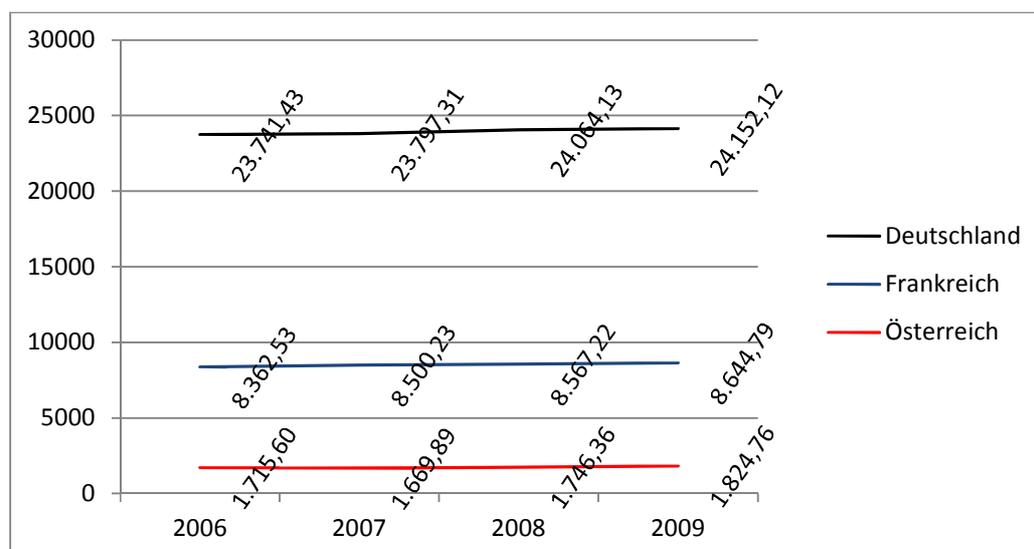


Abbildung 4: Europäische Patentanmeldungen DE, FR und AT, Datenquelle: Eurostat (2011d), Eigener Plot

Da zielgerichtete Ausgaben für Bildung oft der Problematik einer langen Wirkungsverzögerung unterworfen sind, wird für die öffentlichen Ausgaben für Bildung in Prozent des BIP ein längerer Betrachtungszeitraum gewählt. Nachfolgend werden die Ausgaben für Bildung im Zeitraum 2000 bis 2008 für die EU17 dargestellt. Darüber hinaus ist die Entwicklung für die EU25- und EU27-Staaten dargestellt.

Öffentliche Ausgaben für Bildung in Prozent des BIP																	
	2000		2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008
Belgien	:		6 (i)		6,1 (i)		6,03 (i)		5,96 (i)		5,93 (i)		6 (i)		6,02 (i)		6,46 (i)
Deutschland	4,46		4,49		4,7		4,7		4,59		4,53		4,4		4,5		4,55
Estland	6,1 (i)		5,28		5,48		5,29		4,92		4,88		4,75		4,85 (i)		5,67
Finnland	5,89		6,04		6,21		6,44		6,43		6,31		6,19		5,91		6,13
Frankreich	6,03		5,94		5,88		5,9		5,79		5,65		5,58		5,59		5,58
Griechenland	3,39 (i)		3,5 (i)		3,57 (i)		3,56 (i)		3,82 (i)		4,04		:		:		:
Irland	4,28		4,27		4,29		4,38		4,7		4,75		4,76		4,9		5,62
Italien	4,55		4,86		4,62		4,74		4,58		4,43		4,7		4,29		4,58
Luxemburg	:		3,74 (i)		3,79 (i)		3,77 (i)		3,87 (i)		3,78 (i)		3,38 (i)		3,15 (i)		:
Malta	4,49		4,46		4,38		4,7		4,83		6,79 (b)		:		6,31		6,01 (i)
Niederlande	4,96		5,06		5,15		5,42		5,46		5,48		5,46		5,32		5,46
Österreich	5,74		5,79		5,72		5,57		5,52		5,48		5,46		5,4		5,46
Portugal	5,42 (i)		5,61 (i)		5,54 (i)		5,57 (i)		5,29 (i)		5,39 (i)		5,25 (i)		5,3 (i)		4,89 (i)
Slowakei	3,93 (i)		4 (i)		4,3 (i)		4,3 (i)		4,2 (i)		3,85 (i)		3,8 (i)		3,62 (i)		3,59 (i)
Slowenien	:		5,89		5,78		5,82		5,76		5,67		5,67		5,19		5,22
Spanien	4,28		4,23		4,25		4,28		4,25		4,23		4,27		4,35		4,62
Zypern	5,35 (i)		5,93 (i)		6,55 (i)		7,29 (i)		6,7 (i)		6,92 (i)		7,02 (i)		6,93 (i)		7,41 (i)
EU (27 Länder)	4,88 (s)		4,99 (s)		5,1 (s)		5,14 (s)		5,06 (s)		5,04 (s)		5,04 (s)		4,96 (s)		5,07 (s)
EU (25 Länder)	:		:		:		:		:		:		5,06 (s)		4,98 (s)		5,09 (s)

Tabelle 6: Öffentliche Ausgaben für Bildung in EU17, Datenquelle: Eurostat (2011e), Hinweis: Keine weiteren Erläuterungen für (i) seitens Eurostat verfügbar.

Österreich und Deutschland verzeichneten im betrachteten Zeitraum im Wesentlichen einen Rückgang in den Bildungsausgaben. Frankreich verzeichneten Anfang des Jahrtausends einen leichten Anstieg gefolgt von leichten Rückgängen.

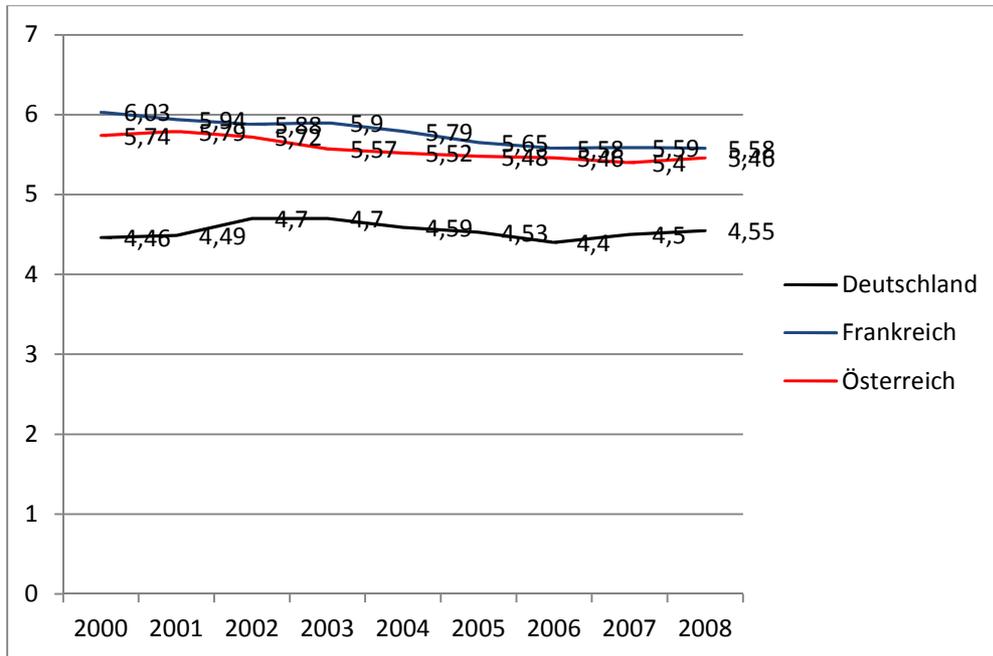


Abbildung 5: Öffentliche Ausgaben für Bildung in Prozent des BIP in DE, FR und AT, Datenquelle: Eurostat (2011e), Eigener Plot

Die enge Beziehung zwischen Wissen und Technologie und die dafür entwickelten Technologieindikatoren stehen im engen Zusammenhang mit der Methode des Growth Accounting. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass die Diskussion über die Rolle von Technologie und Wissen im Wachstumsprozess zu einem großen Teil durch die empirischen Forschungsergebnisse, die mittels der Methode des Growth Accounting erzielt wurden, ausgelöst wurde. Im nachfolgenden Kapitel wird daher im Detail auf die Growth Accounting-Methode eingegangen.

6. Growth Accounting und Totale Faktorproduktivität

Growth Accounting repräsentiert eine Methode, welche es ermöglicht die Beiträge der unterschiedlichen Produktionsfaktoren in Bezug auf das Outputwachstum zu messen (Crafts, 2003; Maußner und Klump, 1996, S. 10 ff.; Cameron, 1998; Greenhalgh und Rogers, 2010, S. 74—81; Barro und Sala-i-Martin, 2004, S. 433—460).⁶ Diese Methode ermöglicht somit eine Zerlegung des Outputwachstums in Komponenten, wobei die einzelnen Komponenten den Faktoren Kapital, Arbeit sowie technologischem Fortschritt zugeordnet werden können. Eine Zerlegung der Wachstumsrate des Outputs in die Wachstumsraten von Kapital, Arbeit und technologischem Fortschritt ist damit gegeben. Im Gegensatz zu den Wachstumsraten der physischen Faktoren ist jedoch jene des technologischen Fortschritts nicht direkt messbar. Da jedoch die beiden anderen Wachstumsraten direkt gemessen werden können, kann der verbleibende Rest des Wachstums technologischem Fortschritt zugerechnet werden. Die Methode des Growth Accounting ermöglicht somit diese Zuordnung und lässt dadurch eine quantitative Abschätzung technologischen Fortschritts zu. Growth Accounting wurde von dem Begründer der exogenen Wachstumstheorie, Robert M. Solow (1957, speziell S. 312 f.) entwickelt (Blanchard, 2003, S. 265; Barro und Sala-i-Martin, 2004, S. 433; Maußner und Klump, 1996, S. 11) und bildet heute einen zentralen Bestandteil nahezu jeder empirischen Studie im Zusammenhang mit Wachstum und technologischen Fortschritt. Plosser (1992, S. 63) bezeichnet die Möglichkeit der Zerlegung des Wachstums in unterschiedliche Komponenten als einer der attraktivsten Eigenschaften des neoklassischen Wachstumsmodells, wodurch auch die weite Verbreitung des Growth Accounting verständlicher wird. Solow und andere führte im Zuge der Formulierung dieser Methode den Begriff der sogenannten Totalen Faktorproduktivität (TFP) ein. Die Begriffe Growth Accounting und TFP stehen daher in einer engen Beziehung zueinander. Man beachte, dass im Rahmen des Growth Accounting davon ausgegangen wird, dass technologischer Fortschritt einerseits exogen gegeben ist und andererseits alle Faktoren gleichmäßig von technologischem Fortschritt in Bezug auf ihren Beitrag zum Outputwachstum profitieren. Mit anderen Worten, alle Faktoren werden durch technologischen Fortschritt produktiver und leisten einen größeren Beitrag zum Outputwachstum. Um Solows Leistungen zu würdigen, wird die TFP in der Literatur auch als „Solow Residuum“ bezeichnet (siehe beispielsweise Blanchard, 2003, S. 265). Der Grund für diese Bezeichnung wird später noch im Detail erklärt.

Ausgangspunkt für die Methode des Growth Accounting ist die neoklassische Produktionsfunktion in Parameterform. Siehe diesbezüglich beispielsweise Carlin (2009) oder Cameron (1998) sowie Barro und Sala-i-Martin (2004).

$$Y = F(A, K, L) \quad (10)$$

⁶ Für eine Einführung in die alternative Analyseverfahren mittels Input-Output Matrizen im Rahmen der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung siehe beispielsweise Böhm (2008) sowie Kolleritsch (2004). Für einen Überblick zur Totalen Faktorproduktivität und relevanter Kennzahlen speziell für Österreich siehe Gnan et al. (2004) sowie Naderer et al. (2007).

Folgt man Barro und Sala-i-Martin (2004, S. 433 f.) sowie Carlin (2009, S. 5 f.) und logarithmiert man (10), so erhält man

$$\log Y = \log F(A, K, L). \quad (11)$$

Leitet man nun (11) nach der Zeit ab, so folgt

$$\begin{aligned} \frac{d \log Y}{dt} &= \frac{d \log F(A, K, L)}{dt} = \\ \frac{dY/dt}{Y} &= \frac{1}{Y} \left(\frac{\partial F}{\partial A} \frac{dA}{dt} + \frac{\partial F}{\partial K} \frac{dK}{dt} + \frac{\partial F}{\partial L} \frac{dL}{dt} \right) \\ &= \frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{F_A \dot{A}}{Y} + \frac{F_K \dot{K}}{Y} + \frac{F_L \dot{L}}{Y}. \end{aligned} \quad (12)$$

Dabei stehen die Punkte über den Variablen für die Ableitung nach der Zeit und F_A sowie F_L für die jeweiligen Grenzprodukte der Faktoren.

Erweitert man nun die Gleichung um A/A , K/K und L/L , so kann (12) auch als

$$\frac{\dot{Y}}{Y} = \frac{F_A \dot{A}}{Y} \frac{A}{A} + \frac{F_K \dot{K}}{Y} \frac{K}{K} + \frac{F_L \dot{L}}{Y} \frac{L}{L} \quad (13)$$

dargestellt werden.

Eine triviale Umformung führt letztendlich zu

$$\frac{\dot{A} F_A A}{A Y} = \frac{\dot{Y}}{Y} - \frac{\dot{K} F_K K}{K Y} - \frac{\dot{L} F_L L}{L Y}. \quad (14)$$

Der Term $\frac{\dot{A} F_A A}{A Y}$ repräsentiert ein Maß für den Anteil des Outputwachstums, der auf technologischen Fortschritt zurückzuführen ist (Carlin, 2009; Barro und Sala-i-Martin, 2004).

Der Term $\frac{\dot{A} F_A A}{A Y}$ wird auch als TFP bezeichnet, da er den Anteil des Outputwachstums repräsentiert, der nicht durch die physischen Inputfaktoren (Kapital und Arbeit) erklärbar ist. Es sollte ersichtlich sein, dass es sich bei der Methode des Growth Accounting im Kern um eine Residualanalyse handelt. Der oben erwähnte Begriff „Solow Residuum“ wird dadurch verständlicher. Da man in der Lage ist, die Anteile des Outputwachstums in Komponenten zu zerlegen und bis auf die Komponente des technologischen Fortschritts alle anderen zu messen, kann der unerklärliche Rest (das Residuum) dem Faktor Technologie zugeschrieben werden (siehe auch Clement, 2006, S. 357 f.).

In Bezug auf die Messung der Komponenten muss beachtet werden, dass diese Methode voraussetzt, dass man die Grenzprodukte der Faktoren Kapital und Arbeit tatsächlich messen kann. Im Gegensatz zu den anderen Variablen bzw. Termen der rechten Seite der Gleichung (14) ist dies nur mit Hilfe einer Annahme in Bezug auf die Faktorpreise möglich. In den meisten empirischen Studien sowie Modellen der Wachstumstheorie wird üblicherweise von vollkommener Konkurrenz auf den Märkten ausgegangen. Diese Annahme führt in Kombination mit der Annahme sinkender Grenzerträge und einer linear homogenen Produktionsfunktion dazu, dass im Gleichgewicht die Preise der Produktionsfaktoren ihren Grenzprodukten entsprechen (Barro und Sala-i-Martin, 2004, S. 32 und S. 434; Maußner und

Klump 1996, S. 39). Der Zinssatz für Realkapital entspricht daher im Gleichgewicht dem Grenzprodukt des Kapitals und der Reallohn dem Grenzprodukt des Faktors Arbeit. Aus der Sicht der Theorie geht man somit davon aus, dass das Grenzprodukt des Kapitals der Ertragsrate des Realkapitals und das Grenzprodukt der Arbeit dem realen Lohnsatz entsprechen. Formal bedeutet dies $r = F_K$ und $w = F_L$, wobei r und w den Realzinssatz und den Reallohn bezeichnen. Dies wird auch als Grenzproduktivitätsentlohnung bezeichnet. Im Rahmen des Growth Accounting können somit die Terme $\frac{F_{KK}}{Y}$ und $\frac{F_{LL}}{Y}$ als $\frac{rK}{Y}$ sowie $\frac{wL}{Y}$ ausgedrückt und damit gemessen werden.

Üblicherweise wird somit davon ausgegangen, dass die Grenzprodukte F_K und F_L in einer Wirtschaft bei vollständiger Konkurrenz durch die Faktorpreise approximiert werden können. Beide können als Anteile des Gewinn- und Lohneinkommens am BIP gemessen werden [siehe auch Kapitel 2, Gleichung (4) und (6)]. Im neoklassischen Modellrahmen entsprechen ja die Exponenten der Produktionsfunktion den Anteilen am Output (Cameron, 1998, S. 6). Sowohl der Realzinssatz als auch der Reallohnsatz können somit gemessen werden. Für weitere Details hierzu siehe beispielsweise Barro und Sala-i-Martin (2004, S. 433 ff.) oder Otruba et al. (1996, S. 98).

Mit Hilfe des präsentierten Ansatzes schätzte Solow im Jahr 1957 den Beitrag technologischen Fortschritts zum Outputwachstum (Solow, 1957). Gleichung (14) stellt somit den Kern der Growth Accounting-Methode dar. Solows Schätzungen deuteten darauf hin, dass nahezu 90% des Wachstums der USA auf technologischen Fortschritt zurück zu führen ist (im Detail 87,5% des Wachstums des Bruttooutputs pro Arbeitsstunde, *ibid.*, S. 320). Nachfolgende Arbeiten unterschiedlichster Autoren relativierten diese Ergebnisse auf Grund besseren Datenmaterials und verfeinerten Schätzmethode (die jedoch alle im Wesentlichen auf dem der ursprünglichen Methode von Solow beruhen). Aktuellere Schätzungen gehen davon aus, dass zwischen 2/3 und 1/3 des Outputwachstums dem Faktor Technologie zuzuschreiben ist, wobei eine starke Tendenz 2/3 erkennbar ist (Barro und Sala-i-Martin, 2004, S. 438–441; Crafts, 2003; Xingyuan, 2009 und Cameron, 1998). Mit anderen Worten, technologischer Fortschritt ist die dominierende Wachstumsquelle, jedoch nicht in so einem Ausmaß wie die Ergebnisse der wegbereitenden Studien vermuten haben lassen.

Es gibt jedoch starke Unterschiede zwischen Ländern bzw. Wirtschaftsräumen. Für den europäischen Wirtschaftsraum dürften eher die Größenordnungen der Schätzungen von Solow zutreffen. Maußner und Klump (1996, S. 11) weisen auf Basis der Daten von Maddison (1991, S. 33 f.) beispielweise darauf hin, dass gerade europäisches Wachstum nicht auf erhöhten Input der Faktoren Kapital und Arbeit beruht. Technologischer Fortschritt ist somit gerade für Europa der dominierende Wachstumsfaktor. Im Gegensatz dazu dürfte das Wachstum der meisten asiatischen Länder primär auf der Akkumulation der klassischen Faktoren Kapital und Arbeit basieren (Barro und Sala-i-Martin, 2004, S. 441).

In Summe weist der Großteil der empirischen Studien darauf hin, dass technologischer Fortschritt den wichtigsten Wachstumsfaktor repräsentiert. In diesem Zusammenhang gilt es zu betonen, dass im Gegensatz zu den Faktoren Kapital und Arbeit technologischer Fortschritt bzw. neues Wissen keine knappe Ressource darstellt. Die wachstumstheoretischen Aussichten in Bezug auf diesen Faktor sind daher vielversprechend.

Nichtsdestotrotz existieren auch einige Kritikpunkte an der Methode des Growth Accounting. Beispielweise können Externalitäten dazu führen, dass die soziale Ertragsrate über oder unter der privaten Ertragsrate der Faktoren liegt und in der Folge die Annahme der Grenzproduktivitätsentlohnung ein Über- oder Unterschätzen der TFP bewirkt (Crafts, 2003, S. 7 f.).

Des Weiteren muss beachtet werden, dass die Methode des Growth Accounting nicht in der Lage ist die Quellen technologischen Fortschritts oder die Prozesse, die zu technologischen

Fortschritt führen, zu entschlüsseln. Man erhält einen Schätzer für den Anteil des Outputwachstums, welcher nicht auf physische Inputfaktoren zurückzuführen ist. Dieser Schätzer – wie genau er auch ermittelt wurde – ist aber nicht in der Lage die Ursprünge und Gründe seines Entstehens zu erklären.

Darüber hinaus unterliegen die diversen Indikatoren, die die Basis dieser Methode bilden, ebenfalls einiger Kritik. Die Schwächen der Indikatoren haben unmittelbare Konsequenzen für die Aussagekraft des Growth Accounting. Auf diese Punkte wird im nächsten Kapitel im Detail eingegangen.

6.1. Kritik an Indikatoren und an der Methode des Growth Accounting

Trotz der enormen Verbreitung und Verwendung der diskutierten Wachstums- sowie Technologieindikatoren werden diese in der Literatur immer wieder kritisiert. Sowohl das BIP als auch die diversen Technologieindikatoren weisen bestimmte Probleme auf, die man bei der Beurteilung der Ergebnisse von empirischen Studien stets im Auge behalten sollte. Da die Aussagekraft des Growth Accounting stark von Detailanalyse des Solow Residuums abhängt, relativieren Indikatorprobleme bis zu einem gewissen Grad auch die Aussagekraft dieser Methode. Es gilt zu beachten, dass es sich dabei teilweise nicht nur um Messprobleme, sondern auch um konzeptionelle Probleme handelt. In der Folge wird auf diese Kritikpunkte und Probleme im Detail eingegangen.

Das BIP wird häufig in Bezug auf seine Indikatorfunktion für die Höhe des Lebensstandards kritisiert. Ist ein höherer Output wirklich gleichbedeutend mit einem höheren Lebensstandard? Als Reaktion auf diese Kritik wurden komplexere Indikatoren zur Messung des Lebensstandards, wie z. B. der Human Development Indicator entwickelt (Doh, 2012, S. 307 f. oder Sacchetti und Sugden, 2009b, S. 186 f.). Dieser vom UNDP (United Nation Development Programme) entwickelte Indikator berücksichtigt neben dem pro Kopf Einkommen auch weiche Aspekte, wie die grundsätzliche Zufriedenheit der Menschen oder den physischen sowie psychischen Gesundheitszustand der Individuen. Diese Indikatoren haben sich jedoch nicht flächendeckend durchgesetzt.

Neben der grundsätzlichen Kritik an der Verwendung einer quantitativen Größe als Indikator für den Lebensstandard gibt es noch weitere Problempunkte in Bezug auf das BIP. Dabei sind folgende Fragen relevant: 1) Wie sieht die Einkommensverteilung im jeweiligen Land aus? 2) Handelt es sich bei dem verzeichneten Wachstum um nachhaltiges Wachstum? 3) Kam es im Zuge des Wachstums zu negativen Externalitäten? 4) Hat sich der Output auch qualitativ verändert? All diese Aspekte können durch das BIP sowie durch das BIP pro Kopf als Wachstumsindikator nur unzureichend oder gar nicht erfasst werden. Jeder dieser Aspekte erfordert eine tiefere Diskussion.

Der Effekt des Wirtschaftswachstums auf den Lebensstandard wird stark von der Einkommensverteilung bestimmt. Je unausgewogener das Einkommen in einem Land verteilt ist, desto unausgewogener wird der Lebensstandard des Großteils der Bevölkerung durch das neugewonnene Einkommen steigen. Bei einer gegebenen Einkommensverteilung stellt sich somit die Frage, ob derjenige, der technologischen Fortschritt generiert auch tatsächlich dafür entlohnt wird. Eine ungerechte Verteilungsstruktur ist nicht nur ein Phänomen armer oder schwach wachsender Länder. Auch in reichen und wachstumsstarken Ökonomien hält sich das Phänomen Armut hartnäckig. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wurden Indikatoren zur Messung der Einkommensschere (wie z. B. der GINI-Koeffizient) entwickelt. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass die Schere in den Industrienationen immer größer wird. Das BIP sowie das BIP pro Kopf eines Landes sind somit nur eine Seite der Medaille. Die Verteilung die andere. Es stellt sich somit auch die Frage, wer das auf Grund von neu geschaffenem Wissen zusätzlich generiert Einkommen tatsächlich lukriert. In Summe gilt, dass die Zusammenhänge zwischen Wachstum, Verteilung und Armut bei Weitem nicht ausreichend erforscht sind. Ähnlich argumentierte auch Richard Nelson in der Diskussion im Anschluss zu seiner Keynote im Rahmen der Schumpeter Konferenz 2011 in Wien (Nelson, 2011).

Neben der Verteilung ist auch der Aspekt der Nachhaltigkeit in Bezug auf das BIP als Indikator relevant. Das BIP ist prinzipiell nicht in der Lage Aspekte wie beispielweise Nachhaltigkeit zu bewerten. Werden die natürlichen Ressourcen überbeansprucht, so stehen diese in den Folgeperioden nicht mehr als Teil des Produktionsfaktors Kapital zu Verfügung.

Ayres und Warr (2009, S. 134) argumentieren, dass Länder vorübergehend in der Lage sind ihr BIP stark durch Ausbeutung und Überbeanspruchung ihrer Ressourcen zu steigern. Wachstum, welches zu Lasten der natürlichen Ressourcen des Landes geht, müsste streng genommen als Abschreibung berücksichtigt werden. Dies ist in empirischen Studien im Allgemeinen nicht der Fall und in der Praxis technisch auch schwer zu realisieren. Ebenso müsste man den Konsum von nicht erneuerbaren Ressourcen als Abschreibung berücksichtigen und nicht als Teil des Einkommens in einer Betrachtungsperiode werten. Die Frage nach der Nachhaltigkeit des Wachstums wird durch das BIP somit nicht beantwortet.

In enger Beziehung zu diesen Aspekten steht die Frage, ob es zu negativen Externalitäten im Rahmen der Produktion gekommen ist. Verschmutzt ein Unternehmen im Rahmen der Produktion die Umwelt, so generiert es Externalitäten. Ayres und Warr (2009, S. 134) führen beispielsweise die Verschmutzung eines Flusses durch ein Unternehmen oder negative Effekte von Kriegshandlungen an. Diese negativen Effekte ziehen in der Regel den Konsum von Gütern und Dienstleistungen durch die Allgemeinheit nach sich, um die negativen Effekte zu beseitigen. Die Produktion dieser Güter und Dienstleistungen wirken sich positiv auf das BIP aus. Diese müssten jedoch einen negativen Effekt haben. Mit anderen Worten, das Einkommen im jeweiligen Jahr müsste durch Güter und Dienstleistungen, die auf Grund von negativen Externalitäten produziert wurden, sinken und nicht steigen. Dieser Aspekt kann jedoch nur schwer berücksichtigt werden.

Ein weiterer zentraler Punkt in diesem Zusammenhang ist die Frage nach der qualitativen Verbesserung des Outputs. Bei Verwendung des BIP als Kennzahl der Wirtschaftsaktivität wird im Allgemeinen nicht differenziert, wie sich der Output zusammensetzt. Selbst bei einem konstanten BIP kann es zu einer massiven qualitativen Verbesserung des Outputs gekommen sein. Um dem Umstand Rechnung zu tragen, dass das BIP eine qualitative Verbesserung nur schlecht erfassen kann, veröffentlichen einige Institutionen (Handelskammer, etc.) Indikatoren auf Basis hedonischer Preise (Blanchard, 2003, S. 27). Dabei wird für bestimmte Güter und Dienstleistungen die qualitative Verbesserung angezeigt. Ausgangspunkt dieses Ansatzes ist die Überlegung, dass komplexe Güter meist eine Kombination unterschiedlicher Bestandteile sind. Mit anderen Worten sind dies komplementäre Güter. Ein prominentes Beispiel für ein solches Gut ist der PC (Personal Computer). Die einzelnen Komponenten unterliegen jeweils einer eigenen Preisveränderung, welche eine Prognose in Bezug auf die qualitative Verbesserung des zusammengesetzten Gutes ermöglicht. In Summe ist dieser Aspekt ebenfalls nur schwer statistisch zu berücksichtigen.

Bleibt noch die Frage nach den Kritikpunkten an den Technologindikatoren. Alle Technologieindikatoren haben in Wahrheit ein und dasselbe Grundproblem. Wissen ist nicht quantifizierbar und daher nicht messbar. In der Folge versucht man Indikatoren für die unterschiedlichen Schritte im Transmissionsprozess von neuem Wissen bis hin zu gesteigerter Wirtschaftsaktivität zu entwickeln. In Abhängigkeit von den Fragestellungen müssen somit stets unterschiedliche Indikatoren angewendet werden, die auch nur einen Ausschnitt des gesamten Prozesses zeigen. Es existiert jedoch kein universeller anwendbarer Indikator, der in empirischen Studien für die Messung von neuem Wissen und dessen Effekt auf das Wirtschaftswachstum einsetzbar ist. Die empirische Forschung hat in diesem Zusammenhang den Fokus auf die Innovationstätigkeit gerichtet. Dabei wird üblicherweise die Innovationsaktivitäten bestimmter Unternehmen, Wirtschaftssektoren oder Länder analysiert. Dabei ist neben den Ausgaben für F&E auch die Anzahl an angemeldeten Patenten ein wichtiger Indikator.

In Bezug auf Patentanmeldungen geht man davon aus, dass neues Wissen von Unternehmen im Rahmen ihrer F&E-Aktivitäten geschaffen wird und zu unterschiedlichsten Innovationen führt. Diese Innovationskonzepte lassen sich die Unternehmen patentieren, um auch in der

Zukunft monetären Erträge für diese „Pionierarbeit“ zu erzielen. Die Anmeldungen können somit als Indikator für die Innovationstätigkeit verwendet werden.

Die Verwendung von Patenten als Maß für die Innovationstätigkeit wurde häufig kritisiert (siehe hierzu die Analyse in Hackler, 2012, S. 245). Eine Analyse der Literatur zeigt, dass sich die Kritik im Wesentlichen in zwei Stränge teilt: Einerseits wird kritisiert, dass Patente nur unzureichend die Innovationstätigkeit sowie den Aufbau von neuem Wissen und dessen Auswirkung auf das Wachstum widerspiegeln und andererseits wird kritisiert, dass der institutionelle Rahmen für die Anmeldung und Gewährung von Patenten einen großen Einfluss auf die Indikatorqualität hat.

In Bezug auf den ersten Punkt muss man zunächst berücksichtigen, dass Innovationen oft ein Komplex vieler verschiedener kleiner Innovationen sind. Für viele wichtige Innovationen werden häufig überhaupt keine Patente angemeldet. Darüber hinaus werden viele Innovationen bewusst der Allgemeinheit zur Verfügung gestellt. Dies trifft besonders auf Innovationen im IKT-Bereich zu. Beispielweise unterliegt neue Software häufig der General Public License (GNU). Ein Beispiel hierfür wäre das E-Mail Sicherheitspaket „Pretty Good Privacy“ (PGP) von Phil Zimmermann (Tanenbaum, 2003, S. 799 f., siehe auch Kaufman et al., 2010, S. 567—582). Diese Innovationen im Open Source-Bereich gaben oft die Richtung für die Softwareentwicklung im proprietären Bereich vor. Des Weiteren unterscheiden sich Innovationen für die Patente angemeldet wurden teilweise extrem in Bezug auf ihren ökonomischen Effekt. Der Effekt der einzelnen Patente auf das Wirtschaftswachstum ist schwer quantifizierbar. Des Weiteren muss man berücksichtigen, dass Innovationen oft Wissen aus den unterschiedlichsten Bereichen nutzen. In der Praxis bedeutet dies, dass der Zusammenhang zwischen den angemeldete Patent und dem ausschlaggebenden Wissensbereich nur schwer erkennbar ist. Wenn beispielweise ein Hardwarehersteller eine Innovation im Festplattenbereich zum Patent anmeldet und der entscheidend Schritt bei der Entwicklung der Innovation war erst durch eine Entdeckung in der Physik möglich, so erntet letztendlich der Softwaresektor die „Lorbeeren“ und nicht der Physiker, der seine Entdeckung der Allgemeinheit durch eine Publikation zur Verfügung stellte.

In Bezug auf den zweiten Punkt muss die Tatsache berücksichtigt werden, dass die Anzahl an Patentanmeldungen in nahezu allen Ländern seit Beginn der 1990er Jahre stark gestiegen ist (Shadlen, 2009, S. 55). Dies hat zur Folge, dass immer mehr Ressourcen zur Verwaltung dieser Anträge notwendig sind. Da die heutigen Innovationen für die Patente angemeldet werden oft äußerst komplex sind muss auch das Komitee, welches über die Patentgewährung entscheidet, mit Spezialisten aus den diversesten Bereichen besetzt sein. Die Bereitstellung qualifizierter Personen zur Beurteilung von Anträgen ist somit vor allem eine Frage der Kosten und der vorhandenen Ressourcen. Letzteres ist insbesondere in Entwicklungsländern kritisch zu beurteilen. Die Ressourcen, die in den Prozess der Beurteilung der Patentanträge investiert werden, sind jedoch von gravierender Bedeutung für die zukünftige Innovationstätigkeit und die weitere Akkumulation von Wissen in einem Land. Zu Unrecht abgelehnte Patentanträge hemmen in weiterer Folge die Innovationstätigkeit und den Wissensaufbau in bestimmten Wirtschaftsbereichen. Falsch gewährte Patente verzerren den Wettbewerb und wirken dem Grundgedanken von Patenten entgegen. In letzter Konsequenz entscheiden die investierten Ressourcen auch über die Indikatorqualität von Patentanmeldungen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in diesem Kontext ist, ob das Wissen das dem Patentantrag zu Grunde liegt tatsächlich als neu zu klassifizieren ist und somit ein Patent gewährt werden soll (Shadlen, 2009, S. 53 f.). Im Allgemeinen existiert kein einheitliches Beurteilungskriterium. Die Beurteilung setzt, wie bereits erwähnt, hoch qualifiziertes Personal voraus. Darüber hinaus ist eine präzise Definition der Begriffe Erfindung sowie Entdeckung als Entscheidungsgrundlage notwendig. Shadlen (2009, S. 54) führt in diesem Zusammenhang an, dass Patente im Softwarebereich in einigen Ländern mit der Begründung abgelehnt

wurden, dass Softwareentwickler keine neuen Prozesse erfinden sondern nur die mathematischen Algorithmen aufdecken, welche den eigentlichen Prozessen von Natur aus zu Grunde liegen.

Die Strategie technologischen Fortschritt und den Einfluss von neuem Wissen auf das ökonomische Wachstum mittels Patentanmeldungen zu messen beinhaltet somit offensichtlich einige Schwierigkeiten und Unsicherheiten.

Die Ausgaben für F&E sowie für Bildung werden in der empirischen Literatur stark als Indikatoren genutzt. Der Fokus liegt dabei auf der Messung der Erträge für die jeweiligen Ausgaben. Die Studien betrachten dabei vorrangig jene Firmen, die auf Grund ihrer Größe einen beträchtlichen Anteil am BIP des jeweiligen Landes haben. Beide Indikatoren sind mit Problemen behaftet.

Die wirtschaftswissenschaftliche Literatur wird in Bezug auf die Messung der Erträge für die F&E-Aktivitäten sowie Bildungsausgaben von sogenannten Marktwert- und Produktivitätsstudien dominiert. Greenhalgh und Rogers (2010, S. 132—140) geben hierzu einen guten Überblick.

Marktwertstudien gehen davon aus, dass die Aktienwerte der Unternehmen die Bewertung der Investoren in Bezug auf die zu erwarteten Dividenden widerspiegeln. Man geht dabei davon aus, dass die Erwartungen der Investoren bzgl. der Dividenden stark von den immateriellen Vermögenswerten bestimmt werden. Patentrechte sowie die Firmenausgaben für F&E bilden einen zentralen Bestandteil dieser immateriellen Vermögenswerte. Der Marktwert kann somit zur Bewertung der Erträge, die F&E-Ausgaben einbringen, herangezogen werden. Im Allgemeinen existiert ein positiver Zusammenhang zwischen den F&E-Ausgaben und dem Marktwert. Das zentrale Problem besteht jedoch darin, die immateriellen Vermögenswerte zu messen. Patentrechte und F&E-Ausgaben des Unternehmens bilden nämlich nur einen Teil der immateriellen Vermögenswerte. Vorrangig müsste das Humankapital der Unternehmen berücksichtigt werden. Dieses ist nur sehr schwer quantifizierbar. Darüber hinaus hat dieser Ansatz den Nachteil, dass die Märkte den Unternehmenswert korrekt antizipieren müssen und nur börsennotierte Unternehmen berücksichtigt werden können, da der Marktwert durch den Aktienkurs leicht ermittelbar ist.

Produktivitätsstudien basieren auf der Idee einen Zusammenhang zwischen den F&E-Ausgaben und dem Produktivitätsanstieg zu messen. Produktivitätsstudien nutzen Patente und F&E-Ausgaben als ein Maß für den Technologieparameter A [siehe Gleichung (2)]. In der Regel existiert ein positiver Zusammenhang zwischen den F&E-Ausgaben und dem Produktivitätsniveau. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass F&E-Ausgaben nur einen Teilaspekt des Prozesses in Bezug auf die Steigerung der Produktivität repräsentieren und auch nur eine grobe Abschätzung der Auswirkung von neuem Wissen auf die Produktivität ermöglichen (Greenhalgh und Rogers, 2010)

Der Großteil der Kritikpunkte im Zusammenhang mit den Technologieindikatoren kann darauf zurückgeführt werden, dass keine konsequente und klare Theorie in Bezug auf die Messung von Wissen existiert (siehe auch Steedman, 2001). In der Folge ist eine Messung technologischen Fortschritts, der ja die Konsequenz von neuem Wissen ist, schwierig und problembehaftet.

Man muss somit etwas Vorsicht bei der Beurteilung der Ergebnisse empirischer Studien im Zusammenhang mit technologischem Fortschritt walten lassen. Dies gilt insbesondere für Studien, deren Ergebnisse auf Basis der Growth Accounting-Methode erzielt wurden.

Crafts (2003) stellt sich die Frage, ob die Schätzungen für die TFP tatsächlich ein verlässlicher Indikator für den Beitrag technologischen Fortschritts (bzw. Wandels) zum Produktivitätswachstum ist. Er kommt zu folgendem Schluss. In Summe repräsentiert die TFP nicht immer einen verlässlichen Indikator (ibid., S. 21). Es können beträchtliche Unterschiede

zwischen der mittels der Growth Accounting Methode gemessenen TFP und der tatsächlichen Wachstumsrate des technologischen Fortschritts existieren. Die Berücksichtigung komplexerer Produktionsfunktionen sowie die Berücksichtigung spezieller Entwicklungen in wachstumsstarken Ländern, kann mitunter zu verlässlicherer Kennzahlen für technologischen Fortschritt führen (Crafts, 2003).

6.2. Die IKT und das Produktivitätsparadoxon

Die Rolle der IKT in Bezug auf das ökonomische Wachstum unterliegt einer wachsenden Diskussion. Vor allem die Messung der ökonomischen Effekte der IKT stellt sich als schwierig dar. Die Methode des Growth Accounting wurde mitunter auch dahingehend kritisiert, dass die damit erzielten Ergebnisse in Zeiten starken technologischen Fortschritts im Allgemeinen keine großen Veränderungen in Bezug auf die TFP aufwiesen. Dies ist üblicherweise der Punkt an dem die IKT in die Diskussion einbezogen wird. Die letzte große weltweite Basisinnovation war die IKT. Computer veränderten das gesamte Wirtschaftsleben. Die Effekte sind für jeden offensichtlich. Computer und im Speziellen die Software auf diesen Computern ermöglichen beispielweise eine schnellere Kommunikation zwischen Unternehmen und Kunden sowie im Allgemeinen eine kostengünstigere Produktion. Die Entwicklung neuer Software sowie die Wartung bestehender Programme eröffnete neue Wirtschaftszweige, die heute auf Grund der weiten Verbreitung von Computern mit allen anderen Wirtschaftssektoren stark verwoben sind.⁷ Das Internet zeigte neue Absatzformen und eröffnete neue Märkte. Führungskräfte weltweit agierender Unternehmen argumentierten, dass es zu einer enormen Produktivitätssteigerung auf Grund der IKT in ihren Unternehmen kam. Dies ist auch genau das von der ökonomischen Theorie erwartete Ergebnis. Die IKT verspricht nämlich ein enormes Steigerungspotential in Bezug auf die Produktivität und führt bei jenen Unternehmen und Institutionen, die in der Lage sind diese neue Technologie einzusetzen, zu starkem Wachstum (siehe hierzu auch Sugden et al., 2009, S. 205—228 sowie Audretsch und Welfens, 2002). Dazu kommt, dass die IKT eine Wissenstechnologie ist und daher leicht in den unterschiedlichen Wirtschaftsbereichen eingesetzt werden kann (Mokyr, 2002b).

Die IKT hat nur ein Problem. Dieser Effekt wird durch die Ergebnisse des Growth Accounting nicht (immer) bestätigt. Die TFP hat sich im Zuge der massiven Verbreitung der IKT in vielen Fällen nicht signifikant verändert. Dies gilt für viele Industrieländer und wird auch als *Produktivitätsparadoxon* bezeichnet. Robert M. Solow wird in diesem Zusammenhang häufig (beispielweise auch von Crafts, 2003, S. 2) wie folgt (korrekt) zitiert:

„You can see the computer age everywhere but in the productivity statistics.“
(Solow, 1987, S. 36).

Es gibt unterschiedliche Erklärungen für dieses Phänomen. Crafts (2008) führt an, dass ein Grund darin liegen kann, dass es eine gewisse Zeit dauert, bis eine Basisinnovation vollständig von der Wirtschaft verstanden wird. Es kommt sozusagen zu einer zeitlichen Verzögerung bei der effizienten Anwendung von Innovationen. Dieser Anpassungsprozess der Wirtschaft führt mitunter zu Einbußen in Bezug auf die durch die Innovation gewonnene Produktivitätssteigerung. Das Wirtschaftssystem muss sozusagen wirtschaftlichen Möglichkeiten, die sich durch die neue Technologie ergeben, erst erlernen (Crafts, 2008; Helpman und Rangel, 1998). Anzumerken ist, dass nicht nur die IKT von diesem Problem

⁷ Schmitz (2001) gibt in diesem Zusammenhang einen guten Überblick über empirische Arbeiten in Bezug auf die USA und ausgewählte G7-Länder. In Naderer et al. (2007) ist beispielsweise die österreichische Situation gut dargestellt.

betroffen ist. Im Wesentlichen sind alle Basisinnovationen (wie z. B. die Elektrizität) davon betroffen.

Die Einführung der IKT hat in Bezug auf ökonomisches Wachstum unterschiedliche Effekte in der Wirtschaft hervorgerufen, die auch unterschiedliche Herangehensweisen in der Analyse erfordern.

Bassanini et al. (2000, S. 15) identifizieren drei Auswirkungen der IKT auf das Produktivitätswachstum. 1) Es kommt zu einem Beschleunigungseffekt in Bezug auf das Produktivitätswachstum in den IKT produzierenden Sektoren und eine Erhöhung ihres Anteils bzw. Gewichts an der gesamten Wirtschaft. 2) Der Anteil des Produktionsfaktors Kapital steigt in der Wirtschaft auf Grund starker Investitionen in Hardware. 3) Wirtschaftssektoren, die die IKT nutzen, erhöhen dadurch ihre Effektivität, da sie neue Technologien anwenden. Diese Auswirkungen können als direkter und indirekter Effekt der IKT interpretiert werden. Der direkte Effekt besteht darin, dass sie neue Konsum- und Investitionsgüter innerhalb der Wirtschaft zur Verfügung stellt. Der indirekte Effekt besteht darin, dass diese Güter im Produktionsprozess genutzt werden (Bassanini et al., 2000).

Der letzte Punkt muss jedoch mit Vorsicht beurteilt werden. Es scheint so, dass Unternehmen, die erstmals die IKT nutzen von gravierenden Lern- und Reorganisationseffekten betroffen sind.

Crafts (2003, S. 18) kommt in diesem Zusammenhang zu dem Schluss, dass teilweise substantielle Anstrengungen seitens der Unternehmen für die Reorganisation und das Erlernen der neuen Technologie notwendig sind, um die potentiellen Produktivitätsgewinne der IKT auch tatsächlich zu realisieren (Crafts, 2003). Dies wäre eine mögliche Erklärung für die schwachen Veränderungen der TFP in der Zeit des weltweiten verstärkten Einsatzes der IKT in den Unternehmen.

6.3. Neues Wissen, neue Technologien und Wachstum

Aus den vorangegangenen Erläuterungen sollte ersichtliche sein, dass zwischen neuem Wissen und ökonomischem Wachstum ein oft komplizierter Transmissionsprozess liegt. Dieses Kapitel dient dazu diesen Prozess etwas detaillierter zu betrachten.

Die Suche nach neuen Techniken führt im Zeitablauf zu technologischen Erfindungen. Erfindungen repräsentieren dabei eher einen Prozess als ein einzelnes singuläres Ereignis. Mokyr (1990, S. 286 f.) spricht beispielsweise von dem Prozess der Erfindung. Erfindungen können daher auch als eine Art Lernprozesse interpretiert werden. Bei diesem Lernprozess wird kontinuierlich neues (technologisches) Wissen aufgebaut. Dieses Wissen wird permanent einem Praxistest unterzogen. Neues Wissen im Sinne von guten Ideen besteht den Test, schlechte Ideen bestehen nicht (Potts, 2003, S. 59). Das Endresultat ist eine neue Technik. Der Erfindungsprozess ist dabei eher ein kontinuierlicher Prozess. Neue Ansätze werden einem ständigen Praxistest unterworfen, wodurch die praktische Relevanz des Wissens geprüft wird. In diesen Prozess mischen sich Ereignisse im Sinne von technologischen Entdeckungen. Diesen plötzlichen Erkenntnissen liegt häufig kein langwieriger trial & error- oder learning by doing-Prozess zu Grunde. Der Prozess der Erfindung ist primär zielgerichtet. Entdeckungen sind somit oftmals nicht zielgerichtet im Sinne der F&E. Neues Wissen entsteht dabei eher sprungartig. Häufig ist der Praxistest implizit durch die Erkenntnis gegeben.

Die Suche nach neuen Techniken ist somit immer auch ein Lernprozess bei dem neues Wissen entsteht. Die Kombination vieler kleiner Techniken bildet eine Technologie. Technologischer Fortschritt kann daher als Lernprozess verstanden werden (siehe beispielsweise Mokyr, 2002b).

Auf der Ebene der Unternehmen wird neues Wissen angewendet, um Güter und Dienstleistungen effizienter, das heißt kostengünstiger, zu produzieren. Im einfachsten Fall bedeutet dies, dass auf der Mikroebene mit gleichem (weniger) Input mehr (gleicher) Output produziert werden kann. Dieses Outputwachstum ist letztendlich das Resultat von neu gewonnenem Wissen. Ebenso kann es zu einer qualitativen Verbesserung des Outputs kommen. Unterschiedliche Kombinationen sind möglich. Dies zieht jedoch nicht automatisch eine Veränderung auf gesamtwirtschaftlicher Ebene nach sich.

Technologischer Fortschritt im Sinne der Wachstumstheorie zeigt sich in der Praxis durch Innovationen. Innovationen sind letztendlich das ökonomisch gewünschte Ergebnis technologischen Fortschritts.

Dabei muss beachtet werden, dass auf der Ebene der Unternehmen die Innovationstätigkeit primär durch den ökonomischen Wettbewerb getrieben wird (siehe beispielsweise Karlsson et al., 2012, S. 5). Der wirtschaftlich überlebenswichtige Zwang Innovationen hervorbringen zu müssen, ist auf mikroökonomischer Ebene eine zentrale Triebkraft technologischen Fortschritts und somit auch der zentrale Anreiz neues technologisches Wissen auf mikroökonomischer Ebene zu schaffen. In letzter Konsequenz ist dieser Wettbewerb für Wachstum notwendig (Aghion und Howitt, 2009, S. 267).

In Abhängigkeit von der betrachteten ökonomischen Entität existieren unterschiedliche Anreize, die die Akkumulation und Generierung von neuem Wissens zumindest beeinflussen. Folgende Entitäten und Anreize lassen sich identifizieren.

Ökonomische Entität	Anreiz	Ebene
Privatperson	Neugier und Interesse	Mikro
Unternehmen	Wettbewerb, monopolartige Profite	Mikro
Wissenschaftler	Reputation, Karriere, Verständnis	Mikro
Institute und Bildungsreinrichtungen	Sicherung der Finanzierung und der Daseinsberechtigung	Makro
Länder	Ökonomische und politische Macht, Vormachtstellung	Makro
Haushalte	Konsumniveau, Sicherheit	Mikro
Arbeitnehmer	Arbeitsplatzsicherheit	Mikro
Politiker	Wiederwahl	Mikro

Tabelle 7: Anreize für die Generierung und Akkumulation von Wissen

Diese Anreize sind insbesondere aus politischer Sicht von Bedeutung. Beispielsweise haben sie unterschiedliche Konsequenzen für die Ausgestaltung von Anreizsystemen, die Teil einer wirtschaftspolitischen Strategie sein müssen. Darüber hinaus stehen sie im engen Zusammenhang zu den unterschiedlichen Arten von Innovationen, die im nachfolgenden Kapitel im Detail analysiert werden.

6.4. Graduelle und radikale Innovationen

Üblicherweise wird in der Literatur zwischen Produkt- und Prozessinnovationen sowie organisatorische Innovationen unterschieden (siehe beispielweise Greenhalgh und Rogers, 2010, S. 4 f.). Auf einer höheren Ebene betrachtet muss zunächst zwischen graduellen und radikalen Innovationen (auch Basisinnovationen) differenziert werden.

Graduelle Innovationen werden üblicherweise als Usher-Innovationen bezeichnet. Die Bezeichnung geht auf Alber P. Usher zurück, der erstmals die Bedeutung von graduellen Innovationen im Wachstumsprozess betonte (Ayres und Warr, 2009, S. 16 f.). Beispiele für graduelle Innovationen sind verbesserte Generationen von Mobiltelefonen (Smartphones).

Diese sind in erster Linie das Ergebnis ökonomischen Wettbewerbs. Durch ständige Abgrenzung in Form von kleinen Innovationen zu konkurrenzfähigen Preisen ist es Unternehmen möglich im Wettbewerb zu bleiben. Über kurz oder lang führt ein Stoppen der Innovationstätigkeit zum Ende der Wettbewerbsfähigkeit und das Unternehmen verschwindet vom Markt — so die Theorie. Nichtsdestotrotz existieren etliche Beispiele für Unternehmen, die weder innovativ noch kompetitiv sind und trotzdem nicht vom Markt verschwinden. Die Ursachen dafür liegen häufig im institutionellen Bereich.

Im Gegensatz zu graduellen sind radikale Innovationen in der Lage strukturelle Veränderungen im Wirtschaftssystem hervorzurufen. Beispiele für radikale Innovationen sind das Internet oder Allgemein die IKT. Schumpeter sprach in diesem Zusammenhang von sogenannten Basisinnovationen und betonte ihre Rolle in Bezug auf den Beginn langer Konjunkturwellen (Maußner und Klump, 1996, S. 220). Obwohl derartige Innovationen massive Effekte im Wirtschaftssystem haben können, sind sie nicht von größerer Bedeutung als graduelle Innovationen. Vielmehr ist das Zusammenspiel beider Arten entscheidend.

Hierbei sei nochmals betont, dass sowohl der Aspekt der Neuheit als auch der Aspekt der Markteinführung vor allem für graduelle Innovationen entscheidend sind. Greenhalgh und Rogers (2010, S. 4 ff.) argumentieren, dass der Grad der Neuheit sehr relevant ist. Noch bedeutender ist jedoch der Aspekt der Markteinführung. Erst eine erfolgreiche Markteinführung rechtfertigt die Klassifizierung als Innovation. Dieser Aspekt unterscheidet somit Innovationen von Erfindungen oder Entdeckungen.

Für ökonomisches Wachstum sind sowohl graduelle als auch radikale Innovationen relevant. Graduelle Innovationen bilden ein wichtiges Element im Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage sowie im ökonomischen Wettbewerb. Diese Innovationen stehen in der Regel für leicht veränderte Güter und Dienstleistungen und haben direkt oder indirekt Einfluss auf das Angebots- und Nachfrageniveau.

Radikale Innovationen sind primär für den strukturellen Wandel der Wirtschaft von Bedeutung. Diese sind in der Lage neue Wirtschaftssektoren, neue Märkte und daher auch völlig neue Angebots- und Nachfragestrukturen zu schaffen. Radikale Innovationen führen somit zu Systemumbrüchen. Schumpeter ging beispielweise davon aus, dass radikale Innovationen für die Einleitung neuer Konjunkturzyklen verantwortlich sind (Hanappi, 1997, S. 38 f. sowie Maußner und Klump, 1996, S. 220).

7. Wissen und seine unterschiedlichen Kategorien

Obwohl die meisten Menschen eine relativ klare Vorstellung von dem Begriff Wissen haben, existiert keine allgemein akzeptierte Definition. Aus rein ökonomischer Perspektive betrachtet, repräsentiert Wissen ein besonderes Gut (Romer, 1990; Cortright, 2001). Bei dessen Entstehung und Nutzung spielen Externalitäten eine gravierende Rolle. Darüber hinaus existieren unterschiedliche Arten von Wissen, die unterschiedliche ökonomische Eigenschaften aufweisen.

Bildung sowie F&E sind explizite Investitionen in den Wissensaufbau und aus der Sicht der Wachstumstheorie essentiell. Die Frage, welches Wissen der Schlüssel zu uneingeschränktem Wachstum ist, konnte und wird höchstwahrscheinlich nicht beantwortet werden können. Eine Klassifizierung in ökonomisch relevantes und irrelevantes Wissen (siehe z. B. Acs et al., 2007 oder Müller, 2005) ist aus der Sicht dieser Dissertation einerseits nicht möglich und andererseits nicht sinnvoll, da sich unterschiedliche Arten von Wissen oft ergänzen und neue Technologien formen. Objektiv betrachtet ist eine derartige Klassifizierung von Wissen im Vorhinein nicht möglich.

Bei der Analyse der diversen Beiträge in der Wachstumstheorie ist eine klare Konzentration auf technologisches Wissen im Sinn von kodifizierten Instruktionen erkennbar. In den Modellen der Wachstumstheorie wird häufig explizit oder implizit davon ausgegangen, dass

die einzelnen Elemente des ökonomisch relevanten Wissens Techniken im Sinne technischer Verfahren sind. Eine Technik ist in diesem Sinn eine Instruktion, um aus bestimmten Inputs einen bestimmten Output zu generieren, die dabei bestimmte funktionale Eigenschaften aufweist. Die gesamtwirtschaftliche Technologie ist in der Folge ein Aggregat all dieser Instruktionen.

Technologisches Wissen im Sinne der gesamtwirtschaftlichen Technologie ist zweifelsfrei von zentraler Bedeutung für ökonomisches Wachstum. Um den Zusammenhang zwischen Wissen, technologischem Fortschritt und Wachstum zu analysieren müssen jedoch einige Aspekte von technologischem Wissen im Detail diskutiert und analysiert werden. Dieses Kapitel dient der Diskussion der wichtigsten Aspekte aus der Sicht der ökonomischen Theorie. Nach einer kritischen Auseinandersetzung mit der Frage nach der Existenz von relevantem und irrelevantem Wissen wird auf die Klassifizierung in kodifiziertes und stilles Wissen eingegangen. Daran anschließend wird das ursprünglich auf den Nobelpreisträger Kuznets (1965) zurückgehende Konzept des *useful knowledge* näher betrachtet (siehe auch Mokyr, 2002b, S. 2). Anschließend wird auf die weit verbreitete Auffassung innerhalb der Ökonomie, dass Wissen ein öffentliches Gut repräsentiert sowie die These, dass Kapitalgüter im Wesentlichen nur bestimmtes Wissen widerspiegeln, im Detail eingegangen. Zunächst wird auf die in der Ökonomie oft vernachlässigte Differenzierung zwischen Informationen und Wissen eingegangen. All diese Aspekte stehen direkt oder indirekt mit dem später erarbeiteten Framework zur Analyse technologischen Fortschritts in Beziehung.

7.1. Die Unterscheidung zwischen Daten, Informationen und Wissen

Obwohl die Unterscheidung zwischen Daten, Informationen und Wissen beispielsweise in der Wirtschaftsinformatik weitverbreitet ist, hat sie im Allgemeinen in anderen Zweigen der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur und im Speziellen in der Wachstumstheorie im Verhältnis relativ wenig Beachtung gefunden. Selbst eng „verwandte“ Beiträge verwenden beispielsweise die Begriffe Informationen und Wissen oft synonym. Vergleiche hierzu z. B. Birchler und Bütler (2007) mit Romer (1990).⁸

Der Differenzierung zwischen diesen Begriffen liegt im Wesentlichen folgende Argumentation zu Grunde. Informationen können zwischen Menschen ausgetauscht werden – Wissen hingegen nicht. Boisot und Canals (2004, S. 7 ff.) argumentieren, dass Daten das Resultat unterschiedlicher Zustände der realen Welt sind. Die Zustände beziehen sich dabei in der Regel auf Zeit, Raum oder Energie. Das Messen der Zustände bestimmter Variablen bildet die Grundlage für den Informationsaustausch zwischen ökonomischen Agenten. Diese sind im Allgemeinen an einer gewissen Ordnung bzw. Regularität innerhalb der Daten interessiert. Informationen können daher als bedeutsame Ordnung in den Daten verstanden werden. Wissen kann in der Folge als eine Form der Erwartung in Bezug auf diese Ordnung definiert werden (Boisot und Canals, 2004). Informationen können dabei über diverse Kanäle zwischen Menschen – beispielweise über Kodifizierung mittels Sprache oder Schrift – ausgetauscht werden. Wissen ist jedoch stets an den jeweiligen Menschen gebunden und ist ein Resultat aus der unterschiedlichen Interpretation der empfangenen Informationen. In diesem Sinn kann Wissen auch nicht gespeichert werden.

Im Kontext dieser Arbeit ist insbesondere eine Differenzierung zwischen den Begriffen Information und Wissen notwendig. Hierbei soll eine alternative Sichtweise der beiden

⁸ Anzumerken ist, dass die Bedeutung der Unterscheidung zwischen diesen Begriffen insbesondere im Bereich des Knowledge Management betont wird. Siehe beispielweise No Doubt Research (2003) oder Marr und Spender (2004).

Begriffe forciert werden. Dabei steht der Begriff der Struktur im Fokus. Es ist das Merkmal der Struktur, die Wissen von Informationen unterscheidet. Sowohl Wissen als auch Informationen sind für technologischen Fortschritt und daher für ökonomisches Wachstum von besonderer Bedeutung. Allerdings auf unterschiedliche Art und Weise. Die hier erläuterte Sichtweise bildet später einen Bestandteil des Frameworks zur Analyse technologischen Fortschritts.

Friedrich A. Hayek bemerkte bereits im Jahr 1945, dass der Fokus innerhalb der Ökonomie auf Wissen im Sinne von wissenschaftlichem bzw. technologischem Wissen liegt (Hayek, 1945, S. 521 ff.). Diese Art von Wissen ist sehr stark formalisiert und äußerst strukturiert. Im Wesentlichen ist dies auch genau jenes Wissen, welches von Ökonomen indirekt mit dem Begriff der Technologie angesprochen wird. Hayek argumentiert jedoch, dass daneben eine enorme Menge an völlig unstrukturiertem Wissen innerhalb der Ökonomie existiert, welches weder als wissenschaftlich noch als strukturiert bezeichnet werden kann und trotzdem für Wirtschaftsprozesse enorm wichtig ist. Man denke dabei an das Wissen über kurzfristige Preisentwicklungen, lokale angebots- und nachfragerrelevante Ereignisse oder das Wissen über Entscheidungen von Geschäftspartnern. Der Aktienhändler, der Immobilienmakler sowie der Händler am Markt sind alle im Rahmen ihrer wirtschaftlichen Tätigkeit von diesem Wissen abhängig. Es ist für den effizienten Einsatz von Technologien und in Summe für den wirtschaftlichen Erfolg ausschlaggebend. Bei genauerer Betrachtung handelt es sich bei diesem von Hayek angesprochenen Wissen um Informationen. Es sind Informationen über Personen, Firmen, Preise oder lokale Gegebenheiten. Alle verfügen über eine gewisse Ordnung, jedoch sind sie nur Input für komplexere Strukturen des menschlichen Gehirns. Um einen Wert im ökonomischen Kontext zu generieren, müssen diese Informationen in geeigneten Wissensstrukturen verarbeitet werden. Diese Wissensstrukturen können im Rahmen dieser Arbeit als Technologien interpretiert werden. Das Verständnis dieser Strukturen, die zur Auswertung der Informationen von ökonomischen Agenten genutzt werden, ist von zentraler Bedeutung für die Ökonomie.

Die von einem einzelnen Agenten im Rahmen seiner ökonomischen Aktivität verarbeiteten Informationen ist teilweise enorm und trotzdem in Relation zur Gesamtmenge an zur Verfügung stehenden Informationen gering. In diesem Zusammenhang spielt die IKT eine wichtige Rolle. Der Erfolg der IKT hat im Wesentlichen zwei Gründe. Einerseits repräsentiert die IKT eine Wissenstechnologie und andererseits hat sie die Zugangskosten zu Informationen massiv reduziert (Mokyr, 2002b, S. 112—116). Letzter Punkt hat gravierende Konsequenzen für die Informationsverarbeitung ökonomischer Agenten. Die Fähigkeiten der Agenten diese Informationen zu verarbeiten hängt stark von ihrem Wissen ab. Insbesondere ist die Existenz geeigneter Wissensstrukturen für die effiziente Verarbeitung von Informationen notwendig. Das von Hayek (1945, S. 521—529) angesprochen Wissen ist aus dieser Perspektive betrachtet als Input für Wissensstrukturen zu verstehen. Die angesprochenen Informationen können selbst wieder für den effizienten Einsatz von Technologien ausschlaggebend sein. Dabei gilt es zu beachten, dass das Assoziieren sowie die Fähigkeit die Relevanz von Informationen zu beurteilen immer wichtiger werden. Insbesondere der zuletzt genannte Aspekt gewinnt in einer Zeit der Informationsflut sowohl im wirtschaftlichen als auch im technologischen Kontext immer mehr an Bedeutung.

7.2. Ökonomisch relevantes und irrelevantes Wissen

Betrachtet man das gesamte vorhandene Wissen, dann ist aus wachstumstheoretischer Sicht vor allem jenes Wissen relevant, welches in Bezug auf die ökonomischer Produktion von Nutzen ist. Mokyr (2002a und 2002b) spricht in diesem Zusammenhang von *useful knowledge* und bezieht sich auf das Wissen über natürlichen Phänomen und Regularitäten. Dieses kann in neue Techniken transformiert und ökonomisch verwertet werden (siehe hierzu

Kapitel 7.4). Jenes Wissen ist somit ökonomisch relevant, welches technologischen Fortschritt forciert. Diese Betrachtungsweise führt unweigerlich zur Frage, ob Wissen in relevantes und irrelevantes Wissen klassifiziert werden kann (siehe auch Müller, 2005 oder Acs et al., 2007).

Ökonomisch relevantes Wissen steht für jenes Wissen, welches eine höhere Wirtschaftsleistung ermöglicht. Das ökonomisch relevante Wissen wird somit in erster Linie mit jenem Wissen assoziiert, welches einen unmittelbaren praktischen Nutzen bei der Produktion von Gütern und Dienstleistungen hat. Dies Wissen wird üblicherweise unter dem Parameter A [siehe Gleichung (1)] verstanden.

In der öffentlichen Diskussion ist in diesem Zusammenhang die Tendenz erkennbar, dass immer stärker der praktische Wert von Wissen und dessen ökonomische Verwertung in den Vordergrund rücken. Es wird auch beispielsweise immer häufiger das aus der theoretischen Forschung resultierende Wissen in Frage gestellt. Mitunter ist die steigende Beliebtheit von Fachhochschulen im Vergleich zu Universitäten ein Indiz dafür. Ökonomisch irrelevantes Wissen wird in der öffentlichen Diskussion somit häufig mit jenem Wissen assoziiert, bei dem nicht unmittelbar die praktische Bedeutung und der ökonomische Nutzen ersichtlich sind. Dieses Wissen führt nicht unmittelbar zu einer Verbesserung der gesamtwirtschaftlichen Produktionstechnologie.

Diese Tendenz ist kritisch zu beurteilen. Hat dieses Wissen doch indirekt eine enorme Bedeutung für technologischen Fortschritt. Auf der einen Seite kann diese Sichtweise mittel- bis langfristig zu einem Ausdünnen der Wissensbasis führen. Auf der anderen Seite muss berücksichtigt werden, dass ohne Fortschritte in der Grundlagenforschung viele der wichtigsten Innovationen nie möglich gewesen wären. Darüber hinaus sind die meisten radikalen Innovationen aus unterschiedlichsten Wissensbereichen entstanden. Die Mathematik, die Physik sowie die Elektrotechnik waren beispielsweise Wissenslieferanten für die IKT in ihrer heutigen Form.

Die Klassifizierung von Wissen in (ökonomisch) relevantes und irrelevantes Wissen ist somit naheliegend, allerdings nicht unproblematisch (siehe hierzu Acs et al., 2007 und Müller, 2005). So wird beispielweise Wissen über die Grundlagen der binären Logik mittlerweile von den meisten Menschen und Unternehmen als ökonomisch höchst relevant angesehen. Dabei muss beachtet werden, dass die binäre Logik jahrelang als Randthema angesehen wurde. Ihr wurde lange Zeit kaum Bedeutung zugeschrieben, da kein großer praktischer Nutzen erkennbar war. Aus diesem Grund ist auch eine gewisse Vorsicht bei der Klassifizierung von Wissen nach diesem einfachen Muster geboten. Allgemein gilt, dass man im Vorhinein nicht sagen kann, welches Wissen ökonomisch relevant und welches irrelevant ist. Gründe dafür liegen in der ständigen Evolution von Wissen und seinem Netzwerkcharakter (Hanappi, 2008a; Mokyr, 2002b). Oft wird die Bedeutung bestimmten Wissens erst durch die Kombination verschiedener Wissenseinheiten erkennbar. Dies gilt vor allem für technologisches Wissen. Die Rolle der binären Logik innerhalb der IKT ist hierfür ein gutes Beispiel. Dieses Wissen war bis zum Aufkommen der IKT mehr oder weniger ökonomisch unbedeutend. Mit dem Aufkommen der IKT, deren theoretische Basis die binäre Logik bildet, wurden Personen mit entsprechendem Wissen schlagartig zu gefragten Persönlichkeiten (Hanappi, 2008b).

Nichtsdestotrotz ist anzumerken, dass das Wissen aus technischen und naturwissenschaftlichen Disziplinen in modernen Ökonomien immer mehr an Bedeutung gewinnt. Dies liegt mitunter auch an der gestiegenen Bedeutung der wissensbasierten Sektoren der Wirtschaft. Insbesondere die Hochtechnologiesektoren und allen voran der IKT-Sektor ist dafür verantwortlich. Diese Entwicklung steht somit im engen Zusammenhang zum Einfluss der IKT auf die Ökonomie und spiegelt sich auch in immer besseren Jobaussichten für Absolventen der sogenannten MINT-Fächer wider.

In Bezug auf die besseren Jobaussichten von Absolventen der MINT-Fächer ist anzumerken, dass es dabei im Kern häufig um die Fähigkeit geht, Zusammenhänge in Algorithmen zu transformieren bzw. allgemein Algorithmen zu formulieren. Dadurch wird Struktur geschaffen und letztendlich die Quantifizierung bestimmter Prozesse der realen Welt ermöglicht. Damit werden sozusagen Wissensstrukturen explizit kodifiziert, die mittels der IKT verarbeitet werden können. Die Vermittlung dieser Fähigkeit bildet einen Schwerpunkt in den MINT-Fächern und erklärt mitunter auch die besseren Jobaussichten.

Neben der soeben diskutierten Klassifizierung ist in der ökonomischen Literatur häufig die Differenzierung zwischen kodifizierbarem und stillem Wissen anzutreffen. Auf diese Differenzierung wird im nächsten Kapitel im Detail eingegangen.

7.3. Kodifizierbares und stilles Wissen

Einer der am weitesten verbreiteten Klassifizierungen von Wissen innerhalb der Ökonomie ist die Klassifizierung in kodifiziertes und stilles Wissen. Kodifiziertes Wissen bezeichnet all jenes Wissen, welches in Symbole transformiert und in der Folge außerhalb des menschlichen Gehirns gespeichert werden kann. Im Gegensatz dazu steht stilles Wissen für jene Aspekte, welche nicht oder nur mit sehr großem Aufwand kodifiziert werden können (siehe z. B. Rolf, 2004 oder OECD, 1996). Diverse Arbeiten, wie z. B. Langlois (2000), Cortright (2001), Fagerberg (2002), Rolf (2004), Howells (2002), Stenmark (2001) sowie Cowan et al. (1999) oder Mokyr (2002b, S. 115), führen diese Klassifizierung auf die Arbeiten von Michael Polanyi (1958, 1966) zurück.

Kodifiziertes Wissen repräsentiert dabei jenes Wissen, welches in Symbolen ausgedrückt wird und dadurch gespeichert werden kann (Langlois, 2000, S. 2). Durch diese Kodifizierung ist man in der Lage dieses Wissen zu transferieren. Ein Buch über Quantenphysik, eine mathematische Gleichung sowie der Blueprint zur Konstruktion eines Lasers sind Beispiele für kodifiziertes Wissen. Der Austausch von Wissen zwischen Individuen ohne direkten Kontakt setzt kodifiziertes Wissen voraus (siehe z. B. Cappellin, 2012, S. 160).

Kodifiziertes Wissen wird in den letzten Jahren verstärkt mit der IKT assoziiert (siehe beispielsweise Mokyr, 2002b, S. 115 f. oder Cortright, 2001, S. 21; siehe auch die Diskussion in Stenmark, 2001). Dies steht in engem Zusammenhang zur Rolle des Internets als sogenannter Wissensspeicher. Das enorme Wachstum des Internets in den letzten Jahren erleichterte den Zugang zu Informationen bzw. zu kodifiziertem Wissen. Zu beachten ist, dass die Zugangskosten zu Informationen drastisch gesunken sind. Die Technologie des Buchdrucks hatte einen ähnlichen Effekt, jedoch war die IKT mit dem Internet in der Lage einerseits die verfügbare Informationsmenge schlagartig zu erhöhen und andererseits die Kosten für Zugang, Verwaltung und Verbreitung drastisch zu reduzieren.

Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang ist, wie diese Informationsmenge effizient verarbeitet und genutzt werden kann. Das Internet ermöglicht prinzipiell den Zugang zu einer gigantischen Menge an Informationen. Den meisten Menschen fehlt jedoch das notwendige Grundlagenwissen, um diese Informationen effektiv zu nutzen. Es fehlt sozusagen die Wissensbasis um einen Mehrwert aus der gigantischen Menge an verfügbaren Informationen zu ziehen.

In der Folge stellt sich die Frage, wie viele Menschen tatsächlich effektiv in der Lage sind diese enorme Menge an kodifiziertem Wissen effizient und vor allem erfolgreich zu nutzen. Es stimmt, dass die IKT einen einfachen Zugang zu einer enormen Menge an Information bietet. Die große Masse an Konsumenten dieser Informationen hat jedoch nur einen beschränkten Vorteil dadurch (im Sinne eines Aufbaus von neuem Wissen). Dies liegt

einerseits an dem Fehlen der dafür notwendigen Wissensstrukturen und andererseits an den beschränkten Informationsverarbeitungskapazitäten der Agenten (Simon, 1972; Mallard, 2011). Bei all den Vorteilen der IKT resultieren somit auch gewisse Nachteile. So steigt beispielsweise der Aufwand enorm an, um die Qualität sowie Relevanz von Informationen zu überprüfen. Diese Beurteilung erfordert in der Regel das Vorhandensein von Grundlagenwissen. In einer Zeit in der Bildung immer stärker als Ware mit einem bestimmten Preis betrachtet wird, ist Zeit ein kritischer Punkt. Die Zeit für Bildung wird im Allgemeinen immer stärker limitiert, obwohl das Wissen exponentiell wächst. Der Aufbau von Wissensstrukturen erfordert jedoch in der Regel eine jahrelange Widmung und oft einen direkten Kontakt mit Lehrenden.

Insbesondere der letzte Aspekt führt uns in den Bereich des stillen Wissens. Diese Art von Wissen beschreibt in der Regel all jene Aspekte an Wissen, die nicht oder nur schwer artikuliert, symbolisiert und somit kodifiziert werden können. In der Folge kann dieses Wissen auch nur sehr schwer gespeichert und weitergegeben werden. Es ist jedoch häufig eine Grundvoraussetzung für den Erwerb von neuem Wissen bzw. das Verständnis von kodifiziertem Wissen (siehe beispielsweise Cappellin, 2012, S. 160 f.).

Diese Idee geht auf Michael Polanyi zurück, der sich aus einer psychologischen Perspektive mit der Natur von wissenschaftlichem Wissen auseinandersetzte. Polanyi formulierte seinen häufig zitierten Grundgedanken (siehe beispielsweise auch Stenmark, 2001, S. 6) wie folgt:

„we know more than we can tell“
(Polanyi, 1966, S. 4 in Hedesstrom und Whitley, 2000, S. 1).

Diese Art von Wissen kann nur sehr schwer oder überhaupt nicht artikuliert werden und kann daher auch nicht einfach ohne persönlichen Kontakt ausgetauscht werden. Die genaue Führung der Kreissäge bei der Holzverarbeitung, das intuitive Gespür für die Auswahl des am besten geeigneten Entwurfsmusters im Rahmen der Softwareentwicklung sowie das Wissen über das richtige Verhalten gegenüber Arbeitskollegen sind nur einige Beispiele für stilles Wissen. Um stilles Wissen zu erwerben ist in der Regel ein Lernprozess notwendig, bei dem das Wissen in einer Schüler-Lehrer-Konstellation weitergegeben wird (Howells, 2002, S. 872; Cappellin, 2012, S. 160 f.; Balconi et al., 2007, S. 837). Dieser Prozess zeichnet sich im Allgemeinen durch einen komplizierten Prozess persönlicher Interaktion aus, der durch das (oftmals unbewusste) Kopieren von Verhaltensweisen geprägt ist. In diesem Lernprozess ist ein Lehrer häufig unersetzlich (siehe auch OECD, 1996, S. 12).

In der jüngeren Literatur wird häufig argumentiert, dass (wenn überhaupt) nur ein sehr geringer Anteil des menschlichen Wissens wirklich „still“ ist und daher nicht kodifiziert werden kann. Diese Ansicht wird jedoch nicht von allen geteilt (siehe hierzu auch die Diskussion in Johnson und Lundvall, 2001 und Cowan et al., 1999).

In diesem Kontext wird häufig argumentiert, dass die verfügbare Menge an kodifiziertem Wissen in erster Linie eine Frage des Aufwandes ist (Johnson und Lundvall, 2001, S. 1; Cowan et al., 1999, S. 30 f.). Die verfügbare Menge an kodifiziertem Wissen innerhalb einer Ökonomie ist somit eine Frage von Kosten und Nutzen. Manche Autoren gehen davon aus, dass potentiell das gesamte menschliche Wissen theoretisch kodifizierbar ist bzw. kein Wissensaspekt wirklich inhärent still ist. Langlois (2000, S. 7, Fußnote 5) weist im Gegensatz dazu darauf hin, dass es niemals möglich ist, das gesamte Wissen eines Bereiches oder eines Menschen zu kodifizieren (siehe hierzu auch die Diskussion in Balconi et al., 2007, S. 833—838).

In den diversen Beiträgen wird teilweise übersehen, dass kodifiziertes und stilles Wissen prinzipiell nicht einfach zu trennen sind. Dies sind keine völlig disjunkten Mengen. Vielmehr verfügt jeder Wissensbereich sowohl über eine stille als auch über eine kodifizierbare Dimension bzw. Komponente. Kodifiziertes und stilles Wissen sind sozusagen

komplementäre Güter. Die Verwendung dieses Konzepts wird daher auch des Öfteren kritisiert.

Cowan et al. (1999, S. 1 f.) kritisieren die Bedeutung und Verwendung von stillem Wissen innerhalb der Ökonomie. Sie argumentieren, dass die ursprüngliche Bedeutung des Begriffs über die Jahre hinweg innerhalb der ökonomischen Literatur immer mehr verzerrt wurde. Polany (1958) verwendete den Begriff aus einer psychologischen Perspektive heraus. Er bezog sich dabei auf eine unterbewusste Komponente des menschlichen Wissens, das heißt auf jenen Teil des Wissen, der nicht bewusst in kognitiven Prozessen verarbeitet wird. Diese Kategorie von Wissen ist sehr häufig kontextbezogen.

Reber (1989) argumentiert auf Basis psychologischer Experimente, dass stilles Wissen existiert und durch implizite Lernprozesse aufgebaut wird. Diese Art des Lernens geschieht unbewusst und produziert eine implizite Wissensbasis. Diese ist im Wesentlichen abstraktes Wissen, welches die Struktur der Umwelt (den Kontext) repräsentiert. Dieses abstrakte Wissen ist insbesondere in Bezug auf die Problemlösungskompetenz von Menschen von Bedeutung. Implizites Wissen ist für die Generierung neuer Wissensstrukturen entscheidend. Howells (2002, S. 872) weist in diesem Zusammenhang darauf hin, dass implizites Wissen zentral für die Assimilation von neuem Wissen ist.

Aus ökonomischer Sicht muss ein weiterer Aspekt betont werden. Kodifiziertes Wissen kann teilweise als öffentliches Gut betrachtet werden. Im Gegensatz dazu repräsentiert stilles Wissen im Wesentlichen ein privates Gut (siehe z. B. Langlois, 2000, S. 2). Auf diesen Aspekt wird später noch im Detail eingegangen

Johnson und Lundvall (2001, S. 6) argumentieren hingegen dafür, dass kodifiziertes und stilles Wissen komplementär sind. Aus ihrer Perspektive sind kodifiziertes und stilles Wissen in Bezug auf die Schaffung und Nutzung von Wissen komplementär. Langlois (2000, S. 7, Fußnote 5) spricht sich für eine ähnliche Herangehensweise aus. Laut Langlois existiert in jedem Wissensbereich unabhängig von den Anstrengungen hinsichtlich der Kodifizierung stets eine stille Komponente.

Aus der Sicht dieser Dissertation repräsentieren kodifiziertes und stilles Wissen komplementäre Güter. Dies gilt insbesondere für Techniken und Technologien. Zu jeder Technik gibt es eine kodifizierbare und eine stille Dimension. Diese Dimensionen können auch als explizite und implizite Dimension verstanden werden. Diese Unterteilung steht häufig mit der Unterscheidung zwischen Theorie und Praxis in Beziehung. Beide Aspekte sind jedoch für den effizienten Einsatz und das Verständnis einer Technik relevant. Beide Dimensionen ergänzen sich somit wechselseitig.

Aus der Sicht dieser Arbeit ist daher folgende Perspektive zu forcieren. Kodifiziertes und stilles Wissen sind unterschiedliche Dimensionen von Wissen und sollten als explizites und implizites Wissen interpretiert werden. Beide Dimensionen sind potentiell kodifizierbar (Hanappi, 2008a, S. 15). Primär ist dies eine Frage des Aufwandes, das heißt der damit verbundenen Kosten und des potentiellen Nutzens (siehe diesbezüglich auch die Analyse von Cowan et al., 1999). Für das Verständnis der Rolle von Wissen in Bezug auf technologischen Fortschritt ist die Fragestellung der Klassifizierung in kodifizierbares und stilles Wissen daher eher sekundär. Diese Arbeit möchte in diesem Zusammenhang vielmehr den Fokus auf die Prozesse Bildung und berufliche Erfahrung richten. Explizites Wissen steht im Zentrum von Bildung. Implizites Wissen wird (neben explizitem Wissen) häufig im Rahmen der Erfahrung gewonnen und ist von zentraler Bedeutung für die praktischen Fähigkeiten ökonomischer Agenten. Beide Prozesse zusammen definieren Humankapital. Das Verständnis der Struktur von Wissen und dessen Wachstumsprozess ist entscheidend für ein besseres Verständnis technologischen Fortschritts und somit für das Verständnis von ökonomischem Wachstum.

7.4. Nützliches Wissen

Wie bereits erläutert wurde, steht in der Wachstumstheorie vor allem der Nutzen von Wissen in Bezug auf die Technologie zur Produktion von Gütern und Dienstleistungen im Mittelpunkt des Interesses. Man konzentriert sich somit im Allgemeinen auf technologisches Wissen im Sinne von Instruktionen bzw. technischen Verfahren. Dieser Definition von Wissen liegt im Großen und Ganzen dem Technologiebegriff in der gesamten ökonomischen Theorie zu Grunde.

In der Literatur wird in diesem Zusammenhang auch des Öfteren vom sogenannten *Useful Knowledge* gesprochen. Der Begriff des nützlichen Wissens geht auf den Nobelpreisträger Simon Kuznets (1965) zurück. In der jüngeren Vergangenheit wurde dieses Konzept von Joel Mokyr (2002a, 2002b) aufgegriffen und im Rahmen eines geschichtshistorischen Ansatzes zur Analyse des Wirtschaftswachstums verwendet. Laut Kuznets (1965) ist Useful Knowledge die Quelle für das Wachstum moderner Ökonomien (Mokyr, 2002b, S. 2 und S. 3, Fußnote 1). Da Mokyr's Definition von Wissen immer häufiger in der Wachstumstheorie (Aghion und Howitt, 2009, S. 211, 225 und 233) diskutiert wird (siehe beispielsweise auch Berg, 2006, S. 1 oder Hank in der FAZ, 2008, S. 2) und der Großteil seiner Arbeiten auf dem Konzept des Useful Knowledge aufbaut, wird in der Folge im Detail darauf eingegangen.

Mokyr (2002a und 2002b) wählt einen pragmatischen Zugang bei der Definition von nützlichem Wissen und analysiert darauf aufbauend das Zusammenspiel zwischen technologischem Wissen und Wachstum in Europa.

Laut Mokyr ist das enorme Wachstum in der Geschichte Europas auf das Wachstum von technologischem Wissen zurückzuführen. Dies betrifft insbesondere Wissen zur Produktion von Gütern und Dienstleistungen. Mokyr versteht darunter primär Wissen über natürliche Phänomene und Regularitäten (Mokyr, 2002a, S. 311), die in der ökonomischen Produktion genutzt werden können. Die Nutzung dieser Regularitäten und Zusammenhänge ist im Wesentlichen die Basis für ökonomische Produktion und steht in direkter Beziehung zum Begriff der Technologie.

Das nützliche Wissen einer Ökonomie wird durch die Gesamtheit des Wissens in Bezug auf natürliche Phänomene und Regularitäten der Individuen sowie dem auf Medien (wie z. B. Festplatten) gespeicherten Wissen gebildet (ibid., S. 312). Der letzte Aspekt bezieht sich stark auf kodifiziertes Wissen. Das sogenannte Useful Knowledge gliedert sich in Propositional Knowledge und Prescriptive Knowledge. Propositional Knowledge repräsentiert Wissen über natürliche Phänomene und Regularitäten und kann als Katalog aller natürlichen Zusammenhänge und Beziehungen verstanden werden. Akademisches Wissen als Output des Wissenschaftssektors bildet einen wichtigen Bestandteil von Propositional Knowledge. Weitere Bestandteile sind beispielsweise Handwerkswissen oder geografisches Wissen.

Prescriptive Knowledge bezeichnet im Wesentlichen Wissen im Sinne von Instruktionen oder Techniken. Jede Wissensseinheit innerhalb der Menge an Prescriptive Knowledge repräsentiert eine Menge an Instruktionen, die zusammen eine Technik bilden. Dabei gilt es zu beachten, dass Prescriptive Knowledge sowohl kodifizierbares als auch stilles Wissen umfasst. Die Techniken können in beiden Varianten vorliegen. Die Elemente des Prescriptive Knowledge bilden in Kombination mit den Elementen aus Propositional Knowledge ausführbare Einheiten. Prescriptive Knowledge enthält somit Techniken, die im Zusammenspiel mit Propositional Knowledge ausgeführt werden können. Wissen über natürliche Regularitäten kann in der Folge zur Entwicklung neuer Techniken genutzt werden (Mokyr, 2002a, S. 312 und 2002b, S. 4).

In dem Kontext dieser Arbeit ist der Zugang zu Informationen von besonderer Bedeutung. Insbesondere der Aspekt der Zugangskosten steht auch bei Mokyr (2002a und 2002b) immer

wieder im Mittelpunkt. Mokyr (2002b, S. 7, Fußnote 10 und S. 115) argumentiert beispielsweise, dass der enorme Boom der IKT auf die Reduktion von Zugangskosten zurückzuführen ist. Die IKT ermöglicht einen immer rascheren und kostengünstigeren Zugang zu Informationen. In der Folge ist es ökonomischen Agenten leichter möglich Wissen aufzubauen und Personen die bestimmtes Wissen haben, zu identifizieren. Diese Funktion der IKT ermöglicht eine immer stärkere Verbreitung von technologischem Wissen und forcierte dadurch das Wachstum von Useful Knowledge in den vergangenen Jahrzehnten.

Die IKT vereinfacht somit den Zugang zu Informationen in Bezug auf bestimmtes Wissen und erleichtert das Auffinden von Wissensträgern. Diese Eigenschaft der IKT führt dazu, dass jede existierende Technologie durch die IKT beeinflusst wird. Informationen über und im Zusammenhang mit anderen Technologien sind durch die IKT leichter zugänglich. Mokyr (2002b, S. 113) bezeichnet die IKT daher als Wissenstechnologie.

Die Tatsache, dass Wissen im Zusammenhang mit Techniken und Technologien nur sehr schwer geheim gehalten werden können – insbesondere wenn eine Technik einmal in der Praxis eingesetzt wird – ist aus der Sicht des Urhebers nicht wirklich positiv zu beurteilen. Diese Eigenschaft führte dazu, dass Wissen aus der Sicht vieler Ökonomen eine spezielle Form eines öffentlichen Gutes repräsentiert. Diese Definition von Wissen sowie die damit verbundenen Vor- und Nachteile stehen im Fokus des nachfolgenden Kapitels.

7.5. Wissen als öffentliches Gut

Viele Ökonomen betrachten Wissen als spezielles öffentliches Gut. Bei der Schaffung von Wissen muss beachtet werden, dass das produzierte Gut kein Produkt im herkömmlichen Sinn ist. Es weist Eigenschaften auf, die für den potentiellen Gewinn des „Produzenten“ gravierende Folgen haben können. Diese Eigenschaften stehen in enger Beziehung zu den Begriffen Rivalität und Exkludierbarkeit (Romer, 1986, 1990; Cortright, 2001; Foss, 1996; Hahn, 1993, Gundlach, 2001).

Wissen repräsentiert aus ökonomischer Sicht ein nicht rivales Gut. Die Nutzung durch eine Person schließt nicht die Nutzung durch eine andere Person aus. Im Gegenzug dazu hätte ein vollständig rivales Gut die Eigenschaft, dass die gleichzeitige Nutzung durch eine andere Person ausgeschlossen ist (Romer, 1990, S. 73). Die simultane Anwendung von Wissen durch mehrere Personen ist jedoch weder eingeschränkt noch ausgeschlossen. Beispielsweise kann eine bestimmte Technik von beliebig vielen Personen gleichzeitig angewendet werden. Wissen charakterisiert sich somit durch die Eigenschaft der Nicht-Rivalität.

Des Weiteren kennzeichnet sich Wissen dadurch, dass es besondere Eigenschaften in Bezug auf die Exkludierbarkeit aufweist. Die Exkludierbarkeit eines Gutes bezieht sich auf jenen Sachverhalt, dass der Eigentümer des Gutes andere Personen an der Nutzung des Gutes hindern kann (Romer, *ibid.*, S. 74). Das Wesen des Gutes Wissen schränkt jedoch die Exkludierbarkeit sehr stark ein. Wird Wissen publik oder in irgendeiner Form an eine andere Person weitergegeben, dann ist es nur sehr schwer möglich Exkludierbarkeit zu gewährleisten.

Die einzig sinnvolle Möglichkeit dies zu erreichen liegt im institutionellen Bereich mit Mitteln wie z. B. Patent- und Eigentumsrechten (siehe beispielsweise Cortright, 2001, S. 5). Grad und Umfang der Patent- und Eigentumsrechten ist aus ökonomischen Gesichtspunkten betrachtet bei Weitem keine triviale Frage. Zu schwache Rechte führen zu einer zu geringen Investition in F&E, da Unternehmen zu wenig Investitionen tätigen, weil monopolartige Erträge für die Innovationen auf Grund der speziellen Eigenschaften von Wissen nicht gesichert sind. Zu starke Patent- und Eigentumsrechte hemmen wiederum den Wissensfluss sowie das Marktgeschehen in der Ökonomie. Dies kann zu ungewollten Monopolstellungen führen (siehe z. B. Aghion und Howitt, 2009, S. 267).

In diesem Zusammenhang gilt es zu beachten, dass eine große Menge an Wissen nicht der zuvor diskutierten Problematik unterliegt, da es nicht publik gemacht wird. Das gesamte bereits diskutierte stille Wissen fällt in diesen Bereich. Diese Art von Wissen repräsentiert für den Träger des Wissens ein privates Gut. Für diese Art von Wissen kann ein hoher Grad an Exkludierbarkeit erzielt werden, in dem das Wissen einfach nicht an eine andere Person beispielweise durch persönlichen Kontakt (Ausbildung) weitergeben wird.

Die Mikroökonomie zeigt, dass sich öffentliche Güter, wie z. B. die Landesverteidigung, durch Nicht-Rivalität und Nicht-Exkludierbarkeit kennzeichnen (siehe z. B. Varian, 1999, S. 592—618 oder Romer, 1990, S. 74). Die teilweise Exkludierbarkeit sowie die stillen Aspekte von Wissen ermöglichen keine eindeutige Klassifizierung von Wissen als öffentliches Gut. Wissen kann daher in Summe nicht hundertprozentig als öffentliches Gut interpretiert werden. Vor allem die endogene Wachstumstheorie tendieren jedoch zu dieser vereinfachten Herangehensweise (siehe z. B. Cortright, 2001, S. 5).

Der hohe Stellenwert von Wissen innerhalb der endogenen Wachstumstheorie hat einen zentralen Grund. Die speziellen Eigenschaften von Wissen in Bezug auf Rivalität und Exkludierbarkeit erlauben es, die traditionelle Annahme der sinkenden Grenzerträge des Faktors Kapital im Rahmen der theoretischen Annahmen zu verwerfen (Gundlach, 2001, S. 178 f.; Hahn, 1993, S. 432). Dies liegt daran, dass in den Modellen der endogenen Wachstumstheorie Wissen häufig als Teil des Produktionsfaktors Kapital gesehen wird. Diese Aspekte stehen im Fokus des nächsten Kapitels.

7.6. Wissen und der Produktionsfaktor Kapital

Ökonomische Produktion im klassischen Sinn benötigt auf die eine oder andere Form Kapital als einen Inputfaktor. In den theoretischen Modellen der exogenen und endogenen Wachstumstheorie ist dieser Inputfaktor eine hochaggregierte Größe, die alle Arten von Kapitalgütern umfasst. In Kontext dieser Arbeit stellt sich vor allem die Frage, in welcher Beziehung steht neues Wissen zu den einzelnen Produktionsfaktoren und wie beeinflusst es den technologischen Zusammenhang zwischen den Faktoren auf gesamtwirtschaftlicher Ebene hat.

Innerhalb der Wachstumstheorie wird in diesem Zusammenhang vor allem die Beziehung zwischen Wissen und dem Produktionsfaktor Kapital analysiert und diskutiert. Dabei gibt es im Wesentlichen zwei Zugänge bzw. Thesen. Die eine besagt, dass Wissen als Teil des gesamtwirtschaftlichen Kapitals anzusehen ist und somit einen direkten Inputfaktor repräsentiert (siehe hierzu auch Hahn, 1993 und Gundlach, 2001). Die zweite richtet den Fokus auf die Beziehung zwischen Kapitalgütern und dem darin abgebildeten Wissen (siehe hierzu auch Baetjer, 1997 und Potts, 2003). Auf beide Thesen wird in der Folge im Detail eingegangen.

7.6.1. Wissen als Teil des gesamtwirtschaftlichen Kapitals

Die erste These besagt im Kern, dass die Definition von Kapital breiter gefasst werden muss. Im Speziellen muss der Faktor Kapital definitionsgemäß nicht nur – wie üblich – die in der Ökonomie zur Verfügung stehende Kapitalgüter umfassen, sondern auch das innerhalb einer Ökonomie zur Verfügung stehende Wissen (Gundlach, 2001, S. 179 f.; Hahn, 1993 S. 433 f.; Aghion und Howitt, 1999, S. 25 f.). Dieser Ansatz geht im Wesentlichen auf die Beiträge von Paul Romer (1986 und 1990) zurück, wobei sich die grundsätzlichen Ideen wesentlich weiter zurückverfolgen lassen.

Zur Erinnerung: Wie Gundlach (2001, S. 179) erläutert, erlaubt die Integration von Wissen in den Kapitalbegriff ein Abgehen von der traditionellen Annahme eines sinkenden Grenzertrages des Faktors Kapital. Üblicherweise wird die gesamtwirtschaftliche Produktion

in einfachster Form durch die Funktion $Y = Y(K, L)$ dargestellt, wobei Y für den Output, K für das Kapital und L für Arbeit steht. Für die beiden Inputfaktoren Kapital und Arbeit wird für gewöhnlich die Eigenschaft positiver aber sinkender Grenzerträge unterstellt. Formal bedeutet dies beispielsweise für den Faktor Kapital $\partial Y/\partial K > 0$ und $\partial^2 Y/\partial K^2 < 0$. Durch die Erhöhung eines Inputfaktors kann zwar der Output erhöht werden, aber die dadurch zusätzlich produzierte Einheit wirft einen geringeren Ertrag ab, als die zuvor produzierte Einheit (Otruba et al., 1996, S. 52). Durch die Erhöhung eines Inputfaktors ist es somit möglich mehr Output zu erzeugen, jedoch mit einer abnehmenden Rate. Ceteris paribus folgt daher, dass ein uneingeschränktes Outputwachstum nur durch die Erhöhung des Faktors Kapital auf Grund dieser Eigenschaft nicht zu erzielen ist. Dauerhaftes Wachstum ist auf Basis solcher Modellannahmen nur durch reine Kapitalakkumulation nicht möglich.

Wie steht nun Wissen damit im Zusammenhang? Wenn dauerhaftes Wachstum nicht durch reine Kapitalakkumulation möglich ist, dann muss ein anderer Faktor im Spiel sein, der das in der Praxis ständige beobachtbare Wachstum realisiert. Es muss ein Faktor existieren, der durch seine speziellen Eigenschaften in der Lage ist, die sinkende Grenzproduktivität „auszuhebeln“ und dadurch kontinuierliches Wachstum ermöglicht. Innerhalb der Ökonomie wurde schon lange davon ausgegangen, dass neues (technologisches) Wissen dieser Faktor ist. Jedoch erst Romer (1986, 1990) lieferte dazu konsistente Modelle (für Details siehe hierzu Kapitel 3.2).

Gundlach (2001, S. 179 f.) sowie Hahn (1993, S. 434) erläutern, dass Romer seinen Modellen folgende Überlegungen zu Grunde legt. Dadurch, dass Wissen ein nicht rivales und ein nur teilweise exkludierbares Gut darstellt, kommt es zu positiven Externalitäten. Neues Wissen kann uneingeschränkt von mehreren Personen angewendet werden und man hat nur beschränkte Möglichkeiten andere Personen von der Nutzung auszuschließen. Dazu kommt die Eigenheit, dass neues Wissen rein theoretisch unbeschränkt produziert werden kann. Diese Eigenheiten führen dazu, dass bei der Produktion von Wissen Externalitäten auftreten. Diese implizieren jedoch, dass andere Personen als der Urheber von dem neu gewonnenen Wissen profitieren. Das neue Wissen führt beispielweise zu positiven Effekten im Produktionsprozess anderer Unternehmen. Der Faktor Kapital kann somit durch das neu gewonnenen Wissen in Form von Technologien effizienter in unterschiedlichen Unternehmen eingesetzt werden. Erreichen diese externen Effekte ein gewisses Ausmaß, dann kann es dazu kommen, dass für den Faktor Kapital nicht mehr das „Gesetz“ vom fallenden Grenzertrag auf gesamtwirtschaftlicher Ebene gelten muss. Durch die externen Effekte von Wissen kann es somit zu einer konstanten oder sogar steigenden Grenzproduktivität kommen. Der Faktor Kapital wird sozusagen immer produktiver und leistet in der Folge einen höheren Beitrag zum Output, da er von positiven Externalitäten im Zusammenhang mit neuem Wissen profitiert (Gundlach, 2001; Hahn, 1993; Romer, 1986, 1990).

7.6.2. Kapitalgüter und Wissen

Die zweite These baut auf gewisse Art und Weise auf den Überlegungen der ersten These auf und verfeinert deren Argumente. Sie basiert auf der Idee, dass das Wissen, welches zur Entstehung eines Kapitalgutes geführt hat, die Form und die Funktion des Kapitalgutes bestimmen. So besteht beispielsweise eine Schaufel aus Stahl und Holz. Die Form der Schaufel wird aber bei genauerer Betrachtung durch das Wissen bestimmt, welches die jeweiligen Personen in der Produktion und im täglichen Einsatz angewendet hat. Gemäß dieser Ansicht ist es das Wissen, welches die endgültige Form des Gutes bestimmt. Die physische Erscheinungsform der Kapitalgüter „verschleiert“ sozusagen ihre wissensbasierte Natur. Je komplexer die Kapitalgüter werden, umso wissensintensiver sind sie. In einem PC ist mehr Wissen eingeflossen als in eine Schaufel. In diesem Sinn ist der gesamte Produktionsfaktor Kapital nichts anders als Wissen. In den Worten von Jason Potts

„Capital is knowledge in an operational form.“ (Potts, 2003, S. 59).

Baetjer (1997, S. 8 f.) argumentiert in diesem Zusammenhang, dass in jedem Produktionsprozess Kapitalgüter eingesetzt werden. Diese Kapitalgüter verkörpern bei genauerer Betrachtung das Wissen über die Produktion des Outputs. Sie spiegeln sozusagen das Wissen, welches für die Produktion notwendig ist, wider. Den jeweiligen Zweck erfüllen die Kapitalgüter umso besser, je besser sie das jeweilige Wissen verkörpern. Ökonomisch relevantes Wissen manifestiert sich sozusagen in Form von Kapitalgütern (Baetjer, 1997, S. 9). Die Ansicht von Baetjer soll anhand eines einfachen Beispiels noch weiter verdeutlicht werden (siehe hierzu auch beispielsweise Varian, 1999, S. 303 ff.).

Ein Unternehmen produziert beispielsweise Rotweingläser. Betrachtet man ein Rotweinglas näher, so stellt man fest, dass der Stiel in einem ganz bestimmten Winkel angebracht wurde. Ebenso weist das Glas eine ganz bestimmten Krümmung sowie Form auf. Die endgültige Form des Glases stand mit Sicherheit nicht bei der Erzeugung des ersten Glases fest. Vielmehr war ein Prozess der ständigen Verbesserung — das heißt ein Praxistest — notwendig, um die endgültige Form zu bestimmen. In diesem Prozess ist ständig neues Wissen in die Produktion miteingeflossen. Wissen ist daher in jedem Kapitalgut eingebettet und dieses spiegelt somit das Wissen über den gesamten Produktionsprozess wider.

Abschließend sei noch angemerkt, dass beide Thesen ihren Ursprung in der endogenen Wachstumstheorie haben. Wissen wird dabei wie bereits erläutert primär als öffentliches Gut verstanden. In den Modellen der endogenen Wachstumstheorie wird im Allgemeinen jedoch nicht explizit zwischen den unterschiedlichen Arten von Wissen differenziert (siehe hierzu auch die Gegenüberstellung der endogenen Wachstumstheorie und der evolutionären ökonomischen Theorie in Fagerberg, 2002, S. 41).

8. Die IKT und die Ökonomie

In modernen Ökonomien gewinnt der Austausch und die Verarbeitung von Informationen sowie die Produktion und Akkumulation von Wissen immer mehr an Bedeutung. Immer häufiger stehen nicht mehr physische Produktionsfaktoren wie Kapital und Arbeit im Zentrum volkswirtschaftlichen Interesses, sondern Informationen und Wissen (Houghton und Sheehan, 2000; OECD, 1996; Sacchetti und Sugden; 2009a; Xingyuan, 2009; Varian, 2001). Dabei spielt die IKT eine immer wichtigere Rolle. Technologischer Fortschritt und ökonomisches Wachstum werden in diesem Zusammenhang häufig mit Innovationen aus dem Bereich der IKT assoziiert (siehe hierzu auch die Diskussion in Smith, 2002, S. 8 f.). Darüber hinaus hat die IKT die Wirtschaftssysteme teilweise massiv verändert. Dies hat diverse Gründe.

Zunächst ist dabei das starke Wachstum der IKT-Sektoren zu nennen (Schmitz, 2001; Naderer et al. 2007; OECD, 2010). Des Weiteren haben das Internet und die Mobiltelefonie in vielen Fällen wirtschaftliche Prozesse und Organisationsformen verändert. Die hohe Nachfrage nach immer mehr IKT-Innovationen — vorrangig nach neuer Software — hat das Wachstum der IKT-Sektoren noch weiter forciert. Dies hat eine starke Nachfrage nach Fachkräften aus diesen Bereichen nach sich gezogen und damit die Bedeutung der IKT als Wissenstechnologie noch verstärkt (Hanappi, 2008a; Mokyr, 2002b).

Des Weiteren hat der hohe Bedarf an IKT-Gütern eine Reihe an indirekten Nachfrageeffekten produziert.

Darüber hinaus kam es auf Grund der IKT zu einem strukturellen Wandel. Im Rahmen dieses Wandels kam es unter anderem zu einer Art Zweiteilung der Ökonomie in eine klassische Produktionswelt und eine „IKT-Welt“ (Arthur, 1996; Smith, 2002, S. 6). Beide Welten folgen unterschiedlichen ökonomischen Gesetzmäßigkeiten und Regeln. Dabei gilt es zu beachten,

dass die bestimmenden Strukturen der IKT-Welt im engen Zusammenhang mit den Eigenschaften von Wissen stehen.

Die Kombination von Hardware und Software brachte das Internet und das Mobiltelefon im Zuge technologischen Fortschritts als zentrale Innovationen hervor. Beide Innovationen stehen heute als Synonym für den Erfolg der IKT. Darüber hinaus haben sich beide sowohl aus ökonomischer als auch technologischer Sicht zu Institutionen entwickelt.

Immer mehr Menschen nutzen das Internet als Informationsspeicher und generieren darauf aufbauend ihr Wissen. Häufig wird es auch als Wissensspeicher verstanden. Aus diesem Grund kann das Internet in erster Linie als Institution der Informationstechnologie gesehen werden. Das Mobiltelefon wird primär zur Kommunikation zwischen Menschen genutzt und kann daher als Institution der Kommunikationstechnologie gesehen werden (Hanappi, 2008a, S. 7 f.). Mittels dieser beiden Innovationen hat die IKT weltweit das Verhalten sowie Informations- und Kommunikationsprozesse ökonomischer Agenten stark beeinflusst. Dies hatte unmittelbare Konsequenzen auf ökonomische Systeme und Prozesse. In Summe repräsentiert die IKT eine Wissenstechnologie (Mokyr, 2002b, S. 113), die die Prozesse und Gesetzmäßigkeiten innerhalb der Wirtschaft verändert hat.

Aus der Sicht dieser Dissertation sind für das Verständnis der IKT im Zusammenhang mit technologischem Fortschritt und Wachstum folgende Aspekte von besonderer Bedeutung. 1) Die IKT repräsentiert eine Wissenstechnologie und hat auf Grund dessen eine Teilung der Wirtschaft in zwei Welten bewirkt. Beide werden von unterschiedlichen ökonomischen Gesetzmäßigkeiten bestimmt. Die Regeln und Gesetzmäßigkeiten der IKT-Welt stehen im engen Zusammenhang mit dem Wesen und der Struktur von Wissen. 2) Die zentralen Innovationen der IKT und die dadurch ausgelösten großen ökonomischen Veränderungen resultieren aus der Kombination von Hard- und Software. Dabei gilt es zu beachten, dass der Beitrag von Software wesentlich höher ist, als der von Hardware. Die mit der IKT assoziierten Effekte sowie die ökonomischen Veränderungen sind bei genauerer Betrachtung primär mit Software verbunden. Dies liegt nicht zuletzt daran, dass Software im Kern nichts anderes ist, als eine algorithmische Formulierung einer Problemstellung eines bestimmten Wissensbereichs. Software kann somit im weitesten Sinn als eine Art Sprache aufgefasst werden. Programme kodifizieren bestimmte Technologien aus bestimmten Wissensbereichen und sind somit untrennbar mit Wissen verbunden. 3) Netzwerke spielen in Bezug auf die IKT und Wissen eine zentrale Rolle. Betrachtet man das Internet und das Telefonnetz aus rein technischer Perspektive, so wird die Netzwerkstruktur schnell ersichtlich. Netzwerkstrukturen spielen aber nicht nur auf technischer Ebene eine wichtige Rolle innerhalb der IKT. Eine Vielzahl an ökonomischen und sozialen Systeme, die im engen Zusammenhang zur IKT stehen, weist eine Netzwerkstruktur auf. Einige Ökonomen argumentieren darüber hinaus, dass Wissen selbst als (evolutionäres) Netzwerk zu verstehen ist (Hanappi, 2008a). Eine detaillierte Analyse dieser Aspekte ist essentiell für ein besseres Verständnis der Phänomene rund um die IKT sowie für das Verständnis des Zusammenhangs für technologischen Fortschritt und Wachstum. In der Folge wird auf die unterschiedlichen Aspekte im Detail eingegangen.

8.1. IKT und die Teilung der Ökonomie

Zur Zeit der Entstehung der klassischen Wirtschaftstheorien waren die Ökonomien im Wesentlichen von Landwirtschafts- und Industriebetrieben geprägt. Mit einer bestimmten Menge an physisch begrenzten Inputfaktoren wurde ein bestimmter Output produziert. Die klassischen Wirtschaftszweige bilden heute noch einen zentralen Bestandteil jeder Ökonomie, jedoch ist ihre Bedeutung in der medialen sowie wirtschaftspolitischen Diskussion oft zurückgegangen. Neben der Produktion traditioneller Güter und Dienstleistungen gewinnt die

Produktion immaterieller Güter sowie Informationsgüter vor allem in den Industrienationen immer mehr an Bedeutung. Ökonomien sind daher auf neues Wissen angewiesen (siehe beispielsweise OECD, 1996; Bassanini et al., 2000; Smith, 2002). In vielen Fällen liegt der Fokus daher immer stärker auf der Generierung und Akkumulation von Wissen. Lag früher der Schwerpunkt auf physisch begrenzten Ressourcen wie Land und Boden, so stehen heute in vielen Fällen Informationen und Wissen im Mittelpunkt ökonomischer Entscheidungen. Dies hat mitunter zu einem starken Wachstum jener Wirtschaftszweige geführt, die sich auf die Informationsverarbeitung und -aufbereitung sowie der Bereitstellung von Arbeitskräften mit entsprechendem Wissen spezialisiert haben.

Diese Schwerpunktverschiebung bedeutet allerdings auch, dass sich die ökonomischen Gesetzmäßigkeiten in bestimmten Wirtschaftszweigen verändert haben. Ein zentraler Baustein der klassischen Wirtschaftstheorie ist das Gesetz sinkender Grenzerträge (siehe hierzu auch Kapitel 3.2). Das „Gesetz“ besagt, dass die Beiträge eines Inputfaktors zum Output bei der Erhöhung des Inputfaktors kontinuierlich abnehmen. Die Relevanz dieses Produktionsgesetzes in Bezug auf traditionelle Wirtschaftszweige ist in der Regel unbestritten. Für wissensbasierte Ökonomien bzw. für die wissensintensiven Wirtschaftszweige ist jedoch oftmals genau das Gegenteil der Fall. Die Produktion dieser Art von Gütern unterliegt in vielen Fällen steigenden und nicht sinkenden Grenzerträgen.

Arthur (1996) argumentiert, dass diese Schwerpunktverschiebung zu einer Art Teilung der Ökonomie geführt hat. Auf der einen Seite existieren die klassischen Wirtschaftssektoren und auf der anderen Seite existieren die wissensbasierten Sektoren. Die eine Seite agiert nach dem Gesetz sinkender Grenzerträge. Die andere Seite wird durch steigende Grenzerträge bestimmt. Die Produktion wissensbasierter Güter folgt somit anderen wirtschaftlichen Regeln als die Produktion physischer Güter. Wissensbasierte Güter haben prinzipiell eine große Bandbreite. Beispiele sind Software, technische Analysen sowie Konzepte. Eine Erhöhung des Inputfaktors Wissen führt jedoch langfristig nicht zu einem abnehmenden Beitrag zum Output. Vielmehr führt die Generierung von neuem Wissen und dessen Einsatz als Input in der Produktion zu einem steigenden Grenzertrag. Der Output steigt somit kontinuierlich an. In der Regel gibt es auch keine ernstzunehmende technische Beschränkung, die dieses kontinuierliche Outputwachstum begrenzen würde. Beispielsweise macht die Produktion von 10.000 oder 1.000.000 Kopien eines technischen Konzepts nur wenig Unterschied in Bezug auf den Bedarf an Grund und Boden (siehe hierzu auch Cortright, 2001, S. 4). Die zentrale Frage im Rahmen wissensbasierter Güter ist somit nicht, mit welchen physischen Produktionsbeschränkungen man konfrontiert ist, sondern wie man zu dem neuen Wissen als Inputfaktor kommt.

Das Phänomen steigender Grenzerträge wird häufig mit der Produktion in den IKT-Sektoren assoziiert. Primär wird damit die Produktion von Software angesprochen. Die Produktion von Hardware folgt eher den Gesetzmäßigkeiten der klassischen Wirtschaftssektoren. Da Hardware und Software jedoch komplementäre Güter sind, wird dieser Unterschied häufig ignoriert.

Anzumerken ist, dass steigende Grenzerträge auch häufig in der Musik- und Filmindustrie sowie im Wissenschaftssektor anzutreffen sind. Diese können daher ebenfalls als Teil der wissensbasierten Ökonomie gesehen werden.

Generell wird die von Arthur (1996) angesprochene Teilung der Ökonomie in eine Welt sinkender und in eine Welt steigender Grenzerträge noch von einer Reihe anderer Effekte begleitet. Diese Effekte treten insbesondere in den IKT-Sektoren in Kombination mit steigenden Grenzerträgen auf und forcieren dadurch diese Spaltung der Wirtschaft. Dabei gilt es zu beachten, dass diese Effekte noch wesentlich charakteristischer für die Produktion in den IKT-Sektoren sind, als steigende Grenzerträge.

Dazu zählen unter anderem folgende Effekte: Lock-In-Effekte, Netzwerkeffekte, Systemeffekte sowie Economies of Scale (Varian, 2001; Cortright 2001, Arthur, 1996).

Varian (2001, S. 13) merkt jedoch an, dass diese Effekte auch teilweise stark in der klassischen Industrie vorhanden sind, allerdings muss man genau wissen, wo man „hinsieht“. Dreh und Angelpunkt für das Verständnis der ökonomischen Prozesse in wissensbasierten Sektoren ist die Kostenstruktur. Dies gilt insbesondere für Softwareentwicklungsunternehmen. Grundsätzlich zeichnet sich die Kostenstruktur in diesen Sektoren durch sehr hohe Fixkosten und sehr niedrige Grenzkosten aus (Cortright, 2001, S. 4; Varian, 2001, S. 5). Die Produktion der allerersten Outputeinheit ist somit extrem teuer, die Produktion jeder weiteren Outputeinheit kostet nahezu nichts. In einem solchen Kostenumfeld ist es leicht ersichtlich, dass der Effekt des Sinkens der durchschnittlichen Kosten pro Einheit bei einer Erhöhung der Outputmenge sehr stark sein kann (siehe beispielsweise Varian, 2001, S. 24–31). Mit anderen Worten, Economies of Scale sind ein häufig beobachtbareres Phänomen in der IKT-Welt.

Economies of Scale werden noch durch weitere Effekte verstärkt, die dazu führen, dass ein Unternehmen, welches als erstes ein Produkt auf den Markt bringt, einerseits immer weiter seine Position stärkt und andererseits immer stärker wächst. Hierbei sind vorrangig Lock-In-Effekte und Systemeffekte zu nennen. Gelingt es beispielsweise einem Softwarehersteller sein Produkt vor der Konkurrenz am Markt zu etablieren, dann führt dies automatisch zu einer starken Bindung der jeweiligen Kunden. Diese enge Bindung basiert im Wesentlichen darauf, dass teilweise sehr hohe Kosten mit einem Wechsel des Anbieters für den Konsumenten verbunden sind. Diese sogenannten Switching Costs können teilweise enorm sein. Im Softwarebereich müssen ja neben den reinen Kosten des Umstiegs auch beispielsweise das Training der Mitarbeiter, die Wartung sowie Kosten bei Kompatibilitätsproblemen von Lösungen alternativer Anbieter berücksichtigt werden. Varian (2001, S. 21) argumentiert in diesem Zusammenhang sinngemäß, wenn die Kosten eines Umstiegs für ein Unternehmen so hoch sind, dass man gar nicht an einen Anbieterwechsel denkt, dann befindet man sich in einer Lock-In Situation. Dies ist in der IKT-Welt häufig der Fall.

Lock-In-Effekte werden üblicherweise von Systemeffekten begleitet. Systemeffekte können aus ökonomischer Sicht als Effekte im Zusammenhang mit komplementären Gütern verstanden werden. Wissensbasierte Güter haben oft die Eigenschaft, dass ihr Nutzen erst durch die Kombination mit anderen Gütern resultiert. Hardware und Software sind hierfür das beste Beispiel (Varian, 2001, S. 39).

All diese Effekte begünstigen Monopolstellung bestimmter Hersteller in wissensbasierten Sektoren. Die Dominanz von zwei Herstellern am Markt für Betriebssysteme (das heißt Microsoft und Apple) ist nur ein Beleg für die Wirkungsweise der beschriebenen Effekte.

8.2. IKT, Wissen und Software

In der ökonomischen Literatur wird häufig eine enge Beziehung zwischen Wissen und der IKT unterstellt. Mokyr (2002b, S. 113) bezeichnet die IKT beispielweise als Wissenstechnologie. Greenhalgh und Rogers (2010, S. 154) sprechen von einer gewissen Nähe der IKT und im Speziellen von Software zu abstrakten Ideen und somit zu Wissen. Cortright (2001, S. 5) argumentiert, dass Software bzw. Computerprogramme so nahe an einer Idee sind, wie nur irgendwie vorstellbar.

Die IKT-Revolution wurde in vielen Fällen durch die Kombination von Hardware und Software ausgelöst. Hardware im Sinne von Computern hat primär die technische Basis bzw. Infrastruktur für die veränderten Rahmenbedingungen geschaffen. Software war jedoch die zentrale Triebkraft für die rasche Verbreitung der IKT und die unglaubliche Anpassungsfähigkeit der IKT. Die enorme Vielzahl an verfügbaren Computerprogrammen (inkl. Apps, Softwarepakete, etc.) machte sozusagen die Computertechnologie erst zur IKT im Sinne einer Wissenstechnologie. Durch diese Anpassungsfähigkeit hat sich die IKT im Laufe der Zeit zu einer Technologie entwickelt, die einerseits die Verbreitung neuer

Technologien begünstigt (Mokyr, 2002b, S. 113) und andererseits die Generierung von neuem Wissen sowie Technologien fördert. Die IKT geht sozusagen sehr leicht eine Symbiose mit anderen Technologien ein. Es ist somit die Kombination von Maschine (Hardware) und Programm (Software), die es zu verstehen gilt, wenn man die Phänomene der IKT begreifen möchte. Weder Hardware noch Software alleine haben die wirtschaftlichen Veränderungen bewirkt, die wir heute tagtäglich wahrnehmen. Software hat jedoch den größeren Beitrag geleistet. Dies ist mitunter auf die bereits angesprochene enge Beziehung zwischen Software und Wissen zurückzuführen.

Die gestiegene Bedeutung der IKT deutet auch auf eine wachsende Bedeutung einer bestimmten Art von Wissen hin. So gewinnt jenes Wissen an Bedeutung, welches leicht in eine algorithmische Form gebracht und damit kodifiziert werden kann (siehe auch Hanappi, 2008a). Dieses Wissen liegt im Wesentlichen jeder Technik und Technologie zu Grunde. Darüber hinaus forciert die IKT die Bedeutung dieses Wissens durch die binäre Repräsentation von Zusammenhängen der realen Welt mittels Computern in Form von Software.

In gewisser Art und Weise kann somit argumentiert werden, dass Software ein Beispiel für die Kodifizierung von Strukturen aus bestimmten Wissensbereichen ist. Bei genauer Betrachtung ist jedes Programm im Kern eine algorithmische Formulierung eines bestimmten Zusammenhangs der realen Welt. Dazu ist jedoch Wissen über diesen Zusammenhang notwendig. Sowie die menschliche Sprache mittels der Schrift bestimmte Zusammenhänge durch Symbole kodifizieren kann, so ist auch jede Programmiersprache in der Lage einen bestimmten Teil eines Wissensbereichs zu kodifizieren. Bei Programmiersprachen tritt allerdings der Aspekt der Struktur stärker in den Vordergrund. Wissen wird dabei im Detail in Bit-Strings transformiert (siehe auch Hanappi, 2008a, S. 13). Die Inputdaten werden dabei in den durch das Programm definierten Strukturen verarbeitet. Diese Strukturen können bis zu einem gewissen Grad als Wissensstrukturen interpretiert werden. Sie resultieren letztendlich aus dem fachlichen Problemverständnis des Entwicklers und seiner Beherrschung der Programmiersprache. Das Schreiben erfolgreiche Programme setzen in der Regel auch immer Wissen über den fachlichen Zusammenhang und Hintergrund voraus. Dies ist mitunter ein wichtiger Punkt, warum Software so eine enge Beziehung zu Wissen aufweist.

Die Beziehung von Software zu Technologien liegt somit nahe. Technologie ist Wissen und Computerprogramme stehen in sehr enger Beziehung zu diesem Wissen. Struktur spielt dabei eine zentrale Rolle und Wissen ist zu einem großen Teil Struktur und Ordnung. Eine strukturierte Beschreibung einer Problemstellung aus der realen Welt — beispielweise durch simple IF/ELSE/ENDIF-Anweisungen — ist üblicherweise der erste Schritt in der algorithmischen Formulierung eines Problems. Größere Computerprogramme repräsentieren im übertragenen Sinn in sich abgeschlossene Technologien, wobei die einzelnen Bestandteile (Methoden, Prozeduren, Klassen, etc.) mit Techniken bzw. deren Bestandteile verglichen werden können. Technologien sind letztendlich die Kombination unterschiedlicher Techniken. Eine Technik ist eine Instruktion um aus einem bestimmten Input einen bestimmten Output zu erzeugen. Programme repräsentieren Instruktionen, die aus Wissensstrukturen resultieren und produzieren letztendlich Informationen als Output. Diese Beziehung zwischen Wissen und Software ist ein wichtiger Baustein für das Verständnis der IKT und der durch sie ausgelösten ökonomischen Revolution. Durch diese Nähe von Software zu Wissen ist es der IKT in ihrer Gesamtheit möglich in alle Wissens- und somit Wirtschaftsbereiche einzudringen und ökonomischen sowie gesellschaftlichen Veränderungen hervorzurufen, die wir tagtäglich wahrnehmen.

Neben der Fähigkeit der IKT leicht Verbindungen mit anderen Technologien einzugehen ist ein weiterer Aspekt ausschlaggebend für den Erfolg der IKT. Newell und Simon (1976, S. 125 f.) argumentieren, dass Hardware in Kombination mit Software aus einfachen Maschinen

(Computern) Systeme der Symbolverarbeitung machen. Die Verarbeitung von Symbolen ist ein zentraler Bestandteil intelligenten menschlichen Verhaltens. Laut Newell und Simon liegt Intelligenz in physischen Systemen von Symbolen. Dabei spielen vor allem die Fähigkeit der Bezeichnung und der Interpretation eine entscheidende Rolle. Sowohl der Mensch als auch der Computer in ihrer heutigen Form repräsentieren Symbolsysteme und sind dazu fähig.

Für diese Arbeit ist diese Perspektive auf Computer und die Phänomene der IKT insbesondere dahingehend relevant, dass sie die Fähigkeit zur Rekombination von Symbolen für die Innovationsfähigkeit von ökonomischen Agenten unterstreicht. Diese Eigenschaft ist von zentraler Bedeutung für die Generierung neuen Wissens und neuer Technologien. Intelligentes Verhalten ist notwendig um neues Wissen zu schaffen und steht im engen Zusammenhang mit der Verarbeitung sowie Rekombination von Symbolen. Computer und Menschen sind beide dazu in der Lage. Dies ist mitunter ein Grund, warum die IKT so einen Einfluss hat. Sie unterstützt Menschen im intelligenten Verhalten. Dies hat jedoch Vor- und Nachteile. Eine immer größere Menge an Menschen ist nicht in der Lage die IKT für sich effizient zu nutzen, da ihnen die Strukturen dieser Systeme nicht verständlich sind. In der Folge sind viele nicht mehr Nutzer der IKT-Systeme, sondern werden Schritt für Schritt zu einfachen Empfängern von Ergebnissen dieser Systeme.

Dies kann auch in Bezug zu den nicht wirklich nachweisbaren Produktivitätseffekten der IKT gesetzt werden. Solow (1987, S. 36) wies bereits im Jahr 1987 darauf hin, dass positive Produktivitätseffekte der IKT in den Wirtschaftsstatistiken nicht klar belegbar sind. Dies hat sich mittlerweile gebessert (siehe beispielweise Welfens, 2002, S. 29), jedoch sind im Großen und Ganzen große Produktivitätsschübe vor allem in Europa nur für vereinzelte Länder nachweisbar. Europaweite Produktivitätsschübe sind noch immer schwer belegbar. Die IKT hält auf Grund ihrer Flexibilität in immer mehr Wirtschaftsbereichen und somit Wissensbereichen Einzug. Von der Arztpraxis bis hin zur Finanzberatung. Für jeden neuen Bereich entstehen fast täglich Innovationen im direkten oder indirekten Zusammenhang zur IKT, an die sich die ökonomischen Agenten gewöhnen und anpassen müssen. Dieser Anpassungsprozess bindet Ressourcen und kann auch zu Produktivitätseinbußen führen. Oftmals sind dies Softwarelösungen, die neue Anforderungen an die Informationsverarbeitung der Menschen stellen. Insbesondere die Menge an zu verarbeitenden Informationen überfordert dabei viele Menschen. In vielen Fällen fehlen das erforderlichen Wissen und insbesondere die erforderlichen Wissensstrukturen, um die Informationen beurteilen und korrekt verarbeiten zu können. Daraus resultieren oftmals falsche Modelle. In der Folge kann dies auch die Produktivität kurz und mittelfristig in den jeweiligen Bereichen schwächen. Letztendlich profitieren primär jene Sektoren, die die IKT-Innovationen generieren. Die zentrale Frage für die empirische Forschung ist daher, ob sich die Produktivitätsverluste und dadurch der geringere Output der einen Sektoren durch die Gewinne der anderen Sektoren auf gesamtwirtschaftlichen Ebenen ausgleichen.

Ein weiterer wichtiger Baustein für das Verständnis der Rolle der IKT und dem Zusammenhang zwischen Wissen, technologischem Fortschritt und Wachstum ist die Analyse der topologischen Struktur der IKT-Innovationen. Netzwerke sind in Bezug auf das Internet und das Mobiltelefon von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus sind Netzwerkstrukturen auch im ökonomischen Kontext sowie für die Beschreibung der Struktur von Wissen essentiell. Auf diese Zusammenhänge wird in den nächsten Kapiteln im Detail eingegangen.

8.3. Das Internet, das Mobiltelefon sowie die Rolle von Netzwerken in der IKT und Ökonomie

Das Internet und das Mobiltelefon (bzw. das Smartphone) sind zentrale technologische Innovationen, die als Synonym für den enormen Erfolg und die Verbreitung der IKT stehen. Beide Systeme repräsentieren mittlerweile auch ökonomische Institutionen. Dadurch bestimmen sie die Art und Weise, wie in einer Ökonomie Informationen ausgetauscht und verarbeitet werden. Des Weiteren haben sie auch die Verhaltensweisen der ökonomischen Agenten verändert. In der Folge haben sie den Prozess technologischen Fortschritts und ökonomischen Wachstums beeinflusst (Hanappi, 2008a, S. 7 ff.).

Beide Innovationen basieren direkt oder indirekt auf Netzwerkstrukturen. Das Internet ist wohl das bekannteste Beispiel für ein technologisches Netzwerk. Im Detail ist es ein Verbund unterschiedlicher Netzwerke, die gemeinsame Protokolle nutzen und einheitliche Dienste zur Verfügung stellen (Tanenbaum, 2003, S. 50). Das Mobiltelefon nutzt das Telefonnetz und immer stärker das Internet zur Kommunikation von Sprache und ist daher essentiell von Netzwerkstrukturen abhängig. Durch die Internettelefonie bzw. voice over IP (ibid., S. 685—692) sowie der steigenden Verbreitung von Smartphones wird das Internet und dessen Struktur auch im Bereich der Mobiltelefonie in Zukunft eine zentrale Rolle spielen.

Beide technologischen Systeme stehen im Zentrum der IKT-Revolution und haben unmittelbaren Einfluss auf den Austausch und die Verarbeitung von Informationen durch ökonomische Agenten sowie auf die Produktion und Akkumulation von Wissen. Daher sind sie auch von besonderem Interesse für die Analyse technologischen Fortschritts und Wachstums.

Aus der Sicht dieser Dissertation ist in erster Linie die Netzwerkstruktur dieser Systeme von Bedeutung und nicht die expliziten Protokolle und Algorithmen. Die Bedeutung von Netzwerkstrukturen ist in wissensbasierten Ökonomien prinzipiell sehr hoch, da diese bei der Verteilung und Verarbeitung von Informationen und letztendlich bei der Generierung von neuem Wissen eine tragende Rolle spielen. Barabási und Bonabeau (2003, S. 52) weisen beispielweise darauf hin, dass Netzwerkstrukturen in einer Vielzahl an Bereichen relevant sind. Komplexe Systeme wie das menschliche Gehirn, Straßenverbindungen, sexuelle Beziehungen aber auch die menschliche Sprache können als Netzwerke interpretiert werden. Die Analyse dieser Systeme mittels dieser Konzepte ermöglicht einen tiefen Einblick in deren Funktionsweise sowie Aufbau. Die Anzahl an Arbeiten über die Struktur und Dynamik von Netzwerken ist in den vergangenen Jahren rapide gewachsen (siehe beispielweise Newman et al., 2006), wobei wir nur langsam beginnen die Gesetzmäßigkeiten und die Anwendungsfälle zu verstehen (siehe z. B. Liljeros et al., 2001).

Sowohl das Internet als auch das Telefonnetz repräsentieren Netzwerke. Diese Eigenschaft teilen beide Institutionen mit Wissen. Wissen weist laut einigen Beiträgen eine Netzwerkstruktur auf (Hanappi, 2008a). Netzwerkstrukturen spielen somit sowohl in der IKT als auch in Bezug auf die Struktur von Wissen eine entscheidende Rolle.

In dieser Dissertation wird daher argumentiert, dass die Repräsentation von Wissen als Netzwerk durch die Agenten ein wichtiger Bestandteil im Verständnis der Produktion und Akkumulation von neuen Technologien ist. In der Folge ist dies auch ein wichtiger Baustein für das Verständnis des Wachstums (moderner) Ökonomien

Um ein besseres Verständnis dieser Perspektive zu gewährleisten, wird in der Folge auf die wichtigsten Eigenschaften von Netzwerken aus theoretischer Sicht eingegangen. Aus theoretischer Perspektive sind vor allem die sogenannten Zufallsnetze und skalenfreien Netze relevant. Diese theoretischen Konzepte werden im Detail beleuchtet. Darauf aufbauend werden das Internet und das Mobiltelefon als Anwendungsfälle diskutiert.

Das Ziel der folgenden Kapitel ist nicht eine umfassende Einführung in die Thematik zu geben, sondern die wichtigsten Konzepte, die speziell für das Verständnis dieser Arbeit relevant sind, in kurzer und kompakter Form auf Basis zentraler Beiträge darzustellen. Darüber hinaus soll das Verständnis für Netzwerktheorie und ihre Rolle in Bezug auf den Zusammenhang zwischen Wissen, technologischem Fortschritt und ökonomischem Wachstum geschaffen werden.

Eine nicht technische Einführung in die Thematik ist beispielweise in Barabási und Bonabeau (2003) zu finden. Technische Einführungen sind beispielweise Albert und Barabási (2001) sowie Newman (2010).

8.3.1. Einige formale Eigenschaften von Netzwerken

Allgemein können Netzwerke als Graphen repräsentiert werden. Ein Graph $G(V_i, E_i)$ besteht aus einer Menge an Knoten V_i und Kanten E_i . Die Repräsentation eines Netzwerkes als Graph erfordert die Interpretation der Knoten und Kanten in passender Weise. Beispielweise können die Knoten für Internetseiten und Kanten für Links zwischen den Internetseiten stehen. Anzumerken ist, dass die Interpretation einer Problemstellung als Graph bzw. als Netzwerk ein sehr abstraktes Konzept ist — darin liegt aber auch seine Stärke.

Newman (2010, S. 109—167 und S. 235—274) beschreibt die formale Repräsentation von Netzwerken im Detail. In der Folge wird auf die wichtigsten Konzepte zur Analyse von Netzwerken in kompakter Form eingegangen. Dabei steht die Gradverteilung im Vordergrund. Darauf aufbauend werden Zufallsnetze und skalenfreie Netze näher erläutert, da diese Netzwerkmodelle bei der Klassifizierung realer Netzwerke eine entscheidende Rolle spielen.

In Abhängigkeit von der Struktur der Verbindungen können Netzwerke als gerichtete oder ungerichtete Graphen dargestellt werden. Ein Graph besteht prinzipiell aus n Knoten und m Kanten. Kanten in ungerichteten Graphen können beispielsweise mittels einer Adjazenzmatrix A_{ij} dargestellt werden, die die Werte 1 und 0 enthält. 1 steht dabei für die Existenz einer Kante zwischen Knoten i und j . In der Folge werden nur ungerichtete Graphen betrachtet.

Im Rahmen der Analyse von Netzwerken sind insbesondere der *Grad* der Knoten sowie die *Gradverteilung* von Interesse. Eine formale Analyse dieser Maßzahlen hat auch wichtige Implikationen für die Einteilung von Netzwerken in unterschiedliche Klassen.

Der Grad k eines Knoten steht für die Anzahl an Kanten, die mit dem Knoten verbunden sind (Newman, 2010, S. 133). Nachfolgend bezeichnet k_i den Grad des Knoten i . Eine wichtige Relation in diesem Zusammenhang ist folgende. In einem ungerichteten Graphen hat jede Kante prinzipiell zwei Enden. Somit folgt, dass in einem ungerichteten Graphen mit m Kanten in Summe $2m$ Enden existieren. Die Gesamtsumme an Enden entspricht jedoch auch der Summe an Graden aller Knoten im Graphen (Newman, *ibid.*, S. 133 f.).

$$2m = \sum_{i=1}^n k_i \quad (15)$$

Eine triviale Umformung zeigt des Weiteren $m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n k_i$.

Ein weiteres wichtiges Maß ist die Gradverteilung. Fortfolgend bezeichnet p_k den Anteil an Knoten im Netzwerk, die Grad k aufweisen. Somit ist p_k das Verhältnis zwischen der Anzahl an Knoten mit Grad k und der Gesamtanzahl an Knoten.

$$p_k = \frac{\text{Anzahl an Knoten mit Grad } k}{\text{Gesamtanzahl an Knoten}} \quad (16)$$

Die einzelnen Werte p_k repräsentieren somit eine Gradverteilung, da die Werte auch statistisch interpretiert werden können. Die Werte p_k können nämlich als Wahrscheinlichkeit aufgefasst werden, dass ein beliebig gewählter Knoten des Netzwerkes den Grad k besitzt und stehen damit für eine statistische Verteilung der Grade (Newman, 2010, S. 244). Üblicherweise wird daher die Gradverteilung meist direkt als Wahrscheinlichkeitsverteilung interpretiert.

Häufig gibt die graphische Analyse der Gradverteilung einen wichtigen Einblick in die Struktur des betrachteten Netzwerkes. Zu diesem Zweck wird die Gradverteilung p_k als Funktion des Grades k geplottet. Auf der Abszisse wird der Grad k und auf der Ordinate die

Zahl der Knoten im Netzwerk mit Grad k dargestellt. Beide Achsen repräsentieren dabei üblicherweise logarithmische Einheiten. Durch diesen Ansatz wird die grafische Analyse der Gradverteilung des jeweiligen Netzwerkes möglich.

Unterschiedliche Arbeiten für eine Reihe an biologischen, sozialen und technologischen Netzwerken haben gezeigt, dass dessen Gradverteilung bzw. der Logarithmus der Gradverteilung im Wesentlichen eine lineare Funktion des Grades ist. Dies impliziert, dass die Gradverteilung einem Potenzgesetz folgt (Albert und Barabási, 2001, S. 5; Newman et al., 2006, S. 172; Barabási und Bonabeau, 2003, S. 52 sowie Caldarelli, 2007, S. 70 ff.).

Gemäß Newman (2010, S. 247, in veränderter Darstellung und Notation) besteht somit die folgende Beziehung zwischen den Logarithmen der Gradverteilung und dem Grad, wobei c_1 und c_2 Konstanten repräsentieren.

$$\ln p_k = c_1 \ln k + c_2 \quad (17)$$

Berücksichtigt man nun folgende alternative Darstellung

$$\ln p_k = \ln k^{c_1} + c_2 = \ln k^{c_1} + \ln e^{c_2} = \ln(k^{c_1} e^{c_2}). \quad (18)$$

und wendet auf beiden Seiten die Exponentialfunktion an, so erhält man letztendlich

$$p_k = e^{c_2} k^{c_1}. \quad (19)$$

Dabei repräsentiert e^{c_2} eine Konstante (das heißt $C = e^{c_2}$), die in der Regel nicht im Zentrum des Interesses bei der Analyse des jeweiligen Netzwerkes steht. Hingegen ist der Exponent c_1 in der Beziehung

$$p_k = C k^{c_1}. \quad (20)$$

von großem Interesse und verdeutlicht auch die Aussage, dass die Gradverteilung einem Potenzgesetz folgt. Da p_k als Funktion von k zur Potenz c_1 ausgedrückt werden kann, unterliegt diese Beziehung einem Potenzgesetz (siehe hierzu auch Caldarelli, 2007, S. 70). Anzumerken ist, dass der Exponent c_1 in der Beziehung prinzipiell auch negativ sein kann, wodurch ein negativer Anstieg des zugehörigen Graphen resultiert. Analysen unterschiedlichster realer Netzwerke haben gezeigt, dass der Exponent üblicherweise zwischen 2 und 3 liegt, das heißt $2 \leq c_1 \leq 3$ (Newman et al., 2006, S. 335 f.; Newman, 2010, S. 248).

Da die Gradverteilung — wie bereits erläutert — auch als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden kann, wird diese Beziehung häufig wie folgt formuliert.

$$P(k) \propto k^{-c_1} \quad (21)$$

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Grades $P(k)$ ist somit proportional zu einer Potenzgesetzbeziehung.

Hierbei muss erwähnt werden, dass auch Kritik an der starken Konzentration auf Potenzgesetze innerhalb der Netzwerktheorie geübt wird. Keller (2005, S. 1060) kommt zu dem Schluss, dass diese Art der Verteilung nicht wirklich ein spezielles und allgemeines Gesetz von unterschiedlichen Systemen ist. Laut Keller liegt die wirklich Überraschung darin, dass derartige Gradverteilungen einfach und durch eine Vielzahl von Mechanismen generiert werden können.

Die beschriebenen Grundlagen spielen eine wichtige Rolle in der Analyse und Klassifizierung von Netzwerken. Die Netzwerktheorie wird im Wesentlichen von zwei Modellklassen bestimmt. Auf der einen Seite steht die Klasse der Zufallsnetze und auf der anderen Seite die Klasse skalenfreier Netzen (siehe beispielsweise Albert und Barabási, 2001 oder Caldarelli, 2007). Auf beide Klassen bzw. Theorien wird im nächsten Kapitel näher eingegangen.

Abschließend ist noch anzumerken, dass in den vergangenen Jahren auch sogenannte Small-World Netze an Bedeutung gewonnen haben. Diese Art von Netzwerk weist Eigenschaften aus beiden zuvor genannten Klassen auf und geht im Wesentlichen auf die Arbeit von Watts und Strogatz (1998) zurück. Die Analyse der Beziehungsstruktur von Schülern oder Freundschaften in sozialen Netzwerken zeigte, dass diese sich durch diese Netzwerkart beschreiben lassen. Hierbei wird jedoch nicht näher auf diese Klasse eingegangen. Weitere Details zu Small-World Netzen sind beispielsweise in Newman (2010, S. 54—58) sowie Albert und Barabási (2001, S. 23—26) zu finden.

8.3.2. Zufallsnetze und skalenfreie Netze

Die Netzwerktheorie wird im Wesentlichen von zwei Strömungen dominiert. Auf der einen Seite steht die Theorie über Zufallsgraphen und auf der anderen Seite die Theorie über skalenfreie Graphen. Im Mittelpunkt dieser Strömungen stehen Modelle zur Generierung von Graphen mit bestimmten Eigenschaften. Die damit generierten Graphen werden zur Beschreibung realer Netzwerke verwendet. Die Analyse der Struktur und Dynamik der resultierenden Graphen trägt in der Folge zu einem besseren Verständnis der realen Netzwerke bei. Die Modelle der erst genannten Strömung generieren sogenannte *Zufallsnetze* und die Modelle der zweiten Strömung produzieren sogenannte *skalenfreie Netze*.

Die Klassifizierung realer Netzwerke als Zufallsnetze oder skalenfreie Netze ist von zentraler Bedeutung für das Verständnis der Eigenschaften und Strukturen dieser Netzwerke.

Hierbei muss darauf hingewiesen werden, dass die Theorie über Zufallsnetze zwar Basis für eine Vielzahl an Arbeiten ist, jedoch kann sie in vielen Fällen die analysierten Netzwerke aus der Praxis nicht zufriedenstellend beschreiben. Der Großteil an jüngeren Arbeiten zeigt, dass reale Netzwerke häufig besser mit Hilfe der Modelle aus dem Bereich der skalenfreien Netze repräsentiert und beschrieben werden können. Dies gilt sowohl für technologische als auch für ökonomische Netzwerke. In der Folge wird auf beide Theorien näher eingegangen, wobei der Fokus auf der Gegenüberstellung beider Netzwerkmodelle und ihren Anwendungsbeispielen in der Praxis liegt.

Das Konzept der Zufallsnetze steht im engen Zusammenhang zu der Arbeit von Erdős und Rényi (1960). Ihre Arbeiten stellen zentrale Beiträge in der Netzwerktheorie dar. Ähnliche Ideen bzw. Konzepte lassen sich allerdings weiter zurückverfolgen (siehe hierzu Newman, 2010, S. 400). Das ursprüngliche Ziel ihrer Arbeit bestand darin, ein Modell zur Beschreibung von Kommunikationsnetzwerken und biologischen Netzwerken zu konstruieren. Auf Grund ihrer eleganten Modellierung sowie ihres präzisen statistischen Ansatzes zur Beschreibung dieser Netzwerke prägten sie für Jahrzehnte massiv die Netzwerktheorie und sorgten dabei indirekt auch für eine Wiederbelebung des Interesses an der Graphentheorie. Sie begründeten sozusagen die Theorie der Zufallsgraphen. Da Zufallsnetze (wie üblich) als Graphen repräsentiert werden, werden diese Netze auch als Zufallsgraphen bezeichnet.

Wie Barabási und Bonabeau (2003, S. 52) erläutern, besteht der Grundgedanke bei der Generierung von Zufallsnetzen darin, dass Kanten zufällig zwischen den Knoten des zugehörigen Graphen erzeugt werden. Verbindungen zwischen den Knoten entstehen somit zufällig. Obwohl die Entstehung von Verbindungen in diesen Netzwerken durch den Zufall

bestimmt wird, sind die daraus resultierende Systeme keineswegs willkürliche oder zufällig. Zufallsnetze sind sogar extrem demokratische Systeme in dem Sinn, dass der Grad jedes Knoten im Netzwerk im Durchschnitt gleich ist (Barabási und Bonabeau, 2003)

Ein Zufallsnetz kann auf zwei äquivalente Arten definiert werden (Albert und Barabási, 2001, S. 9; Caldarelli, 2007, S. 105). Entweder als Zufallsgraph oder als Binomialmodell. In der Folge wird primär auf die erste Variante im Sinne von Erdős und Rényi (1960) eingegangen.

Ein Zufallsgraph im Sinne von Erdős und Rényi (1960) ist ein Graph mit N Knoten, die über n Kanten verbunden sind. Dabei werden die n Kanten aus der Gesamtmenge der möglichen Kanten $N(N-1)/2$ per Zufall ausgewählt. In Summe ergibt dies $\binom{N(N-1)}{2}$ mögliche Graphen mit

N Knoten und n Kanten, die in Bezug auf die Entstehung alle gleich wahrscheinlich sind.

Zufallsnetze weisen einige interessante Eigenschaften auf. Ein zentrales Merkmal ist ihre Gradverteilung. Ihre Gradverteilung ist durch eine Binomialverteilung gegeben, die bekanntlich durch eine Poissonverteilung approximiert werden kann.

Albert und Barabási (2001, S. 9–13) sowie Caldarelli (2007, S. 106 ff.) erläutern dies im Detail wie folgt. In einem Zufallsgraphen entstehen Verbindungen zwischen den Knoten zufällig. Um in einem solchen Modell einen Knoten mit Grad k zu generieren, müssen k Versuche eine Kante zu generieren mit Wahrscheinlichkeit p erfolgreich sein und $(N-1-k)$ Versuche mit Wahrscheinlichkeit $(1-p)$ scheitern. Aus kombinatorischer Sicht ist dies genau $\binom{N-1}{k}$ Male möglich, das heißt $\binom{N-1}{k} = \frac{(N-1)!}{(N-1-k)!k!}$. Für die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Grades $P(k)$ folgt somit

$$P(k) = \binom{N-1}{k} p^k (1-p)^{N-1-k}. \quad (22)$$

Im Detail repräsentiert $P(k)$ die Anzahl an möglichen Varianten, wie k Kanten eines Knoten generiert werden können. Dabei ist p^k die Wahrscheinlichkeit, dass k Kanten existieren und $(1-p)^{N-1-k}$ steht für die Wahrscheinlichkeit, dass keine weiteren Kanten vorhanden sind. Da k eine ganze Zahl repräsentiert, ist die resultierende Gradverteilung diskret.

Berücksichtigt man nun Gleichung (15), die besagt, dass die Gesamtanzahl der Grade $2m$ entspricht (siehe Kapitel 8.3.1), dann gilt für den *durchschnittlichen Grad* in einem Netzwerk mit N Knoten und m Kanten.

$$\langle k \rangle = \frac{2m}{N}. \quad (23)$$

Berücksichtigt man nun, dass $\langle k \rangle \simeq pN$ und lässt $N \rightarrow \infty$ und $p \rightarrow 0$ konvergieren, so kann die obige Binomialverteilungen mit folgender Poissonverteilungen approximiert werden (Albert und Barabási, 2001; Caldarelli, 2007).

$$P(k) = \binom{N-1}{k} p^k (1-p)^{N-1-k} \simeq \frac{(pN)^k e^{-pN}}{k!} = \frac{\langle k \rangle^k e^{-\langle k \rangle}}{k!} \quad (24)$$

Eine zentrale (jedoch unerwartete) Eigenschaft eines Zufallsnetzes ist, dass — obwohl die Kanten zufällig positioniert werden — der Grad des Großteils an Knoten im Netzwerk gleich ist. Mit anderen Worten, die Mehrheit aller Knoten in einem Zufallsnetz weist die gleiche Anzahl an Kanten auf. Albert und Barabási (2001, S. 13) bezeichnen aus diesem Grund Zufallsnetze auch als unerwartet homogene Systeme.

Es stellt sich nun die Frage, welche Netzwerke in der realen Welt durch Zufallsnetze beschrieben werden können. Diese Frage führt zum größten Kritikpunkt am Konzept der Zufallsnetze. Die realen Anwendungsfälle dieses theoretischen Modells sind begrenzt.

Caldarelli (2007, S. 105) führt beispielweise ein statisches Telefonnetz an, bei dem die Anzahl an Haushalten (Knoten) im Vorhinein fix definiert ist und die Verbindungen zwischen den Haushalten (Kanten) errichtet werden müssen. Im Gegensatz dazu kann beispielsweise das Internet nicht zufriedenstellend mit Hilfe der Zufallsnetze beschrieben werden (Barabási und Albert, 1999).

Die häufige Verwendung von Zufallsnetzen in theoretischen Arbeiten trotz beschränkter empirischer Relevanz ist höchstwahrscheinlich auch darauf zurückzuführen, dass zum Zeitpunkt der Entwicklung des Modells von Erdős und Rényi (1960) die Verfügbarkeit von Daten zur Überprüfung des Modells am Beispiel realer Netzwerke stark eingeschränkt war. Nichtsdestotrotz repräsentieren Zufallsnetze einen zentralen Baustein der Netzwerktheorie.

Die limitierten Anwendungsfälle von Zufallsnetzen führen in den Bereich der skalenfreien Netze. Eine Vielzahl an empirischen und theoretischen Studien zeigt, dass eine große Anzahl an realen Netzwerken durch die Theorie der skalenfreien Netze beschrieben werden kann. Beispiele hierfür sind das Internet, soziale Netzwerke sowie die menschliche Sprache. Diese Netze unterscheiden sich an einigen Punkten diametral von Zufallsnetzen. Der wahrscheinlich bedeutendste Unterschied im Vergleich zu Zufallsnetzen besteht darin, dass die Verteilung der Grade einem Potenzgesetz folgt (siehe Kapitel 8.3.1), das heißt es gilt $P(k) \propto k^{-c_1}$. Diese Eigenschaft ist charakteristisch für technologische Netzwerke aus dem Bereich der IKT. Barabási und Bonabeau (2003, S. 53) argumentieren in diesem Zusammenhang, dass Potenzgesetze vorrangig Systeme beschreiben, in denen wenige Knoten, wie z. B. Google oder Yahoo, dominieren. Mit anderen Worten, Netzwerke der IKT-Welt werden häufig durch Potenzgesetze bestimmt und können deshalb oftmals durch skalenfreie Netze repräsentiert werden.

Hierbei gilt es darauf hinzuweisen, dass die IKT wie erläutert eine Art Wissenstechnologie repräsentiert und skalenfreie Netze daher auch mit hoher Wahrscheinlichkeit in Bezug auf die Struktur von Wissen relevant sind. Dass das Internet als Wissensspeicher genutzt und verstanden wird, ist hierfür nur ein Indiz.

Ein zentraler Unterschied skalenfreier Netzwerke zu Zufallsnetze ist der bereits oben angeklungene extrem hohe Grad bestimmter Knoten und die Rolle dieser Knoten im Netzwerk. Zur Erinnerung: In Zufallsnetzen sind Knoten mit einem Grad der deutlich höher ist, als der durchschnittliche Grad aller Knoten auf Grund der statistischen Gesetzmäßigkeiten des zu Grunde liegenden Modells statistisch sehr unwahrscheinlich bzw. nicht möglich. In skalenfreien Netzen ist diese Situation jedoch durchaus möglich. Im Detail existieren dort in der Regel bestimmte Knoten, die im Vergleich zu den anderen Knoten eine extrem hohe Anzahl an Verbindungen aufweisen. Solche Knoten werden üblicherweise (vor allem im IKT-Kontext) als *Hubs* bezeichnet.

Es stellt sich nun die Frage, durch welches theoretische Modell skalenfreie Netzwerke generiert werden können. In Bezug auf diese Frage hilft zunächst eine kurze Analyse der theoretischen Schwachstellen von Zufallsgraphen. Wie Barabási und Albert (1999, S. 510) erläutern, ist eines der größten Probleme am Modell der Zufallsgraphen von Erdős und Rényi (1960) jenes, dass die Anzahl der Knoten des zu repräsentierenden Netzwerkes im Vorhinein bereits feststeht. Die Anzahl an Knoten ist somit fixiert und das Wachstum des Netzwerkes ist dadurch ausgeschlossen. Wachstum ist jedoch ein natürliches Phänomen in der Realität. Beispiele hierfür gibt es viele. Täglich treten neue Personen einem sozialen Netzwerk bei oder jeden Tag existieren neue Seiten im Internet. Mit anderen Worten, Netzwerke sind dynamische Systeme, die wachsen.

Ein weiteres Problem am Modell der Zufallsgraphen besteht darin, dass das Entstehen von Kanten für jeden Knoten gleich wahrscheinlich ist. Trotz des zufälligen Entstehens von neuen Verbindungen zwischen Knoten, entstehen diese mit gleicher Wahrscheinlichkeit zwischen

allen Knoten. Daraus resultiert auch die homogene Struktur von Zufallsnetzen. In der Praxis kann jedoch ein gewisser Trend in Bezug auf die Entstehung von neuen Verbindungen in vielen realen Netzwerken beobachtet werden. Tendenziell entstehen neue Kanten bei jenen Knoten, die bereits einen hohen Grad aufweisen, das heißt bei jenen Knoten, die bereits über viele Verbindungen verfügen. Auch hierfür gibt es etliche Beispiele mit einer großen Bandbreite. Zentrale Internetknotenpunkte verzeichnen tendenziell ein höheres Wachstum an neuen Verbindungen. Häufig zitierte wissenschaftliche Arbeiten werden tendenziell immer häufiger zitiert (siehe z. B. de Solla Price, 1965).

Sowohl Wachstum als auch das tendenzielle Entstehen von Kanten bei Knoten mit einem hohen Grad sind häufig empirisch beobachtbare Phänomene. Beide Problempunkte erklären daher auch bis zu einem gewissen Grad die relativ schwache Anwendbarkeit dieses Modells in der Praxis.

Ein Modell zur Generierung von Graphen, welches einerseits den genannten Schwachpunkten von Zufallsgraphen entgegenwirkt und andererseits in der Lage ist, die für skalenfreie Netzwerke charakteristischen Gradverteilungen zu erzeugen, wurde von Barabási und Albert (1999) vorgestellt (siehe hierzu auch Albert und Barabási, 2001, S. 27—32). Ihr Modell basiert dabei auf den Mechanismen Wachstum und Preferential Attachment. Der Mechanismus Wachstum bezieht sich auf den ersten oben diskutierten Problempunkt und bedeutet, dass zu einem Netzwerk kontinuierlich neue Knoten hinzukommen. Im Rahmen dieses Modells bedeutet dies, dass pro Zeitschritt genau ein neuer Knoten im Netzwerk entsteht und Verbindungen mit anderen Knoten eingeht. Das sogenannte Preferential Attachment bezieht sich auf den zweiten diskutierten Problempunkt und bedeutet, dass neue Knoten tendenziell häufiger Verbindungen mit existierenden Knoten eingehen, die bereits über eine hohe Anzahl an Verbindungen verfügen. Die Berücksichtigung dieser Mechanismen ermöglicht auf einfache und elegante Weise die Generierung einer Gradverteilung, die einem Potenzgesetz folgt. Nachfolgend wird auf die zentralen Elemente dieses Modells im Detail eingegangen.

Zunächst ist anzumerken, dass die dynamischen Aspekte eines Netzwerkes prinzipiell mit zwei unterschiedlichen Ansätzen modelliert werden können. In der Literatur sind diese Ansätze als Continuum Theorie und Master Equation Ansatz bekannt (Albert und Barabási, 2001, S. 28).

Barabási und Albert (1999, S. 511) folgen in ihrer ursprünglichen Publikation der Continuum Theorie und modellieren Wachstum im Rahmen dieses Ansatzes folgendermaßen (siehe hierzu auch Albert und Barabási, 2001, S. 28 f. sowie Newman et al., 2006, S. 336 f.). Am Beginn des Wachstumsprozesse, das heißt zum Zeitpunkt t_0 , existieren im Netzwerk m_0 Knoten. In jedem Zeitschritt wird genau ein neuer Knoten dem Netzwerk hinzugefügt. Dieser Knoten verfügt über m Kanten, die den neuen Knoten mit m bereits existierenden Knoten verbinden. Dabei handelt es sich stets um unterschiedliche Knoten. Jeder neu entstandene Knoten verfügt somit direkt nach seinem Auftreten im Netzwerk über m Kanten, das heißt die Initialbedingung für jeden neuen Knoten lautet $k_i(t_i) = m$. Die Variable t_i bezeichnet dabei den Zeitpunkt zu dem der neue Knoten entsteht.

Preferential Attachment bzw. die Tendenz neuer Knoten vorrangig Verbindungen mit bereits existierenden Knoten mit einem hohen Grad einzugehen, wird über die Verbindungswahrscheinlichkeit Π modelliert. Π steht somit für die Wahrscheinlichkeit, dass ein neuer Knoten eine Verbindung zu einem bereits existierenden Knoten i eingeht. Diese hängt vom Grad k_i des bereits existierenden Knoten ab. Im Detail gilt laut Albert und Barabási (2001, S. 28)

$$\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j}. \quad (25)$$

Immer wenn ein neuer Knoten im Netzwerk entsteht und dieser eine Verbindung mit Wahrscheinlichkeit $\Pi(k_i)$ generiert, steigt der Grad k_i des betroffenen Knoten i . Dieser Algorithmus produziert nach t Schritten ein Netzwerk, welches über $N = t + m_0$ Knoten und mt Kanten verfügt. Nach jedem Zeitschritt sind somit immer m neue Kanten hinzugekommen. Es existiert daher eine Zeitabhängigkeit des Grades eines bereits existierenden Knotens. Die Veränderungsrate von k_i ist annahmegemäß proportional zu $\Pi(k_i)$. Die Veränderung von k_i über die Zeit hinweg kann daher beispielsweise laut Newman et al. (2006, S. 336) oder Albert und Barabási (2001, S. 28) durch nachfolgende Differentialgleichung beschrieben werden.

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m\Pi(k_i) \quad (26)$$

Berücksichtigt man beispielsweise gemäß Newman et al. (2006, S. 336) oder Barabási et al. (2012, Folie 14) nun $\sum_j k_j = 2mt$ [siehe hierzu auch Gleichung (15) aus Kapitel 8.3.1], dann folgt nach Substitution in die vorangegangene Gleichung

$$\frac{\partial k_i}{\partial t} = m \frac{k_i}{2mt} = \frac{k_i}{2t} \quad (27)$$

Die Veränderung des Grades k_i eines Knoten i wird somit durch die Gleichung $\frac{\partial k_i}{\partial t} = \frac{k_i}{2t}$ beschrieben und spiegelt den Grundgedanken des Preferential Attachment wider. Der Grad jener Knoten, die bereits über mehr Verbindungen als andere Knoten im Netzwerk verfügen, wächst mit zunehmender Zeit stärker, als der Grad der schwächer verbundenen Knoten. Knoten mit vielen Verbindungen können im Zeitablauf somit immer mehr Verbindungen „erwirtschaften“. Barabási und Albert (1999, S. 511) bezeichnen diesen Effekt sprechend als das „the rich-get-richer“-Phänomen.

Die Lösung für diese Differentialgleichung ist laut Barabási et al. (2012, Folie 14), Newman et al. (2006, S. 336) sowie Barabási und Albert (1999, S. 511) durch

$$k_i(t) = m \left(\frac{t}{t_i} \right)^\beta, \beta = \frac{1}{2} \quad (28)$$

gegeben, wobei die Initialbedingung $k_i(t_i) = m$ berücksichtigt wurde. β wird dabei als dynamischer Exponent bezeichnet (siehe auch Albert und Barabási, 2001, S. 28).

Für den Beweis dieser Aussage folge ich Zambonelli (2005, Folie 32) sowie Barabási et al. (2012, Folie 14), jedoch in detaillierter Ausführung unter Berücksichtigung von $\beta = \frac{1}{2}$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \left[m \left(\frac{t}{t_i} \right)^\beta \right]}{\partial t} &= \beta m \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\beta-1} \frac{1}{t_i} = \beta m \left(\frac{t}{t_i} \right)^\beta \left(\frac{t}{t_i} \right)^{-1} \frac{1}{t_i} \\ &= \frac{1}{2} m \left(\frac{t}{t_i} \right)^\beta \frac{1}{t} = \frac{1}{2t} k_i(t) \end{aligned} \quad (29)$$

Die Lösung der Differentialgleichung zeigt, dass der Grad aller Knoten im Netzwerk einem Potenzgesetz folgt (Zambonelli, 2005; Barabási et al., 2012).

Unter Berücksichtigung der Annahme, dass alle neuen Knoten in gleichen Zeitintervallen dem Netzwerk hinzugefügt werden und dadurch alle t_i eine konstante Dichtefunktion aufweisen, kann in der Folge gezeigt werden, dass die Gradverteilung durch die Funktion

$$P(k) = 2m^2k^{-3} \quad (30)$$

gegeben ist. Dabei ist zu beachten, dass diese Verteilung der Grade unabhängig von m ist. Dies kann wie folgt in Anlehnung an Zambonelli (2005, Folie 33—36) sowie Albert und Barabási (2001, S. 28 f.) gezeigt werden, wobei hier eine etwas detaillierte Ableitung präsentiert wird (siehe auch Caldarelli, 2007, S. 114).

Für den Beweis von Gleichung (30) muss laut Zambonelli (2005) und Albert und Barabási (2001) zunächst die Wahrscheinlichkeit, dass ein Knoten einen geringeren Grad als k aufweist, errechnet werden. Diese Wahrscheinlichkeit ist durch $P[k_i(t) < k]$ gegeben und kann auch wie folgt dargestellt werden.

$$\begin{aligned} P\left[m\left(\frac{t}{t_i}\right)^\beta < k\right] &= P\left[m^{1/\beta}\left(\frac{t}{t_i}\right) < k^{1/\beta}\right] = P\left[m^{1/\beta}t\frac{1}{t_i} < k^{1/\beta}\right] \\ &= P\left[\frac{1}{m^{1/\beta}t}t_i > \frac{1}{k^{1/\beta}}\right] = P\left[t_i > \frac{m^{1/\beta}t}{k^{1/\beta}}\right] \end{aligned} \quad (31)$$

Berücksichtigt man nun, dass alle t_i die gleiche konstante Dichtefunktion aufweisen, so gilt für die Wahrscheinlichkeit, dass ein Knoten i zum Zeitpunkt t_i dem Netzwerk beitrifft

$$P(t_i) = \frac{1}{(m_0 + t)}. \quad (32)$$

Dies ist ein Resultat aus der Annahme, dass alle neuen Knoten in gleichen Zeitabständen dem Netzwerk beitreten.

Berücksichtigt man nun laut Zambonelli (2005) sowie Albert und Barabási (2001) des Weiteren

$$P\left[t_i > \frac{m^{1/\beta}t}{k^{1/\beta}}\right] = 1 - P\left[t_i \leq \frac{m^{1/\beta}t}{k^{1/\beta}}\right] \quad (33)$$

und berücksichtigt Gleichung (32) in (33), so folgt

$$P\left[t_i > \frac{m^{1/\beta}t}{k^{1/\beta}}\right] = 1 - \frac{m^{1/\beta}t}{k^{1/\beta}} \frac{1}{(m_0 + t)} = 1 - \frac{m^{1/\beta}t}{k^{1/\beta}(m_0 + t)}. \quad (34)$$

Die Gradverteilung für das durch dieses Modell generierte skalenfreie Netzwerk ist in der Folge durch die partielle Ableitung von $P[k_i(t) < k]$ nach k gegeben. Im Detail gilt in eigener Darstellung laut Zambonelli (2005) sowie Albert und Barabási (2001)

$$\begin{aligned}
\frac{\partial P[k_i(t) < k]}{\partial k} &= \frac{\partial \left[1 - \frac{m^{1/\beta} t}{k^{1/\beta} (m_0 + t)} \right]}{\partial k} & (35) \\
&= m^{1/\beta} t [k^{1/\beta} (m_0 + t)]^{-2} \frac{1}{\beta} k^{(1/\beta)-1} (m_0 + t) \\
&= \frac{1}{\beta} m^{1/\beta} t \frac{1}{[k^{1/\beta} (m_0 + t)]^2} k^{(1/\beta)} (m_0 + t) k^{-1} \\
&= 2m^{1/\beta} t \frac{1}{k^{1/\beta} (m_0 + t)} \frac{1}{k} = \frac{2m^{1/\beta} t}{(m_0 + t)} \frac{1}{k^{(1/\beta)+1}}.
\end{aligned}$$

Berücksichtigt man nun $t \rightarrow \infty$ und $\beta = \frac{1}{2}$ sowie $\gamma = \frac{1}{\beta} + 1 = 3$, dann kann dieses Ergebnis durch

$$\frac{\partial P[k_i(t) < k]}{\partial k} = 2m^{1/\beta} k^{-\gamma} \quad (36)$$

approximiert werden und erklärt Gleichung (30) [Zambonelli (2005), Albert und Barabási (2001)].

Ein Modell auf Basis der beiden Mechanismen Wachstum und Preferential Attachment ist somit in der Lage, die in der Praxis häufig anzutreffenden Netzwerke mit skalenfreier Struktur zu produzieren.

Das Modell wurde teilweise in Bezug auf den fixen Exponenten $\gamma = 3$ kritisiert, da dieser unabhängig von den Parametern des Modells ist und in der Folge nicht variiert werden kann (Newman et al., 2006, S. 337). Die Ergebnisse diverser empirischer Studien für unterschiedliche reale Netzwerke ergaben jedoch Werte für die Exponenten in einer Bandbreite zwischen 2,1 und 4, wodurch das Modell nicht angewendet werden konnte. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass Barabási und Albert bereits in ihrer Originalpublikation (1999, S. 511) auf dieses Problem hingewiesen haben und dabei auf mögliche Modifikationen des Modells aufmerksam gemacht haben.

Im Laufe der Zeit wurden immer mehr komplexe Systeme identifiziert, die sich gut durch skalenfreie Netze beschreiben lassen. Beispiele können in biologischen, technologischen, sozialen sowie ökonomischen Netzwerken gefunden werden. Die Bandbreite ist sehr groß. Im Detail zählen dazu unter anderem metabolische Netze, Proteinnetze sowie Co-Autor-Beziehungen von Wissenschaftlern (siehe z. B. Barabási und Bonabeau, 2003, S. 54). Die Analyse der menschlichen Sprache im Sinne linguistischer Netze brachten ebenfalls skalenfreie Strukturen zum Vorschein. Bei ökonomischen Netzen — beispielweise im Bereich der Finanzmärkte — verhielt es sich ähnlich (Caldarelli, 2007, S. 231—248).

Im Bereich der technologischen Netzwerke ist das Internet allerdings das bekannteste Beispiel für ein Netz mit skalenfreier Struktur. Studien in Bezug auf das Internet zeigten, dass — gemessen an der Gesamtanzahl — im Wesentlichen wenige Knoten das gesamte Internet „zusammenhalten“. Die Gradverteilung folgt dabei einem Potenzgesetz. Dies ist aus mehreren Gründen interessant. Einerseits wurde diese Struktur von vielen im Vorfeld der ersten Studien nicht erwartet und andererseits war diese Struktur von den geistigen Vätern des Internets nicht so geplant (Barabási und Bonabeau, 2003, S. 52).

Hierbei ist ein weiterer Punkt anzumerken. Obwohl sich das Telefonnetz eher als Zufallsnetz darstellen lässt, muss beachtet werden, dass die Struktur des Internets in Zukunft auch im Bereich der Telefonie dominieren wird. Dies liegt primär am rasanten Wachstum der

Mobiltelefonie. Einerseits werden im Rahmen der Mobiltelefonie mittels Smartphones immer mehr Datendienste genutzt und andererseits wird die Internettelefonie wirtschaftlich gesehen über Kurz oder Lang an Bedeutung gewinnen. In beiden Fällen werden Dienste, Protokolle und insbesondere die Infrastruktur des Internets verstärkt genutzt. Mit anderen Worten, skalenfreie Strukturen werden in Zukunft höchstwahrscheinlich auch die Mobiltelefonie bestimmen.

9. Ein Framework zur Analyse technologischen Fortschritts

Technologischer Fortschritt ist ein Prozess auf der Mikro- und Makroebene. Heterogene Individuen erwerben auf der Mikroebene neues Wissen aus allen Bereichen des menschlichen Lebens. Durch Speicherung dieses Wissens in externen Medien außerhalb des menschlichen Gehirns, wird es Teil der Wissensbasis einer Ökonomie und bewirkt damit mitunter eine Veränderung auf der Makroebene. Die IKT ermöglicht dabei einer immer größeren Gruppe von Agenten den Zugriff auf diesen Pool an Wissen. Elemente dieser exponentiell wachsenden Wissensbasis werden genutzt, um neue Technologien zu entwickeln oder bestehende Technologien zu verbessern. Darüber hinaus werden leicht verbesserte Technologien durch ständige Kombination bereits bestehender Technologien geschaffen (Arthur und Polak, 2004; Karslon et al., 2012 oder Strumsky et al., 2011). Die Anwendung dieser neuen Technologien ermöglicht eine immer effizientere Produktion, wodurch ein höheres (gleiches) Outputniveau bei unverändertem (niedrigerem) Inputniveau möglich ist. Wirtschaftswachstum ist die Folge technologischen Fortschritts und letztendlich das Ergebnis von neuem Wissen. Wissen, neue und verbesserte Technologie sowie Wachstum stehen somit in einer sehr engen Beziehung zueinander.

In diesem Kontext muss beachtet werden, dass in jedem Wirtschaftssystem das Lösen ökonomischer Problemstellungen das Vorhandensein von Technologien erfordert. In einem weiteren Sinn kann jedes ökonomische Problem auch als technologisches Problem verstanden werden. Für jede Art der Produktion ist daher die eine oder andere Form der Technologie erforderlich. Der Output kann dabei ein physisches Produkt, eine Serviceleistung, eine Kaufentscheidung oder ein geistiges Produkt darstellen. Ohne Technologie ist das Lösen ökonomischer Problemstellungen und damit ökonomische Produktion nicht möglich. Jede Technologie weist dabei bestimmte formale Eigenschaften — wie z. B. konstante Skalenerträge (etc.) — auf. Wissen spielt dabei eine zentrale Rolle. Neues Wissen verbessert bestehende Technologien oder ermöglicht erstmals das Lösen einer neuen Problemstellung mittels einer innovativen Technologie. Neues Wissen verändert somit bestehende Technologien oder produziert neue Technologien. In beiden Fällen resultieren neue Technologien. In den Worten von Joel Mokyr „technology is knowledge“ (Mokyr, 2002b, S. 2).

Das hierbei unter dem Begriff der Technologien angesprochene Wissen hat die Eigenschaft, dass es leicht in Algorithmen transformiert werden kann. Es kann somit mit geringem Aufwand binär kodifiziert werden. Diese Eigenschaft bedingt mitunter die enge Beziehung zur Technologie. Die zentrale Rolle der IKT in den Ökonomien betont besonders die steigende Bedeutung dieser Art von Wissen (Hanappi, 2008a, S. 12—15).

Obwohl Konsens innerhalb der unterschiedlichen ökonomischen Strömungen über die enorme Bedeutung neuer und verbesserter Technologien herrscht, existiert keine Einigkeit über die genaue Beziehung zu Wissen. In diesem Zusammenhang gilt es folgendes zu beachten.

Auf der Makroebene kann in den vergangenen Jahren — verstärkt durch die IKT — ein exponentielles Wachstum von (kodifiziertem) Wissen verzeichnet werden (Ayres und Warr, 2009, S. 50; Karslon et al., 2012, S. 13). Nelson und Phelps (1966, S. 75) weisen (allerdings in einem anderen Kontext) darauf hin, dass das Humankapital von enormer Bedeutung in Ökonomien mit schnellem technologischen Fortschritt ist. Seine Existenz ist insbesondere für die effiziente Anwendung und Weiterentwicklung von Technologien zentral. Helpman und Rangel (1998, S. 2) weisen darüber hinaus darauf hin, dass die Produktivitätseinbußen auf der Makroebene bei Einführung neuer Technologien potentiell umso geringer sind, je höher das existierende Humankapital ist. Im Allgemeinen sind daher Technologie und Humankapital

sehr eng miteinander verwoben. Die Rolle von Wissen wird dabei nur selten explizit diskutiert.

Hierbei es gilt zu beachten, dass das Kodifizieren und Speichern von Wissen in externen Medien zu einer Diskrepanz zwischen der Mikro- und Makroebene führt. Daher muss eine genaue Analyse zwischen der Makro- und Mikroebene differenzieren. Das folgende Framework berücksichtigt aus diesem Grund sowohl die Makro- als auch die Mikroebene technologischen Fortschritts. Beginnend auf der Makroebene werden zunächst die wichtigsten Determinanten technologischen Fortschritts auf der Makroebene identifiziert und mittels einfacher Differentialgleichungen analysiert. Ein besseres Verständnis der tiefen Determinanten technologischen Fortschritts ist jedoch ohne eine Analyse der Mikroebene — das heißt der Ebene der ökonomischen Agenten — nicht möglich (siehe hierzu auch die Diskussion in Mokyr, 1990, S. 8). Die Mikroebene des Frameworks konzentriert sich daher insbesondere auf die Struktur von Wissen sowie auf die Informationsverarbeitung ökonomischer Agenten. Einige Beiträge weisen bereits auf die Bedeutung dieser Punkte hin, jedoch werden in diesen immer nur einzelne und unterschiedliche Aspekte des in der Folge präsentierten Frameworks betont. Besonders bedeutsam sind dabei Arthur (1996, 2000), Arthur und Polak (2004) sowie Hanappi (2008a).

Arthur (2000) und Hanappi (2008a, 2011b) betonen in diesem Kontext die Rolle des internen Modells ökonomischer Agenten in Bezug auf die Problemlösung und den technologischen Fortschritt. Agenten benötigen ein internes Modell, um ökonomische Problemstellungen zu lösen. Im weitesten Sinn kann dieses interne Modell als Ansammlung von (mentalen) Strukturen im menschlichen Gehirn verstanden werden (Hanappi 2008a, S. 3 ff.; siehe hierzu auch Boisot und Canals, 2004). Im Zuge sich ständig verändernder ökonomischer Rahmenbedingungen ist eine permanente Anpassung dieses Modells notwendig.

Arthur und Polak (2004, S. 1) definieren Technologien als Mittel zur Erfüllung eines bestimmten Zwecks (siehe auch Dosi und Grazzi, 2010). Diese Mittel können physische Werkzeuge, industrielle Prozesse oder Algorithmen sein. Da jede Technologie eine ganz bestimmte Funktion erfüllt, repräsentiert jede Technologie auch eine ausführbare Einheit. Arthur und Polak weisen darauf hin, dass jede neue Technologie durch die Kombination bestehender Technologien entsteht (siehe beispielsweise auch Strumsky et al., 2011). Mit anderen Worten, technologischer Fortschritt wird durch die Kombination bereits existierender Technologien bestimmt. Arthur und Polak modellieren die Evolution der Technologie als Netzwerk. Auf die direkte Beziehung zwischen Wissen und Technologie gehen sie jedoch nicht ein. Hanappi (2008a) weist im Gegenzug auf die Netzwerkstruktur von Wissen hin und betont dessen Rolle in Bezug auf die Entwicklung der Ökonomie.

Aufbauend auf einer eigenen Wissensdefinition werden im nachfolgenden Framework sowohl die Makro- als auch die Mikroebene technologischen Fortschritts im ökonomischen Kontext analysiert. Technologien werden hierbei allgemein als Wissensstrukturen definiert, die aus unterschiedlichen Techniken bzw. Wissenentitäten bestehen. Der Analyse der Rolle der IKT wird dabei im gesamten Framework besondere Beachtung geschenkt.

9.1. Die Makroebene

Technologien werden auf der Makroebene als Gruppierungen unterschiedlicher Techniken definiert. Eine Technologie wird dabei allgemein als Instruktion zur Lösung einer ökonomischen Problemstellung verstanden. Diese sind im Detail als Wissensstrukturen zu interpretieren, deren Input Informationen sind. Neue Techniken sind das Resultat eines Lernprozesses bei dem neue Strukturen gebildet werden oder vorhandene Strukturen adaptiert werden. Technologischer Fortschritt ist jener Prozess bei dem bestehende Technologien verändert oder völlig neue Technologien geschaffen werden. Technologien liegt vor allem

jenes Wissen zu Grunde, welches durch Algorithmen beschrieben werden kann. In der Folge kann dieses Wissen mittels der IKT leicht binär kodifiziert werden. Die Akkumulation dieser Strukturen ist essentiell für ökonomisches Wachstum. Das Aggregat aller Technologien kann als die gesamtwirtschaftliche Technologie zur Produktion des Outputs auf der Makroebene interpretiert werden.

Für das langfristige Wachstumspotential einer Ökonomie sind aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive vor allem die vorhandene Technologie und das vorhandene Humankapital entscheidend. Technologie ermöglicht die Überwindung naturgegebener Beschränkungen im Rahmen der Produktion. Der effiziente Einsatz des Wachstumsfaktors Technologie sowie deren Weiterentwicklung setzt allerdings entsprechendes Humankapital voraus (Nelson und Phelps, 1966; Helpman und Rangel, 1998). Die effiziente und ökonomische Anwendung von Technologien ist somit von Menschen mit entsprechendem Wissen abhängig. Aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive betrachtet stehen somit Technologie und Humankapital in einer sehr engen Beziehung zueinander und sind von zentraler Bedeutung für ökonomisches Wachstum.⁹

9.1.1. Technologie auf der Makroebene

Das makroökonomische Aggregat der Technologie umfasst alle in der Ökonomie vorhandenen Technologien. Eine Technologie ist die Kombination mehrerer Techniken, wobei eine Technologie auch aus einer einzigen Technik bestehen kann. Die gesamtwirtschaftliche Technologie umfasst 1 bis n Technologien, die sich wiederum aus 1 bis n Techniken zusammensetzen. Der Begriff Technologie bezieht sich auf der Makroebene auf alle Technologien, die kodifiziert und außerhalb des menschlichen Gehirns gespeichert werden. Diese können in unterschiedlichen Medien — z. B. als Files auf Festplatten, in Büchern oder als Computerprogramme — gespeichert sein. Technologischer Fortschritt wird als die Veränderung der Technologie über die Zeit hinweg definiert. Dieser wird vorrangig durch zwei Prozesse bestimmt. Die (Re-)Kombination vorhandener Technologien sowie die Entwicklung völlig neuer Technologien.

Der erste Prozess umfasst die Kombination bestehender Technologien oder Techniken, um verbesserte Technologien zu generieren. Karslon et al. (2012, S. 13) argumentieren beispielweise, dass das Entstehen einer neuen Technologie stark durch die Kombination von vorhandenen Technologien bestimmt wird. Ein bestimmter Anteil der bereits vorhandenen Technologien trägt somit zur Generierung neuer adaptierter Technologien bei.

Der zweite Prozess transformiert neue Erkenntnisse aus unterschiedlichsten Wissensbereichen in innovative Technologien. Ein bestimmter Teil der Wissensbasis einer Ökonomie wird dabei zur Entwicklung völlig neuer Technologien und Techniken genutzt. Ayres und Warr (2009, S. 50) argumentieren in diesem Zusammenhang, dass das Wachstum von Wissen eine Art selbst verstärkender Prozess gemäß dem Motto „Wissen verlangt nach mehr Wissen“ ist. Wissen wächst exponentiell und ohne Limit. Die Argumentation von Ayres und Warr ist vor allem für die makroökonomische Perspektive plausibel. Ein bestimmter Anteil dieser Wissensbasis wird durch Strukturierung und Anwendung in neue Technologien transformiert. Diese Strukturbildung folgt dabei einem gewissen Algorithmus.

⁹ „Rückendeckung“ für die Wahl dieses Fokus bietet auch die endogene Wachstumstheorie. Bei einer genauen Analyse lassen sich in dieser Strömung zwei zentrale Modellklassen identifizieren. Die eine Klasse repräsentiert Modelle, die sich mit positiven Externalitäten im Rahmen des Wachstumsprozesses, die durch neue Technologien ausgelöst werden, beschäftigen. Die zweite Klasse wird durch Humankapitalmodelle repräsentiert. Hierbei werden mitunter die Auswirkungen unterschiedlicher Anfangsausstattungen an Humankapital auf das Wachstumspotential einer Ökonomie analysiert (siehe beispielsweise Greenhalg und Rogers, 2010, S. 213—242 oder Maußner und Klump, 1996, S. 234—262).

Betrachtet man technologischen Fortschritt auf der Makroebene, so erhält man ein Bild eines kontinuierlichen Prozesses. Die meisten makroökonomischen Modelle gehen daher auch von kontinuierlichem Wandel auf der Makroebene aus. Ayres und Warr (2009, S. 40) argumentieren diesbezüglich, dass die Annahme eines kontinuierlichen Prozesses für die makroökonomische Sichtweise (teilweise) gerechtfertigt ist. Ein Grund dafür ist unter anderem die Resistenz von makroökonomischen Institutionen gegenüber technologischen Veränderungen. Auf der Mikroebene ist jedoch Diskontinuität die Regel. Technologischer Fortschritt ist dort eher ein abrupter und diskontinuierlicher Prozess (Ayres und Warr, 2009).

Diese Überlegungen können in einem einfachen Modell zur Beschreibung technologischen Fortschritts abgebildet werden.

In der Folge repräsentiert die Variable A die gesamtwirtschaftliche Technologie. Diese umfasst alle explizit dokumentierte Technologien, die in Medien (Festplatten, menschliche Gehirne, etc.) gespeichert sind und im Rahmen der Produktion eingesetzt werden. K bezeichnet die gesamte Wissensbasis innerhalb der Ökonomie. K enthält Elemente von A sozusagen in unstrukturierter Form.

Der Aufbau des gesamten Wissens, welches per Definition die Wissensbasis einer Ökonomie bildet, folgt annahmegemäß einem exponentiellen Prozess. Ein bestimmter Teil der Wissensbasis ist für die Entwicklung neuer Technologien relevant und trägt somit zur Veränderung der Technologie bei. Die Variable K bezeichnet die gesamte Wissensbasis innerhalb der Ökonomie und diese wächst exponentiell.

$$K = e^{\alpha t} \quad (37)$$

Der technologische Fortschritt ist definiert als die Veränderung der Technologie über die Zeit hinweg und wird durch zwei Faktoren bestimmt. Auf der einen Seite werden vorhandene Technologien durch (Re-)Kombination in neue Technologien transformiert. Dies repräsentieren in der Regel graduelle technologische Verbesserungen. Ein bestimmter Anteil bereits vorhandener Technologien wird somit für technologischen Fortschritt genutzt. Dieser Prozess erfolgt durch ständige Rekombination der vorhandenen Technologien. In der Folge wird dieser konstante Anteil mit β bezeichnet.

Auf der anderen Seite wird ein Teil der Wissensbasis direkt zur Entwicklung von völlig neuen Technologien verwendet. Diese bilden den zweiten zentralen Bestandteil technologischen Fortschritts. Der Anteil der Wissensbasis, der in Innovationen im Bereich der Technologien mündet, wird in der Folge mit $\gamma e^{\alpha t}$ bezeichnet.

Die Akkumulationsgleichung der Technologie kann daher wie folgt definiert werden.

$$\dot{A} = \beta A + \gamma e^{\alpha t} \quad (38)$$

\dot{A} repräsentiert die Veränderung der Menge an Technologien über die Zeit hinweg und kann als technologischer Fortschritt verstanden werden. Dabei repräsentieren α , β sowie γ Konstanten. Es ist realistisch $0 < \gamma < 1$ und $0 < \beta < \alpha < 1$ zu unterstellen.

Die Akkumulationsgleichung ist eine lineare Differentialgleichung erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten und ist daher analytisch lösbar.

Für Erläuterungen zur Struktur sowie zum Lösungsschema dieser Art von Differentialgleichung siehe Gandolfo (1997, S. 155—168). Nachfolgend wird das in Gandolfo präsentierte Schema zur Lösung dieser Gleichung angewendet.

Zunächst wird Gandolfo (1997, S. 155) folgend die homogene Gleichung gelöst. Die zu (38) korrespondierende homogene Gleichung ist durch

$$\dot{A} - \beta A = 0 \quad (39)$$

gegeben. Diese Gleichung besitzt die Lösung

$$C e^{\beta t}, \quad (40)$$

wobei C eine unbestimmte Konstante repräsentiert.

Im nächsten Schritt wird die inhomogene Gleichung gelöst. Eine triviale Umformung von (38) führt zu

$$\dot{A} - \beta A = \gamma e^{\alpha t}. \quad (41)$$

Verwendet man die Funktion $C e^{\alpha t}$ als ersten Lösungsansatz, wobei C eine beliebige Konstante repräsentiert, folgt nach Substitution in (41):

$$\alpha C e^{\alpha t} - \beta C e^{\alpha t} = \gamma e^{\alpha t}. \quad (42)$$

Eine weitere triviale Umformung ergibt

$$\alpha C e^{\alpha t} - \beta C e^{\alpha t} - \gamma e^{\alpha t} = 0 \quad (43)$$

bzw.

$$(\alpha C - \beta C - \gamma) e^{\alpha t} = 0. \quad (44)$$

Diese Gleichung ist nur erfüllt, wenn

$$[C(\alpha - \beta) - \gamma] = 0 \quad (45)$$

gilt. Daraus folgt für C

$$C = \frac{\gamma}{\alpha - \beta}. \quad (46)$$

Die Lösung der inhomogenen Gleichung ist daher durch $\frac{\gamma}{\alpha - \beta} e^{\alpha t}$ gegeben.

Die allgemeine Lösung der Akkumulationsgleichung (38) lautet in der Folge

$$A = \frac{\gamma}{\alpha - \beta} e^{\alpha t} + C e^{\beta t}. \quad (47)$$

C kann dabei über eine entsprechende Anfangsbedingung bestimmt werden.

Für die Makroebene ergibt sich somit folgendes Bild. Der Bestand an Technologien wird sowohl durch vorhandene Technologien als auch durch die gesamte verfügbare Wissensbasis bestimmt.

Für die effiziente Anwendung sowie Weiterentwicklung dieser Technologien ist jedoch das in einer Ökonomie verfügbare Humankapital entscheidend.

9.1.2. Humankapital auf der Makroebene

Neben den verfügbaren Technologien ist insbesondere das in der Ökonomie zur Verfügung stehende Humankapital für technologischen Fortschritt bedeutend. Das Humankapital ist für die Entwicklung neuer Technologien sowie für den effizienten Einsatz existierender Technologien entscheidend. Das Humankapital ist somit für die Generierung von neuem Wissen sowie für die effektive Anwendung der daraus resultierenden Technologien ausschlaggebend (siehe hierzu auch beispielsweise Helpman und Rangel, 1998). Investitionen in das Humankapital in Form von Ausbildung und Training sind somit entscheidend für die Innovationsfähigkeit sowie die Problemlösungskompetenz in einer Ökonomie (Nelson und Phelps, 1966). Dies kann den technologischen Fortschritt auf der Makroebene massiv beeinflussen und zu signifikanten makroökonomischen Effekten führen.

Humankapital bezeichnet im Allgemeinen die Fähigkeiten und das Wissen der Arbeitskräfte (siehe z. B. Greenhalgh und Rogers, 2010, S. 229). Wissen wird sozusagen nur in Verbindung mit dem Menschen „produktiv“. Der Aufbau von Humankapital erfolgt durch einen Lernprozess, der über Bildung in Institutionen sowie durch berufliche Erfahrung beeinflusst wird. Oftmals ist diese Differenzierung mit der Unterscheidung zwischen Theorie und Praxis gleichzusetzen.

Humankapital wird innerhalb der Ökonomie üblicherweise allgemein als die Summe von Wissen und Fähigkeiten definiert. Romer (1990, S. 79) definiert den Begriff beispielweise als die Summe formaler Ausbildung und Erfahrung im Sinne des „on-the-job“-Trainings.

Aus diesem Grund wird in diesem Framework Humankapital als das Ergebnis von Bildung und berufliche Erfahrung definiert. Explizites und implizites Wissen stehen dabei in sehr enger Beziehung zu diesen Prozessen. Explizites Wissen steht im Zentrum von Bildung bzw. wird primär durch Bildung vermittelt. Implizites Wissen resultiert in erster Linie aus beruflicher Erfahrung heraus. Empirisch können Bildung und ökonomisch relevante Erfahrung durch die Anzahl an Ausbildungsjahren sowie durch die Jahre an Berufserfahrung gemessen werden. Beide Prozesse bestimmen das Wachstum des Humankapitals.

Aus der Sicht dieser Dissertation ist entscheidend, dass sowohl das Humankapital eines einzelnen Agenten als auch das gesamte verfügbare Humankapital durch die Prozesse Bildung (explizites Wissen) und Erfahrung (implizites Wissen) bestimmt werden. Beides sind Prozesse der Zeit. In vielen Fällen beziehen sich diese Prozesse auf das gleiche Wissen, jedoch aus unterschiedlichen Perspektiven. Oft ist dieses Wissen somit komplementär. Durch Ausbildung wird primär explizites und durch Erfahrung vorrangig implizites Wissen aufgebaut. Theoretisch ist sowohl explizites als auch implizites Wissen kodifizierbar, jedoch sind damit unterschiedliche Kosten verbunden.

In der Folge kann Humankapital auf gesamtwirtschaftlicher Ebene als eine Funktion von Bildung und Erfahrung definiert werden. Dessen Wachstum wird somit durch zwei Faktoren bestimmt. Einerseits durch Bildung im klassischen Sinn und andererseits durch Erfahrung im Zuge der beruflichen Tätigkeit. Bildung umfasst im Wesentlichen alle Bildungs- sowie Ausbildungsmaßnahmen. Hierzu zählen beispielweise die Ausbildung in Schulen, Betrieben (Lehre) oder Universitäten sowie alle Weiterbildungsmaßnahmen in Instituten (etc.). Dabei wird stets Humankapital investiert, um neues Humankapital zu schaffen. Die investierten Ressourcen (Lehrer, Meister, Professoren) repräsentieren selbst Humankapital, welches in den unterschiedlichsten Institutionen (Lehrmeister in Betrieben, Bildungsbeauftragte in Betrieben, Professoren an Universitäten, etc.) zum Einsatz kommt.

Formal kann Bildung in diesem Modell wie folgt definiert werden.

$$E(t, H) = \kappa t H. \quad (48)$$

Der Einfluss von (beruflicher) Erfahrung wird hingegen als einfacher Prozess der Zeit modelliert.

$$X(t) = \lambda t$$

Auf Basis dieser Überlegungen lässt sich ein einfaches Modell zur Erklärung der Akkumulation von Humankapital formulieren.

Die Akkumulationsgleichung für das Humankapital lautet:

$$\dot{H} = E(t, H) + X(t) = \kappa t H + \lambda t. \quad (49)$$

Nach einer trivialen Umformung von (49) erhält man

$$\dot{H} - \kappa t H = \lambda t. \quad (50)$$

Dies ist eine lineare Differentialgleichung erster Ordnung mit variablen Koeffizienten und ist analytisch lösbar.

Laut Léonard und Van Long (1992, S. 91 ff., in eigener und auf das hier präsentierte Modell angepasster Notation) kann eine allgemeine Lösung für diese Gleichung wie folgt ermittelt werden. Die allgemeine Form dieser Differentialgleichungen ist durch

$$\dot{H} + \psi(t)H = \omega(t) \quad (51)$$

gegeben. Dabei gilt in Bezug auf das hier analysierte Modell $\psi(t) = -\kappa t$ und $\omega(t) = \lambda t$. Ermittelt man den Integrationsfaktor über

$$I(t) = \exp\left(\int \psi(t) dt\right) \quad (52)$$

und multipliziert beide Seiten von (51) mit $I(t)$, so erhält man

$$I(t)\dot{H} + \psi(t)I(t)H = I(t)\omega(t). \quad (53)$$

Berücksichtigt man nun

$$\dot{I}(t) = \psi(t)\exp\left(\int \psi(t) dt\right) = \psi(t)I(t), \quad (54)$$

so erhält man nach Anwendung der Produktregel und Substitution

$$\frac{d[I(t)H]}{dt} = I(t)\dot{H} + \dot{I}(t)H = I(t)\dot{H} + \psi(t)I(t)H. \quad (55)$$

Integration von Gleichung (55) führt zu

$$I(t)H = \int I(t)\omega(t) dt. \quad (56)$$

Eine triviale Umformung liefert die allgemeine Lösung dieser Klasse von Differentialgleichungen

$$H(t) = \frac{1}{I(t)} [J(t)], \quad (57)$$

wobei $J(t)$ durch

$$J(t) = \int I(t)\omega(t) dt \quad (58)$$

gegeben ist. Dabei gilt es zu beachten, dass implizit eine Konstante enthalten ist (Léonard und Van Long, 1992).

Nun wird das Lösungsschema von Léonard und Van Long (ibid. S. 91 ff.) auf das hier erarbeitete Modell angewendet. Zur Erinnerung: In diesem Modell gilt $\psi(t) = -\kappa t$ und $\omega(t) = \lambda t$.

Zunächst wird der Integrationsfaktor ermittelt. Der Integrationsfaktor $I(t)$ lautet

$$I(t) = \exp\left(\int -\kappa t dt\right). \quad (59)$$

Es gilt somit

$$I(t) = e^{-\frac{\kappa}{2}t^2}. \quad (60)$$

Um eine Lösung zu ermitteln, ist des Weiteren die Ermittlung von $J(t)$ notwendig. Für $J(t)$ gilt auf Basis von (58) unter Berücksichtigung von $\omega(t) = \lambda t$ sowie (60)

$$J(t) = \int e^{-\frac{\kappa}{2}t^2} \lambda t dt. \quad (61)$$

In der Folge erhält man

$$J(t) = \int e^{-\frac{\kappa}{2}t^2} \lambda t dt = -\frac{\lambda}{\kappa} e^{-\frac{\kappa}{2}t^2} + C, \quad (62)$$

wobei C eine beliebige Konstante repräsentiert.

Für $H(t)$ folgt somit:

$$\begin{aligned}
 H(t) &= \frac{1}{e^{-\frac{\kappa}{2}t^2}} \left(-\frac{\lambda}{\kappa} e^{-\frac{\kappa}{2}t^2} + C \right) & (63) \\
 &= e^{\frac{\kappa}{2}t^2} \left(-\frac{\lambda}{\kappa} e^{-\frac{\kappa}{2}t^2} + C \right) \\
 &= -\frac{\lambda}{\kappa} e^{\frac{\kappa}{2}t^2} e^{-\frac{\kappa}{2}t^2} + e^{\frac{\kappa}{2}t^2} C.
 \end{aligned}$$

Nach einer Vereinfachung erhält man die allgemeine Lösung dieser Gleichung.

$$H(t) = C e^{\frac{\kappa}{2}t^2} - \frac{\lambda}{\kappa} \quad (64)$$

Die Konstante C kann dabei über eine entsprechende Anfangsbedingung $H(t_0) = H_0$ bestimmt werden.

In diesem einfachen Modell wird das Humankapital primär durch den Einfluss von Bildung bestimmt. Umso größer der Einfluss beruflicher Erfahrung im Vergleich zum Einfluss von Bildung ist, umso stärker beeinträchtigt das Verhältnis $\frac{\lambda}{\kappa}$ das Humankapital.

Die vorangegangene Analyse der gesamtwirtschaftlichen Faktoren Technologie und Humankapital auf der Makroebene verdeutlicht, dass beide Größen in engem Zusammenhang mit Bildung und Erfahrung stehen. In der Folge wird das Zusammenspiel zwischen Technologie und Humankapital auf der Ebene der ökonomischen Agenten analysiert. Dabei steht insbesondere die Struktur von Wissen sowie dessen Beziehung zu Technologie im Fokus.

9.2. Die Mikroebene

Eine Analyse technologischen Fortschritts auf der Ebene der ökonomischen Agenten erfordert eine direkte Auseinandersetzung mit der Struktur von Wissen. In diesem Zusammenhang gilt es nochmals darauf hinzuweisen, dass ökonomische Aktivität (Produktion) und Wissen untrennbar miteinander verbunden sind (siehe beispielsweise Mokyr, 2002b oder Dosi und Grazzi, 2010). Um einen bestimmten Output zu produzieren, wird immer eine bestimmte Technologie angewendet. Jede Technologie ist letztendlich ein spezielles Abbild des Wissens der Agenten. Aus diesem Blickpunkt heraus können Technologien als Wissensstrukturen interpretiert werden. In letzter Konsequenz sind dies mentale Strukturen im menschlichen Gehirn (Hanappi, 2008a, S. 4).

Die Wissensstrukturen von Agenten stehen in engem Zusammenhang zu ihrer Wahrnehmung. Im Detail basiert das Lösen wirtschaftlicher Problemstellungen auf dem Bewusstsein und der Wahrnehmung ökonomischer Agenten. In diesem Prozess spielt das interne Modell der Agenten eine zentrale Rolle (Hanappi, 2008a; Arthur, 2000 oder auch Boisot und Canals 2004). Es kann auch als Speicher von kognitiven (oder mentalen) Muster verstanden werden. Arthur (2000, S. 3 ff.) argumentiert beispielweise, dass der menschliche Geist im Wesentlichen eine Ansammlung von Mustern ist. Diese werden im Zuge der Assoziation zur Lösung ökonomischer Probleme eingesetzt.

In dieser Arbeit wird das interne Modell als Ansammlung von technologischen Mustern definiert. Diese Muster bestehen aus Wissensentitäten, die einzelne Techniken repräsentieren. Die einzelnen Techniken sind miteinander verbunden und formen dadurch Technologien. Agenten können mit diesen Technologien unterschiedliche wirtschaftliche Problemstellungen lösen. Technologien repräsentieren somit Wissensstrukturen bzw. technologische Muster im internen Modell ökonomischer Agenten. Das Lösen ökonomischer Probleme basiert auf der Nutzung dieser Muster. Im Zuge des Kognitionsprozesses der Agenten werden Probleme mit bestimmten Mustern assoziiert und durch deren Anwendung gelöst.

Auf diese Perspektive sowie den Zusammenhang zu Humankapital wird in den nachfolgenden Kapiteln im Detail eingegangen.

9.2.1. Technologie und Humankapital auf der Mikroebene

Der enge Zusammenhang zwischen Wissen und Technologie wurde bereits eingehend erläutert. Mokyr (2002b, S. 2) formuliert diesen Zusammenhang folgendermaßen: „technology is knowledge“ (ähnlich argumentieren auch Dosi und Grazzi, 2010). Dabei sind die Struktur von Wissen und dessen Rolle in Bezug auf technologischen Fortschritt entscheidend. Im Kontext wirtschaftlicher Produktion kann das interne Modell ökonomischer Agenten im Wesentlichen als Netzwerk technologischen Wissens interpretiert werden.

Hierbei wird im Speziellen argumentiert, dass das interne Modell ökonomischer Agenten einen Komplex von technologischen Wissensentitäten darstellt. Die angesprochenen Wissensstrukturen können dabei als Muster bzw. Assoziationen verstanden werden. Ist ein Agent mit einer ökonomischen Problemstellung konfrontiert, so werden diese Muster assoziiert und damit die Problemstellung gelöst. Dabei sind unterschiedliche Muster für die Lösung unterschiedlicher Problemstellungen zuständig.

Das interne Modell ist somit ein Komplex verschiedener Wissensstrukturen, die das technologische Wissen und die technologischen Fähigkeiten der Agenten repräsentieren. Die Verbindungen zwischen den verschiedenen Wissensentitäten bilden bestimmte Muster. Jedes Muster repräsentiert eine Technologie.

Die Verbindungen zwischen den einzelnen Wissensentitäten stehen für einen Zusammenhang zwischen den Entitäten. Jeder Zusammenhang repräsentiert eine Beziehung und spiegelt einen Sachverhalt der theoretischen oder praktischen Welt wider, der in Form einer Technologie im internen Modell gespeichert wurde.

Durch das Entstehen von Verbindungen zwischen unterschiedlichen Wissensentitäten werden Wissensstrukturen geformt. Wissensentitäten mit vielen Verbindungen zu anderen Entitäten haben im internen Modell einen höheren Stellenwert und dominieren aus diesem Grund die ökonomische Aktivität des jeweiligen Agenten.

Durch das Entstehen neuer Entitäten wächst das interne Modell. Technologischer Fortschritt kann in diesem Modell somit als Wachstum dieses Netzes interpretiert werden. Wissensentitäten können dabei durch zwei unterschiedliche Prozesse generiert werden. Diese Prozesse sind Bildung und (berufliche) Erfahrung. Im Fall von Bildung repräsentieren die Wissensentitäten primär explizites Wissen. Im Fall von Erfahrung stehen die Wissensentitäten in der Regel für implizites Wissen.

Man beachte, dass das interne Modell des Agenten ein Netzwerk bildet. Wissenentitäten repräsentieren dabei die Knoten und Verbindungen zwischen den Entitäten stehen für Kanten zwischen den Knoten (siehe Abbildung 6).

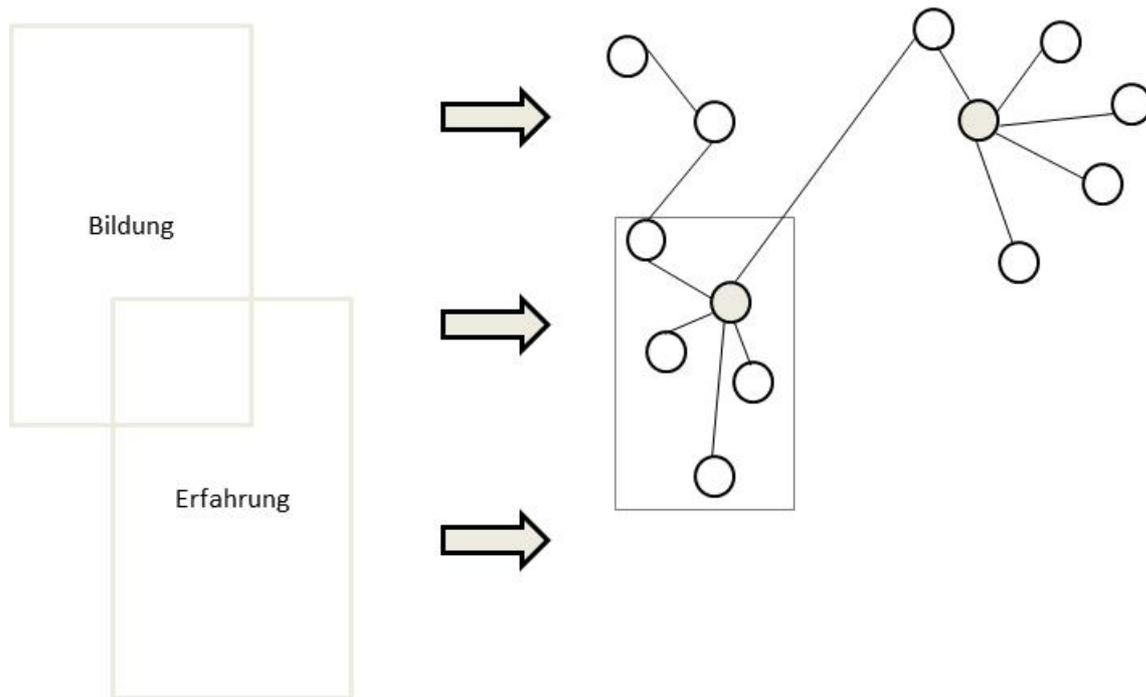


Abbildung 6: Das interne Modell — ein Netzwerk von Wissensentitäten

9.2.2. Instanziierung von Technologien, Informationsverarbeitung und Generierung neuer Technologien

Im Zuge der Wahrnehmung einer bestimmten ökonomischen Problemstellung kommt es zu einer Art Instanziierung der am besten geeigneten Wissensstrukturen. Dabei werden die Wissensstrukturen vom jeweiligen Agenten als technologische Muster bzw. Technologien interpretiert. Die Instanziierung der Technologie wird dabei durch die Assoziation des Agenten im Zuge der Wahrnehmung ausgelöst. Bei der Instanziierung werden die Wissensentitäten mit kontextbezogenen Informationen aus dem Problemumfeld versorgt. Innerhalb des internen Modells repräsentieren Wissensstrukturen somit einzelne Technologien. Die einzelnen Elemente dieser Wissensstrukturen sind technologische Wissensentitäten bzw. Techniken. Jeder Knoten repräsentiert somit eine technische Wissensentität bzw. Technik.

Das interne Modell des Agenten besteht aus N Wissensentitäten mit $N = 1, \dots, n$. Darauf aufbauend existieren $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ Technologien. Mit dem Wachstum des internen Modells wächst auch N . Jede Technologie nimmt eine Informationsmenge aus dem Problemkontext als Input entgegen $T_i(I_i)$. I repräsentiert dabei die gesamte Informationsmenge eines Problemkontexts (siehe Abbildung 7)

Sollte für eine bestimmte ökonomische Problemstellung keine passende Wissensstruktur innerhalb des internen Modells vorhanden sein, so wird ein Innovationsprozess initiiert. Im Rahmen dieses Prozesses wird 1) eine bestimmte Menge an Informationen aus dem Problemumfeld ausgewählt, die das Problem beschreibt. Sei $I_i \subset I$ mit $i = 1, \dots, n$ der Vektor an Informationen für die jeweilige Problemstellung i . Dann dient I_i als Input für die jeweilige instanziierte Technologie $T_i(I_i)$, wobei $T_i \in T$. 2) Eine bestimmte Menge an Knoten (bzw. Wissensentitäten) des internen Modells wird selektiert, die potentiell für die Lösung der Problemstellung geeignet sind. 3) Diese Knoten werden miteinander kombiniert und gegenüber der Problemstellung getestet. Im Rahmen der Kombination kann es mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit p zu einer Mutation kommen.

Wenn diese Kombination das ökonomische Problem löst, wird ein neuer Knoten generiert und dem internen Modell hinzugefügt. Der neue Knoten wird dabei mit höherer

Wahrscheinlichkeit mit existierenden Knoten verbunden, die bereits über eine große Anzahl an Verbindungen verfügen. Im Detail wird der durch die Mutation neu generierte Knoten mit jenem Knoten aus der Menge an zuvor für die Lösung der Problemstellung ausgewählten Knoten verbunden, der den höchsten Grad aufweist. Darüber hinaus wird die mit neu generierten Knoten geformte Technologie in einen Technologievorrat aufgenommen. Sollte keine Lösung erzielt werden, so startet der Kombinationsprozess von neuem. Bei diesem Innovationsprozess handelt es sich somit um einen evolutionären Prozess, bei dem neue Wissensentitäten (Techniken) generiert werden. Das Entstehen neuer Knoten wird dabei durch die Mechanismen Selektion, Variation und Replikation bestimmt (siehe hierzu auch Potts, 2003, S. 59). Durch die Einbindung in das interne Modell entstehen somit potentiell neue Wissensstrukturen (Technologien).

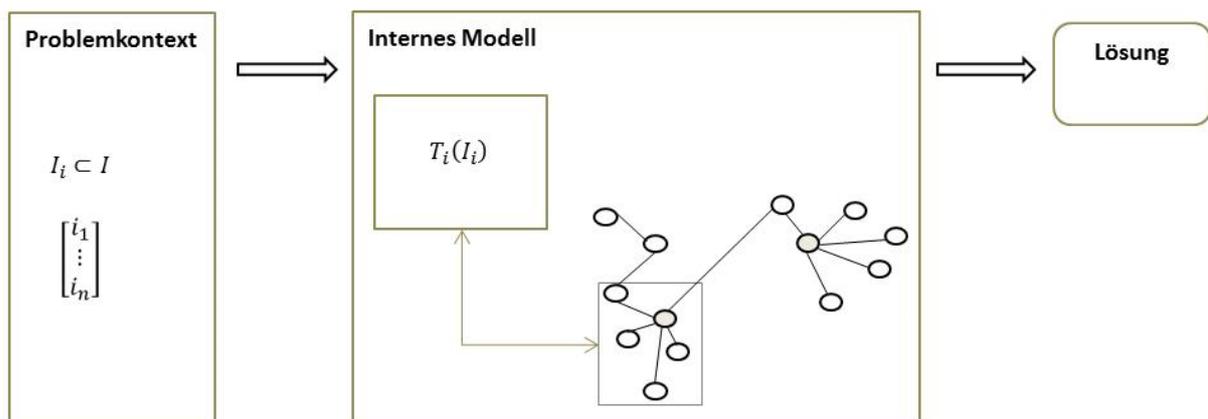


Abbildung 7: Instanziierung von Technologien

Man beachte, dass die Informationsverarbeitungskapazitäten des Agenten in diesem Modell beschränkt – im Sinne des Konzepts der beschränkten Rationalität von Herbert Simon (1972) (siehe hierzu auch Mallard, 2011) – sind.

Da der Agent im Rahmen der Instanziierung einer Technologie oder zur Generierung einer neuen Technik nur eine bestimmte Teilmenge der gesamten Informationen aus dem Problemumfeld verwendet, ist seine Informationsbasis zum Lösen der ökonomischen Problemstellung beschränkt. Der Innovationsprozess bei dem neue Wissensentitäten geschaffen werden, nutzt ebenfalls nur eine bestimmte Menge an Informationen aus dem jeweiligen Problemkontext. Der auf Basis dieser beschränkten Informationen erzielte Output oder die daraus generierte Technologie kann daher nicht optimal im Sinne der Optimierung eines Optimierungsproblems sein.

9.2.3. Das Wachstum und die Struktur des internen Modells

Aus der Perspektive eines ökonomischen Agenten ist technologischer Fortschritt im Rahmen dieses Modells ein Lernprozess. In diesem Lernprozess werden dem internen Modell neue Wissensentitäten bzw. Knoten hinzugefügt. Durch das Eingehen von Verbindungen mit bereits vorhandenen Knoten werden neue Wissensstrukturen geschaffen. Da es sich um technologisches Wissen handelt, werden dadurch entweder bestehende Technologien verbessert oder völlig neue Technologien generiert.

Lernen spielt somit eine entscheidende Rolle. Im Rahmen dieses Modells sind dabei Bildung und Erfahrung die dominierenden Prozesse. Ausgehend von 40 Arbeitsjahren wird die durchschnittliche Lebenszeit von Agenten rund durch 1/5 Bildung und 4/5 Erfahrung bestimmt. Die Ausgangsmenge an Knoten des internen Modells, die von neuen Knoten zum Eingehen von Verbindungen genutzt werden kann, wird primär durch Bildung bestimmt.

Erfahrung baut im Wesentlichen auf den Knoten des internen Modells auf, die im Vorfeld durch Bildung entstanden sind.

Neue Wissensentitäten werden tendenziell mit einer höheren Wahrscheinlichkeit mit stark vernetzten Wissensentitäten verbunden. Dadurch werden neuen Wissensentitäten in häufig verwendete Wissensstrukturen integriert. Durch diesen Prozess bilden sich über die Zeit hinweg Knoten, die im Vergleich zu anderen Knoten des Netzwerkes einen hohen Grad aufweisen. Diese Knoten sind vergleichbar mit Hubs in technologischen Netzwerken und repräsentieren arbeitstechnische Spezialisierung eines Agenten. Diese Spezialisierung bestimmt zu einem überwiegenden Anteil die ökonomische Aktivität des Agenten und wird im ersten Schritt durch Bildung beeinflusst.

Das interne Modell der Agenten weist somit viele Parallelen zu skalenfreien Netze auf. Wachstum und Preferential Attachment spielen wie im Modell von Barabási und Albert (1999) auch in diesem Netzwerk eine zentrale Rolle (siehe hierzu Kapitel 8.3.2).

In Bezug auf die Realität kann der Wachstumsprozess des internen Modells wie folgt interpretiert werden. Bildung führt zu einer gewissen Vorprägung in Bezug auf die vorhandenen Wissensentitäten und Wissensstrukturen. Sie bestimmt wesentlich die Ausgangsmenge an Knoten im internen Modell. Das Hinzufügen neuer Wissensentitäten zum internen Modell sowie die Erstellung von Verbindungen zu existierenden Wissensentitäten kann als Lernprozess der Agenten im Rahmen des Arbeitslebens verstanden werden. Die potentiellen technologischen Fähigkeiten und das Wissen des Agenten werden durch seine Bildung bestimmt. Im Rahmen des Arbeitslebens wird im Zuge der Erfahrung neues Wissen gewonnen. Die arbeitstechnische Spezialisierung bedingt gewisse Wissensschwerpunkte. Ein Feuerwehrmann ist am Ende seines Arbeitslebens auf andere Technologien spezialisiert als beispielsweise ein Softwareentwickler. Unterschiedliche ökonomische Erfahrungsprozesse produzieren andere Wissensstrukturen. Die Spezialisierung auf eine Arbeitstätigkeit führt somit dazu, dass bestimmte Wissensentitäten im internen Modell über immer mehr Verbindungen verfügen. Das Wissen wird vertieft und in einen immer stärkeren Kontext zu anderen Wissensentitäten gesetzt. Im technologischen Umfeld bedeutet dies, dass der Agent bestimmte Technologien immer besser beherrscht.

Agenten lernen im Rahmen der ökonomischen Produktion ständig hinzu, da sie stets mit neuen Problemstellungen konfrontiert sind. Die Lösung neuer Problemstellungen spiegelt sich in der Generierung neuer Wissensentitäten wider. Das Netz an technologischem Wissen wächst durch diesen Prozess ständig an. Durch die Generierung neuer Wissensentitäten sowie den zugehörigen Verbindungen werden neue oder verbesserte Technologien geschaffen.

Hierbei gilt es zu beachten, dass der evolutionäre Innovationsprozess und der Prozess der (beruflichen) Erfahrung, der zu einer Art Preferential Attachment führt, ein Netzwerk generiert, welches über eine skalenfreie Struktur verfügt (siehe hierzu auch Kapitel 8.3.2 sowie die Ergebnisse von Arthur und Polak, 2004, S. 7 ff.). Die Gradverteilung $P(k)$ des Netzes folgt somit im Wesentlichen einem Potenzgesetz $P(k) \propto k^{-c_1}$ (siehe Kapitel 8.3.1). Damit weist es wichtige Parallelen zu technologischen Netzwerken, wie z. B. dem Internet, auf. Da das Internet im Zusammenspiel mit Suchmaschinen häufig als reiner Wissensspeicher angesehen wird, verwundert diese Parallele kaum.

Neben dem Erlernen neuer Wissensentitäten und deren Verbindungen zu bereits existierenden Wissensentitäten ist auch der Prozess des Vergessens relevant. Vergessen (sowie Verwerfen) kann in diesem Kontext als das Dereferenzieren von bestehenden Wissensentitäten verstanden werden. Im Allgemeinen werden Wissensstrukturen bzw. ganze Technologien nicht vergessen, da sie über viele Verbindungen im Netzwerk verfügen. In der Regel werden einzelne Wissensentitäten vergessen. Diese „verschwinden“ jedoch nicht vollständig aus dem internen Modell, sie bilden vielmehr nur Knoten ohne Verbindungen, verbleiben jedoch ein Teil des internen Modells. Der Prozess der Erinnerung ist in der Lage Verbindungen wieder

herzustellen. Vergessen kann daher als die Aufhebung existierender Verbindungen zwischen den Wissensentitäten interpretiert werden. Die betroffenen Wissensentitäten bleiben jedoch im Netzwerk erhalten.

Das Humankapital eines Agenten wird somit durch sein internes Modell bestimmt. Dieses wird durch die Prozesse Bildung und Erfahrung definiert. Das potentielle Humankapital ist umso größer, je größer seine Grundmenge an Wissensentitäten ist, die zur Generierung von Verbindung mit neuen Knoten genutzt werden können. Die grundsätzliche Menge an Knoten mit hohem Grad ist somit ausschlaggebend für das potentielle Humankapital. Je höher die Ausgangsmenge an Knoten im Netzwerk ist, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass der Erfahrungsprozess zur Bildung vieler Hubs führt. Das interne Modell wird dadurch robuster. Die Existenz vieler Knoten mit hohen Graden ist auch für die Innovationfähigkeit — das heißt die Fähigkeit neue Problemstellungen zu lösen und neue Wissensstrukturen zu bilden — ausschlaggebend.

9.3. Die Diskrepanz zwischen der Makro- und der Mikroebene

Die unterschiedlichen Perspektiven in Bezug auf Wissen und Technologie auf der Makro- und Mikroebene machen auch auf eine wachsende Diskrepanz zwischen den Ebenen aufmerksam. Diese Diskrepanz resultiert mitunter aus der unterschiedlichen Wahrnehmung der Agenten in Bezug auf das Wissen auf den unterschiedlichen Ebenen. Auf der Makroebene wirkt Wissen wie eine große Menge an unzusammenhängenden Einheiten. Auf der Mikroebene zeigt sich jedoch die enge Beziehung zwischen den unterschiedlichen Einheiten (bzw. Entitäten) in Form der Netzwerkstruktur.

Die IKT ermöglicht ökonomischen Agenten Zugriff auf eine gigantische Menge an Wissen in externen Trägermedien (z. B. via Internet). Die Menge an gespeichertem Wissen wächst täglich exponentiell, insbesondere technologisches Wissen. Hieraus resultieren jedoch einige Problempunkte.

Zunächst gilt es zu beachten, dass diese Menge an gespeichertem Wissen aus der Perspektive des individuellen Agenten eine reine Informationsbasis repräsentiert, die in Wissen transformiert werden muss. Die Informationen müssen dabei im Rahmen eines komplexen Prozesses in Wissensentitäten übergeführt und in das interne Modell integriert werden. Dieser Transformationsprozess ist teilweise mit großem Aufwand verbunden. Dieser resultiert primär aus dem Zeitaufwand für Suche, Beurteilung und Verarbeitung von Informationen. In diesem Zusammenhang ist von besonderer Bedeutung, dass aus der Sicht des individuellen Agenten häufig grundlegende Wissensentitäten und Wissensstrukturen fehlen, um eine rasche und effiziente Transformation sowie Integration von neuen Entitäten auf Basis der Informationen sicherzustellen. Dieses Manko kann in erster Linie durch Bildung beseitigt werden.

Des Weiteren fehlt der Einfluss der Erfahrung. Auf der einen Seite haben die Agenten keinen Erfahrungsprozess durchlaufen, um die mittels der IKT zugänglichen Informationen beurteilen und korrekt verarbeiten zu können. Auf der anderen Seite sind in den wenigsten Fällen die impliziten Aspekte Teil des gespeicherten Wissens, welches mittels der IKT zugänglich ist. Dies kann unterschiedliche Gründe haben. Oft ist der Aufwand für die Kodifizierung dieses Aspekts hoch und wird unterlassen und manchmal spielt Information Hiding eine Rolle. In der Folge resultieren daraus in vielen Fällen falsche interne Modelle (siehe hierzu auch Hanappi, 2008a, S. 9 f.). In Bezug auf die Technologie führt dies wiederum zu fehlerhaften oder falsch angewendeten Technologien und Techniken. Erst der Erfahrungsprozess des individuellen Agenten auf Basis dieser Modelle kann eine Adaption oder Modifikation des falschen Modells bewirken. Wenn die Anzahl an falschen Modellbestandteilen ein gewisses Ausmaß überschreitet, so führt dies häufig zu einer Art

Überforderung der Agenten. In der Folge werden Modelle ohne eingehenden Test fix übernommen. In letzter Konsequenz hemmt dies die Innovationsfähigkeit der Agenten.

Das in einer Ökonomie verfügbare Humankapital ist mehr als die reine Ansammlung von gespeichertem Wissen. Für den Erwerb von neuem Wissen ist die Anzahl an bereits vorhandenen Wissensentitäten und insbesondere die Anzahl an vorhandenen Wissensstrukturen ausschlaggebend. Mit anderen Worten, der Bildungs- und Erfahrungsstand sind entscheidend. Aus der Perspektive eines einzelnen Agenten geht die Netzwerkstruktur von Wissen, die in externen Medien gespeichert wurde, verloren. Dieses Phänomen des Strukturverlusts kann beispielweise im Internet häufig beobachtet werden. Wissen wird aus dem Kontext gerissen und kann auch von Experten nur schwer zu anderen Wissensentitäten in Beziehung gesetzt werden. Dies ist insbesondere bei technologischem Wissen zu beobachten. Des Weiteren geht aus der Perspektive eines einzelnen Agenten auf der Makroebene sowohl der Netzwerkcharakter von Wissen als auch die Beziehung zwischen Algorithmen und Wissen häufig verloren. Diese Aspekte sind jedoch von besonderer Relevanz, um die ökonomischen Prozesse in Bezug auf die Akkumulation von Wissen zu verstehen.

Die Kombination von fehlender Struktur und einem fehlenden Erfahrungsprozess sowie eine für den einzelnen Agenten täglich exponentiell wachsenden Menge an mittels der IKT unmittelbar verfügbaren Informationen erschwert die Integration in das interne Modell massiv. Dies hat häufig negative Folgen. Falsch angewendete Technologien und falsche (interne) Modelle sind nur zwei Beispiele hierfür. Diese falschen Modelle sind in der Praxis erstaunlich lange überlebensfähig. Solange Technologien in einem abgegrenzten Kontext funktionieren, werden diese nicht geändert („never change a running system“). In diesem Zusammenhang können Technologien als Routinen gesehen werden. Eine natürliche Resistenz gegenüber Veränderung ist dabei beobachtbar. Dabei gilt es zu beachten, dass technologischer Fortschritt auch immer eine Veränderung eines Systems — in diesem Modell einer Wissensstruktur — bedeutet. Wachstum wird durch diese Veränderungsresistenz in vielen Fällen gehemmt.

Eine immer größere Menge an leicht zugänglichem Wissen kann somit in bestimmten Fällen auch die Innovationstätigkeit in die falsche Richtung lenken und suboptimale Innovationen hervorbringen. Langsamere technologischer Fortschritt ist die Folge.

Das hier präsentierte Framework verdeutlicht die enge Beziehung zwischen Wissen und technologischem Fortschritt. Auf der Makroebene wächst die in einer Ökonomie verfügbare Technologie auf Grund der Kombination bestehender und der Generierung völlig neuer Technologien. Explizites und implizites Wissen definieren dabei das verfügbare Humankapital. Dieses ist im Speziellen auf Grund seiner Rolle bei der Anwendung und Umsetzung von Wissen im Zuge der Innovationstätigkeit von zentraler Bedeutung für das Wirtschaftswachstum. Humankapital wird durch Bildung und (berufliche) Erfahrung bestimmt. Auf der Mikroebene formen die dabei aufgebauten Wissensstrukturen ein skalenfreies Netzwerk bestehend aus Wissensentitäten. Bildung bestimmt dabei Großteils die Ausgangsmenge an Wissensentitäten. Erfahrung bestimmt im Wesentlichen das Wachstum des Netzwerks. Im ökonomischen Kontext kann dieses Netzwerk als das interne (bzw. das technologische) Modell eines Agenten interpretiert werden. Technologien sind in der Folge Instanzen von Wissensstrukturen, die zur Lösung bestimmter ökonomischer Problemstellungen verwendet werden. Diese werden durch die Assoziation des Agenten auf bestimmte wirtschaftliche Problemstellungen angewendet.

9.4. Ein allgemeines Konzept für eine agentenbasierte Simulation

Bestimmte Teile des in dieser Arbeit präsentierten Frameworks sind prädestiniert für eine agentenbasierte Simulation. Dies gilt insbesondere für das Modell technologischen Fortschritts auf der Mikroebene des Frameworks. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel ein Konzept für eine Agentensimulation erarbeitet, welches eine konkrete Simulationsmöglichkeit des Modells diskutiert sowie einen grundlegenden technischen Rahmen skizziert. Dabei werden auf Basis des Modells die zentralen Klassen identifiziert und programmiertechnische Aspekte diskutiert. Das Konzept ist grundsätzlich als Basis für weiterführende Arbeiten gedacht. Technische Objekte werden in diesem Kapitel stets in Englisch und in Großbuchstaben angegeben.¹⁰ Beispielweise bezeichnet AGENT die Klasse Agent.

Kenntnisse in der objektorientierten Programmierung werden für das Verständnis dieses Kapitels vorausgesetzt. Leser ohne Erfahrung mit agentenbasierten Simulationen im ökonomischen Kontext seien auf Axelrod und Testfatsion (2005) sowie Wooldridge (2002, S. 259 f.) verwiesen.

9.4.1. Zentrale Klassen

Wie in den vorangegangenen Kapiteln ausgeführt wurde, kann das interne Modell ökonomischer Agenten als Netzwerk technologischer Wissensentitäten verstanden werden. Im Speziellen kann es als skalenfreies Netzwerk dargestellt werden, wobei jeder Knoten als Technik zu interpretieren ist. Technologien sind in weiterer Folge Kombinationen aus unterschiedlichen Techniken, die aus den Prozessen Bildung und berufliche Erfahrung heraus entstehen. Das interne Modell bildet somit die Basis für technologische Muster des Agenten, die in Form von Technologien zur Lösung unterschiedlichster ökonomischer Problemstellungen eingesetzt werden. Dabei wird von den Agenten jedoch immer nur eine Teilmenge der für die Problemstellung relevanten Informationen zur Lösung verwendet. Die Instanziierung und Anwendung der Technologien erfolgt dabei im Zuge des Assoziationsprozesses der Agenten im Rahmen seines Wirtschaftslebens.

Aus programmiertechnischer Perspektive lassen sich in Bezug auf dieses Modell die Klassen AGENT, TECHNIQUE, TECHNOLOGY, MODEL, PROBLEM, INFORMATION, EDUCATION sowie EXPERIENCE identifizieren. Für die konkrete technische Realisierung der Simulation liegt die Entwicklung einer Controllerklasse SIM_CONTROLLER und einer GUI-Klasse USER_INTERFACE nahe.

Unterschiedliche Agenten werden somit als Instanzen der Klassen AGENT dargestellt. Das interne Modell eines Agenten wird als Attribut vom Typ MODEL in der Klasse AGENT repräsentiert. Jede Instanz der Klasse AGENT verfügt über genau eine Instanz der Klasse MODEL. Zur Lösung einer konkreten ökonomischen Problemstellung wenden Agenten immer eine Instanz der Klasse TECHNOLOGY bestehend aus 1 bis n Instanzen der Klasse TECHNIQUE aus ihrem internen Modell an. Die Klasse MODEL und TECHNIQUE stehen somit in einer m:n-Beziehung, da unterschiedliche Techniken in unterschiedlichen Modellen existieren können.

Die Grundstruktur des internen Modells eines Agenten wird durch die Klasse EDUCATION bestimmt. Das Wachstum des internen Modells im Zuge der beruflichen Erfahrung wird hingegen durch die Klasse EXPERIENCE gesteuert. Ökonomische Problemstellungen werden durch Instanzen der Klasse PROBLEM verkörpert.

Unterschiedliche Probleme werden durch unterschiedliche Instanzen der Klasse PROBLEM repräsentiert und unterschiedliche Agenten können mit den gleichen Problemstellungen konfrontiert werden. AGENT und PROBLEM stehen demzufolge in einer m:n-Beziehung.

¹⁰ Auf eine Modellierung in Form von UML-Diagrammen wurde auf Grund des allgemeinen Charakters dieses Konzepts verzichtet.

Jede Instanz der Klasse TECHNOLOGY referenziert 1 bis n Instanzen der Klasse TECHNIQUE. Die gesamte Information, die für eine optimale Lösung notwendig ist, wird in einer Instanz der Klasse INFORMATION gehalten. Jeder Agent wählt jedoch nur eine Teilmenge der verfügbaren Informationen im Rahmen seiner Problemlösung aus. Die Klasse AGENT muss dafür eine entsprechende Methode bereitstellen. Neue Techniken werden dem internen Modell genau dann hinzugefügt, wenn ein Agent mit einer neuen Problemstellung konfrontiert wird und es im Zuge der Kombination von Techniken zum Zweck der Bildung einer Technologie zu einer Mutation kommt (siehe auch Kapitel 9.2.2).

Die Controllerklasse SIM_CONTROLLER muss die 1 bis n Instanzen der Klasse AGENT verwalten und gewährleistet darüber hinaus einen konsistenten Zustand der Simulation während der Laufzeit. Die Verarbeitung des Userinputs sowie die Ausgabe der Ergebnisse soll über die Klasse USER_INTERFACE gesteuert werden.

Beide genannten Klassen spielen eine wichtige Rolle in Bezug auf die Parametrisierung der Simulation. So soll beispielweise die Populationsgröße der Agenten über diese Klassen gesteuert werden. Im einfachsten Simulationsaufbau werden alle Agenten zum gleichen Zeitpunkt geboren und sterben auch zum gleichen Zeitpunkt. Jeder Agent lebt dabei stets t Sekunden.

9.4.2. Technische Modellierung der Agenten und ihres internen Modell

Jeder Agent innerhalb der Simulation muss über jeweils genau ein Referenzattribut vom Typ MODEL, EDUCATION sowie EXPERIENCE verfügen. Darüber hinaus verfügt jeder Agent über eine Datenstruktur, die Instanzen der Klasse TECHNOLOGY Instanzen der Klasse PROBLEM zuordnet. Ebenso wie in Bezug auf sein Modell hält jeder Agent genau eine Instanz der Klasse EDUCATION und EXPERIENCE in einem Attribut.

Das interne Modell des Agenten wird wie bereits erwähnt, durch die Klasse MODEL dargestellt. Jede Instanz der Klasse AGENT verfügt über genau ein internes Modell in Form einer Referenzvariablen vom Typ MODEL. Diese Referenzvariable repräsentiert ein Netzwerk an Instanzen der Klasse TECHNIQUE. Das Netzwerk kann verhältnismäßig leicht über Referenzen, die die Instanzen vom Typ TECHNIQUE verbinden, realisiert werden. Programmiertechnisch weist somit jede konkrete Instanz einen Zeiger auf eine andere Instanz des gleichen Typs auf. Diese Referenzen repräsentieren letztendlich die Verbindungen zwischen den unterschiedlichen Knoten des Netzwerkes bzw. des internen Modells. Programmiertechnisch kann das interne Modell beispielsweise über spezielle Referenzlisten realisiert werden. Für einige Beispiele zur Realisierung solcher Datenstrukturen siehe Ottmann und Widmayer (1996).

Die Anfangsmenge an Techniken, die dem Agenten zur Verfügung stehen bzw. die Grundstruktur des internen Modells, wird durch die Bildung des jeweiligen Agenten bestimmt. Die Bildung eines Agenten wird über dessen Referenzattribut vom Typ EDUCATION ausgelöst. Die Klasse AGENT muss dafür eine entsprechende Methode LEARN() zur Verfügung stellen. Die Klasse EDUCATION generiert in der Folge die Grundmenge an Techniken im internen Modell. Für die mathematischen Grundlagen zur Generierung des Netzwerkes siehe Kapitel 8.3.1 und 8.3.2. Je länger die Bildung ausgeführt wird, desto mehr Techniken (bzw. Knoten) mit vielen Verbindungen werden im internen Modell des jeweiligen Agenten generiert. Diese weisen daher einen hohen Grad im internen Modell des Agenten auf. Kürzere Ausbildungszeiten führen demnach zu einem internen Modell mit einer geringeren Menge an Techniken mit vielen Verbindungen bzw. einer geringeren Menge an Knoten mit hohen Graden. Die Dauer der Ausbildung bzw. die Laufzeit der Methode LEARN() der Klasse AGENT im Zusammenspiel mit der Klasse EDUCATION generiert demnach unterschiedliche interne Modelle.

Für eine erste konkrete Implementierung kann im Zusammenhang mit unterschiedlichen Ausbildungen beispielsweise folgende Differenzierung getroffen werden. Geht man von einem repräsentativen Individuum mit einer durchschnittlichen Lebenserwartung von rund 77 Jahren bei der Geburt (Bundeskammer für Arbeiter und Angestellte, 2011, S. 76) und einer Schulpflicht in Österreich ab dem 7. Lebensjahr sowie einem aktuellen gesetzlichen Pensionsantrittsalter von 65 Jahren aus, so bleiben 59 Jahre für Bildung und berufliche Erfahrung übrig. Unterscheidet man nun zwischen den Ausbildungsniveaus Pflichtschulabschluss (9 Jahre, kurz), Lehrabschluss und Matura (maximal 13 Jahre, mittel) sowie Universitäts- und Fachhochschulabschluss (maximal 21 Jahre, lang), so ergeben sich ausgehend von 59 zur Verfügung stehenden Jahren folgende Prozentsätze für die Ausbildungszeit der Agenten innerhalb der Simulation: Kurz 15,25%, mittel 22,03% und lang 35,60%. Diese Prozentsätze können als grobe Richtwerte für die Laufzeit der Methode LEARN() gemessen an der Lebenszeit der Agenten verwendet werden.

Nach der Generierung der Grundstruktur des internen Modells tritt der Agent annahmegemäß in das Arbeitsleben ein und sammelt Erfahrung. Der Erfahrungsprozess im Zuge der Arbeit wird durch das Attribut vom Typ EXPERIENCE im jeweiligen Agenten ausgelöst. Die Klasse AGENT soll hierfür eine Methode WORK() zu Verfügung stellen. Die Erfahrung bestimmt somit das Wachstum des internen Modells des Agenten im Zuge des Arbeitslebens.

9.4.3. Das Wachstum des internen Modells

Nun ist genauer zu diskutieren, wie das Wachstum des internen Modells programmiertechnisch gelöst werden kann. Hierzu muss das Zusammenspiel zwischen den identifizierten Klassen detaillierter erläutert werden.

Ökonomische Agenten sind im Laufe ihres Lebens mit unterschiedlichen ökonomischen Problemstellungen konfrontiert. Diese Problemstellungen werden durch Instanzen der Klassen PROBLEM repräsentiert. Die jeweilige ökonomische Problemstellung wird vom Agenten stets mit einer Technologie gelöst. Jede Instanz der Klasse AGENT verfügt in diesem Zusammenhang über eine Variable mit entsprechender Datenstruktur in der seine Technologien (Instanzen vom Typ TECHNOLOGY) und seine bisher gelösten Problemstellungen (Instanzen vom Typ PROBLEM) gemapped werden. Wird eine neue Problemstellung gelöst, so wird durch den Agenten ein Paar an Referenzen vom Typ TECHNOLOGY und PROBLEM in diese Datenstruktur hinzugefügt. Wird der Agent mit einer bereits durch ihn gelösten Problemstellung konfrontiert, so nutzt er die in der Vergangenheit von ihm verwendete Technologieinstanz, um diese bereits bekannte Problemstellung zu lösen. Die Instanz der Klasse TECHNOLOGY enthält dabei selbst eine Liste an Instanzen vom Typ TECHNIQUE, die die einzelnen Komponenten der jeweiligen Technologie repräsentieren.

Für eine erste konkrete Implementierung des Modells aus Kapitel 9.2.2 müssen einige programmiertechnische Annahmen in Bezug auf die Klassen PROBLEM, TECHNOLOGY, TECHNIQUE sowie INFORMATION getroffen werden.

Hierbei kann definiert werden, dass jedes konkrete ökonomische Problem innerhalb der Simulation in drei Schritten gelöst werden kann. Diese Schritte sind SORT, SEARCH und CALCULATE. Die Klasse TECHNIQUE muss zu diesen Schritten korrespondierende Methoden SORT(), SEARCH() und CALCULATE() zur Verfügung stellen.

Dieser Ansatz führt in der Folge dazu, dass jede Technologie auch immer nur aus drei Techniken besteht. Die Klasse TECHNIQUE benötigt demzufolge ein Attribut, welches ihren Typ (SORT, SEARCH oder CALCULATE) und in der Folge ihre Zuständigkeit für einen bestimmten Schritt definiert. Der Typ bestimmt dabei die jeweilige Methodenimplementierung der Klasse TECHNIQUE.

Die Informationen des Problemkontexts – repräsentiert durch genau eine Instanz der Klasse INFORMATION in der jeweiligen Instanz der Klasse PROBLEM – spielen bei der Lösung einer konkreten Probleminstanz eine wichtige Rolle. Hier wird auf Grund des Modells in Kapitel 9.2 definiert, dass jeder Agent immer nur eine Teilmenge der gesamten für die Problemstellung relevanten Informationen zur Lösung per Zufall oder nach einem bestimmten Algorithmus auswählt. Diese Gesamtmenge an Informationen muss von jeder Probleminstanz in einem Attribut vom Typ INFORMATION gehalten werden. Aus dieser wählt der jeweilige Agent im Zuge der Problemlösung eine Teilmenge aus. Die Klasse AGENT muss hierfür eine entsprechende Methode bereitstellen. Die Informationen in der Klasse INFORMATION stehen in direkter Beziehung zu den Lösungsschritten SORT und SEARCH. Im Fall von SORT können diese beispielweisen Informationen über die Sortierreihenfolge einer zu sortierenden Datenstruktur sein. Im Fall von SEARCH können es Parameter in Form von Schlüsselkriterien oder Fremdschlüsselkriterien für ein bestimmtes Suchproblem sein. Die Ergebnisse von SORT und SEARCH können wiederum zur Lösung eines bestimmten Berechnungsproblems in CALCULATE verwendet werden. Das Teilproblem CALCULATE in der Klasse PROBLEM kann beispielsweise den Code zur Lösung eines trivialen Rechenproblems, eines linearen Gleichungssystems oder einer anderen mathematischen Problemstellung beinhalten. Die Ergebnisse der zu SORT und SEARCH korrespondierenden Methoden können als Input für die korrespondierende Methode des Schritts CALCULATE fungieren.

Annahmegemäß wird der jeweilige Agent in bestimmten diskreten Zeitschritten mit neuen ökonomischen Problemstellungen konfrontiert. Neue Problemstellungen innerhalb der Simulation müssen dabei über eine Methode GET_NEW_PROBLEM() der Klasse PROBLEM generiert werden können.

Die Menge an Techniken, die zur Bildung einer Technologie genutzt wird, kann aus dem internen Modell beispielsweise nach folgendem Muster vom Agenten ausgewählt werden: Im ersten Schritt werden n Instanzen der Klasse TECHNIQUE ausgewählt, die mit jener Technik via Referenz verbunden sind, die über den höchsten Grad im internen Modell verfügt. Aus dieser Menge werden wiederum n Instanzen zur Erzeugung einer Instanz der Klasse TECHNOLOGY verwendet. Diese wird in der Folge auf die neue Probleminstanz angewendet. Kann die Problemstellung durch die Technologie gelöst werden, so wird die Technologie der Liste an Technologie und gelöster Probleme des Agenten hinzugefügt. Sollte das Problem nicht gelöst werden können, so werden nach dem gleichen Muster n Techniken ausgewählt, die mit der Technik, die über den zweithöchsten Grad im internen Modell verfügt, ausgewählt (usw.). Dieser Prozess setzt sich solange fort, solange Techniken mit einem Grad ≥ 3 im internen Modell existieren und solange für die Schritte SORT, SEARCH sowie CALCULATE mindestens eine Technik verfügbar ist. Die Klasse MODEL muss in diesem Zusammenhang eine Methode GET_DEGREES() bereitstellen. Diese ermöglicht die Ermittlung der Techniken und ihrer Grade für das jeweilige interne Modell.

Durch einen Zufallsparameter soll gesteuert, ob es bei der Kombination von Techniken mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu einer Art Mutation kommt. Dabei wird der Code zweier Technikinstanzen, die in Bezug auf ihren Attributwert SORT, SEARCH oder CALCULATE übereinstimmen, kombiniert. Diese Kombination kann positiv oder negativ sein. Positive Kombinationen sind grundsätzlich lauffähig bzw. ausführbar. Negative sind hingegen nicht lauffähig und erfordern programmiertechnisch eine entsprechende Ausnahmebehandlung. Sofern eine positive Kombination die jeweilige aktuelle Problemstellung des Agenten löst, so wird eine neue Instanz von TECHNIQUE dem internen Modell hinzugefügt. Neue Techniken, die das Problem nicht lösen können, werden ignoriert. Die neu instanziierte Technik wird stets mit jener Technik verbunden, die den höchsten Grad

innerhalb der Menge an Techniken aufweist, die für die Bildung der Technologie ausgewählt wurden.

Die programmiertechnische Herausforderung liegt hierbei in der Formulierung des Algorithmus, der die Kombination der Techniken bzw. ihrer Implementierungen realisiert. Im einfachsten Fall kann diese Kombination über eine weitere Strukturierung der Schritte SORT; SEARCH und CALCULATE in kombinierbare Teilschritte bzw. Methoden erzielt werden. Ausgefeilter Lösungen können genetische Algorithmen berücksichtigen, wobei dieser Ansatz auch Auswirkungen auf das Design der Klasse PROBLEM hat. Für eine Einführung in genetische Algorithmen siehe beispielsweise MacKay (2004, S. 269—280).

Neben dem Generieren von neuen Techniken ist auch der Prozess des Vergessens im erarbeiteten Modell von Bedeutung. Agenten müssen in dieser Simulation daher auch in der Lage sein bestimmte Techniken zu vergessen. Die Klasse AGENT muss hierfür eine eigene Methode FORGET() zur Verfügung stellen. Darüber hinaus muss die Klasse MODEL das Löschen von Techniken mittels einer eigenen Methode unterstützen. Ein erster Ansatz für die Modellierung des Vergessens besteht darin, die Methode FORGET() generell per Zufall im Bildungs- und Erfahrungsprozess des Agenten auszuführen. Dabei sollten früher generierte Techniken mit einer höheren Wahrscheinlichkeit aus dem internen Modell des Agenten gelöscht werden.

9.4.4. Mögliche Erweiterungen der Simulation

In diesem Kapitel wird abschließend noch kurz auf mögliche Erweiterungen der agentenbasierten Simulation eingegangen.

Auf der einen Seite können unterschiedliche Arten von Agenten mit unterschiedlichen Fähigkeiten (genauer, klüger etc.) leicht abgebildet werden. Auf der anderen Seite können Unterschiede in Bezug auf ihre Lebenszeit einfach realisiert werden. Des Weiteren können Phänomene wie Arbeitslosigkeit oder Ausbildungsabbrüche eingeführt werden. Ersteres reduziert die Zeit der beruflichen Erfahrung des Agenten und Letzteres reduziert die Ausbildungszeit des Agenten und daher die Grundmenge an Techniken in seinem internen Modell. Darüber hinaus können verhältnismäßig leicht Effekte der Weiterbildung parallel zu einer Beschäftigung mit Hilfe der Klasse EDUCATION in der Simulation abgebildet werden. Neben der reinen Dauer der Ausbildung kann auch die Art der Ausbildung im Sinne einer stark theoretischen oder praxisbezogenen Bildung berücksichtigt werden. Hier könnte beispielsweise definiert werden, dass eine stark praxisorientierte Bildung des Agenten mehr Techniken vom Typ SEARCH oder SORT im internen Modell generiert. Stark theoretisch orientierte Ausbildungen würden im Gegenzug mehr Techniken vom Typ CALCULATE generieren.

Darüber hinaus bieten sich unterschiedliche Muster für den Prozess des Vergessens an. In diesem Zusammenhang können unterschiedliche Modelle durch ein eigenes Klassenkonzept abgebildet werden.

Effekte einer Informationsflut denen die Agenten beispielweise durch das Internet oder das Mobiltelefon ausgesetzt sind, können über die Klasse INFORMATION abgebildet werden. Beispielsweise kann die Menge an Informationen zur Problemlösung mit irrelevanten Informationen künstlich erhöht werden.

10. Persönliche Meinung und Schlussfolgerungen für die Politik

Im Allgemeinen ist die Wirtschaftspolitik für die Schaffung eines stabilen institutionellen Rahmens sowie für die Formulierung einer zielgerichteten Strategie verantwortlich. Im Kontext technologischen Fortschritts sind dabei vor allem Strategien für Bildung sowie für F&E notwendig. Die Bildungspolitik nimmt dabei eine Sonderstellung ein, da sie am Anfang des Transmissionsmechanismus von Wissen und Wachstum steht. Bildung repräsentiert daher das zentrale Instrument einer kohärenten Wirtschaftspolitik, die sich Wirtschaftswachstum als primäres Ziel gesetzt hat. Die Bedeutung von Bildung ist in diesem Kontext oft nicht direkt ersichtlich. Ein Grund hierfür ist mitunter die enorme zeitliche Verzögerung von Effekten, die bildungspolitische Maßnahmen haben. Fehlerhafte Strategie und Konzepte schlagen sich oftmals erst Jahr später in den Wirtschaftsindikatoren nieder. Darüber hinaus ist ein kausaler Zusammenhang meist nur schwer empirisch nachweisbar.

Nichtsdestotrotz herrscht in Europa und insbesondere in Österreich offensichtlich politischer Konsens in Bezug auf die Notwendigkeit eine effiziente bildungspolitische Strategie zu formulieren. Über die einzelnen Elemente und die passenden Instrumente herrscht jedoch weitestgehend Uneinigkeit. Vermutlich erfährt das Thema Bildung gerade wegen des schwachen Wachstums in Europa in jüngster Zeit wieder eine enorme Aufmerksamkeit in der medialen Debatte. Im Vordergrund der Diskussion steht dabei in erster Linie die Qualität des Bildungssystems.

Nachfolgend werden im Licht dieser Dissertation einige Aspekte in diesem Zusammenhang detaillierter diskutiert, die auch einige Schlussfolgerungen für die Wirtschafts- und Bildungspolitik zulassen.

In Zeiten großer politischer Unstimmigkeiten auf europäischer Ebene und massiven Wirtschaftskrisen ist eine Wirtschaftspolitik, die sich auf langfristige Wachstumsfaktoren konzentriert, von entscheidender Bedeutung. Aus wirtschaftspolitischer Sicht repräsentiert technologischer Fortschritt den zentralen Wachstumsfaktor. Das Generieren kontinuierlicher Innovationen kann kontinuierliches Wachstum sicherstellen. Technologischem Fortschritt muss in der Folge eine sehr hohe Priorität aus politischer Sicht eingeräumt werden. Um diesen zu erreichen, ist jedoch eine Konzentration auf die Produktion und Akkumulation von Wissen notwendig. Dabei geht es insbesondere um technologisches Wissen. Neues Wissen muss in diesem Zusammenhang als Quelle technologischen Fortschritts verstanden werden. Es führt zu technologischem Fortschritt und ermöglicht im letzten Schritt Wachstum ohne die Notwendigkeit einer Erhöhung der Faktoren Kapital und Arbeit. Die Politik hat der engen Beziehung zwischen Wissen und Technologie somit besondere Beachtung zu schenken. Aus wirtschaftspolitischer Sicht ist dabei im Detail der Aufbau von Humankapital entscheidend. Neue Technologien können zwar mit Hilfe der IKT über das Internet immer leichter importiert werden, jedoch erfordert die effiziente Anwendung und Weiterentwicklung dieser Technologien entsprechendes Humankapital. Dieses kann nur in beschränktem Rahmen durch den Import qualifizierte Arbeitskräfte sichergestellt werden. Dabei gilt es auch zu beachten, dass der Faktor Arbeit aus diversen wirtschaftlichen und sozialen Gründen wesentlich immobil ist, als teilweise angenommen wird. Des Weiteren muss beachtet werden, dass vor allem die Weiterentwicklung dieser Technologien tiefes Grundlagenwissen erfordert. Bildung und damit der Aufbau von Humankapital innerhalb des eigenen Landes spielt dabei offensichtlich eine zentrale Rolle.

Die Förderung endogenen technologischen Fortschritts ist für Länder wie Österreich, mit einem hohen Faktorpreis für Arbeit (insbesondere auf Grund eines flächendeckenden Sozialsystems), somit wohl eines der wenigen vertrauenswürdigen wirtschaftspolitischen Ziele. Trägt es doch das Potential in sich, Ländern mit vergleichsweise hohen Faktorpreisen und begrenzten Mitteln an Land und Boden die globale Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen.

Für die Wirtschaftspolitik eines Landes wie Österreich führt dies somit zu einer zentralen Schlussfolgerung. Es muss ein institutioneller Rahmen sowie ein gesellschaftliches Klima geschaffen werden, welches Bildung forciert und F&E fördert. In erster Linie bedeutet dies die Schaffung eines klar strukturierten nationalen Innovationssystems in dem der Schwerpunkt auf dem Thema Bildung liegt.

Üblicherweise wird in derartigen Diskussionen primär die Stärkung von F&E auf der Ebene der Unternehmen sowie die Rolle von Patent- und Eigentumsrechten betont. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass diese Punkte zeitlich im Prozessablauf weit nach den Effekten von Bildung zum Tragen kommen. Die Gewährung von Patent und Eigentumsrechten ist beispielsweise einer der letzten Schritte im Innovationsprozess. Zweifelsfrei gilt, dass Unternehmen, die keine rechtliche Sicherheit in Bezug auf ihr geistiges Eigentum bzw. an ihren Innovationen haben, auch nicht ausreichend in F&E investieren. Das Humankapital, welches diese Innovationen generiert, wird jedoch durch Bildung und (berufliche) Erfahrung geschaffen. Darüber hinaus erfordert die steigende technologische Komplexität auch immer besser ausgebildete Arbeitskräfte. Immer höher qualifiziertes Humankapital ist somit notwendig. Eine bildungspolitische Strategie, die diese Aspekte berücksichtigt, ist daher dringend erforderlich.

Eine Strategie mit Zukunftscharakter muss dabei grundsätzlich alle Ausbildungsebenen fördern und stärken. In Österreich bedeutet dies, dass man im Rahmen des sogenannten Dualen-Systems sowohl die Lehre bzw. berufsorientierte Bildung als auch die Hochschulbildung verbessern muss. Neben der schulischen und universitären Bildung muss somit auch die Bildung im Rahmen der Betriebe und Berufsschulen gefördert werden. Dies ist jedoch kostspielig. Eine derartige Strategie muss daher in einem ersten Schritt den finanziellen Rahmen sicherstellen. Dieser muss primär gewährleisten, dass entsprechende Ressourcen sowohl für die Lehre als auch für die Forschung zur Verfügung stehen. Dies gilt prinzipiell für alle Ebenen des Bildungssystems, insbesondere jedoch für das Hochschulsystem. Da sich die mediale Debatte in diesem Zusammenhang stark auf die Hochschulbildung konzentriert, liegt diese im Fokus der restlichen Ausführungen.

In den vergangenen Jahren wurden die Privatisierung von Hochschulen sowie die Verschulung der tertiären Bildung in Österreich stark diskutiert und auch teilweise umgesetzt. Diese Tendenz ist kritisch zu beurteilen.

Öffentliche Universitäten sollen und müssen die Freiheit der Lehre und insbesondere den Fortschritt in der Grundlagenforschung gewährleisten. Dies ist jedoch nur mit einem gewissen Maß an Freiraum in der Lehre und Forschung möglich. Privatwirtschaftliche Bildungseinrichtungen haben im Allgemeinen nicht diesen Fokus und Anspruch. In der Folge besteht die Gefahr, dass es zu einem Ausdünnen des Grundlagenwissens kommt. Dabei gilt es zu beachten, dass die Grundlagenforschung langwierig und kostenintensiv ist. Einrichtungen, die über private Gelder finanziert werden, stehen oft unter einem enormen kurz- bis mittelfristigen Erfolgsdruck, der kaum Spielraum für „echte“ Forschung lässt. Es sind jedoch häufig genau jene Anstrengungen, welche in letzter Konsequenz technologischen Fortschritt erzielen und radikale Innovationen hervorbringen.

Eine starke Verschulung des Hochschulsystems beschränkt die Entfaltung und Vertiefung persönlicher Interessen. Langfristig wird dadurch die gesamte Wissensbasis bis zu einem gewissen Grad homogenisiert. Für die Innovationstätigkeit ist allerdings Heterogenität wichtig und notwendig. In Bezug auf die Universitäten bedeutet dies jedoch nicht, dass Studienpläne nur mehr freie Wahlfächer vorsehen sollten. Eine große Auswahl an gebundenen Spezialisierungsmöglichkeiten im Rahmen von Wahlfachkombinationen wäre allerdings sinnvoll.

In diesem Zusammenhang ist auch die starke Förderung von Fachhochschulen (teilweise zum Nachteil der Universitäten) und der zwanghafte Versuch diverser Akteure diese Bildungsinstitutionen mit Universitäten gleichzustellen kritisch zu beurteilen. Beide Institutionen können wichtige, allerdings unterschiedliche Beiträge leisten. Fachhochschulen konzentrieren sich in erster Line auf die anwendungsorientierte Forschung und Lehre und sind somit bis zu einem gewissen Grad von den Ergebnissen der Grundlagenforschung abhängig. Ein zu einseitiger Schwerpunkt führt über Kurz oder Lang zu einer zu schwachen Grundlagenforschung. In letzter Konsequenz bedeutet dies eine zu schwache Grundlage für technologischen Fortschritt. Eine klare Abgrenzung der Schwerpunkte von Universitäten und Fachhochschulen sowie eine Koordination der bildungspolitischen Aufgaben auf gesamtwirtschaftlicher Ebene sind erstrebenswert und notwendig.

In einem Land mit einem weitestgehend öffentlichen Bildungssystem, erfordert eine bildungspolitische Strategie somit allen voran enormen Steuermittel, die es effizient zu investieren gilt. Um diese Investitionen ohne massiven gesellschaftlichen Widerstand tätigen zu können, ist zunächst politisch Überzeugungsarbeit notwendig. Erst bis die Vorteile eines besseren und größeren Bildungssystems klar kommuniziert wurden, ist eine breite gesellschaftliche Akzeptanz möglich. Auch ist ein gesellschaftliches Umdenken in diesem Zusammenhang notwendig. Nicht das höhere Ansehen auf Grund eines Universitätsabschlusses ist von Bedeutung, sondern die tatsächliche Kompetenz sowie Qualifikation der Absolventen. In Bezug auf diese Punkte werden in den wenigsten Fällen überzeugende Argumente für den Einzelnen seitens der Politik genannt.

Eine nachvollziehbare Argumentation für das Forcieren der Hochschulbildung ist die immer höhere Komplexität der Arbeits- bzw. Berufswelt. Zukunftsträchtige Jobs sind in der Regel mit immer höhere Anforderungen in Bezug auf die Problemlösungskompetenz des Einzelnen verknüpft. Die gestiegenen Anforderungen sind daher auch nicht auf bestimmte Berufssparten begrenzt. Der Aufbau dieses Wissens und dieser Fähigkeiten erfordert im Allgemeinen eine lange und intensive Ausbildung. Dabei ist insbesondere ein gewisses Maß an Eigeninitiative beim selbständigen Wissenserwerb entscheidend. Dies wird in Zukunft eine der zentralen Schlüsselqualifikationen sein. Der Erwerb dieser Fähigkeiten und das damit verbundene Wissen stehen auf Universitäten im Vordergrund. Ihr Beitrag ist daher für die potentielle Innovationfähigkeit innerhalb einer Ökonomie von besonderer Bedeutung. Der Zugang zu Universitäten ist daher auch zu forcieren und nicht wie von diversen Politikern in der aktuellen medialen Debatte gefordert zu beschränken. Dass diese Investition mit hohen Kosten verbunden ist, liegt auf der Hand. Die zukünftigen Erlöse dieser Investition übersteigen jedoch bei Weitem die (zugegebenermaßen hohen) Kosten und kommen in Form von technologischem Fortschritt allen zu Gute. Langfristig werden dadurch das Wachstumspotential Österreichs und damit das Einkommen aller gesichert. Schlussendlich gewährleistet dies den Wohlstand der gesamten Gesellschaft.

11. Zusammenfassung

Technologischer Fortschritt ist von enormer Bedeutung für das Wirtschaftswachstum. Diese Aussage wird sowohl durch die Ergebnisse der theoretischen Wirtschaftsforschung als auch durch die Resultate etlicher empirischer Untersuchungen untermauert. Auf Basis einer Vielzahl an Arbeiten lässt sich daher argumentieren, dass der erhöhte Input der Produktionsfaktoren Kapital und Arbeit zu verhältnismäßig geringeren Beiträgen am Outputwachstum führt, als der des technologischen Fortschritts. Dies gilt insbesondere für Europa und ist vor allem für kleine Länder — wie z. B. Österreich — mit beschränkten Ressourcen in Bezug auf Kapital und Arbeit von enormer wirtschaftspolitischer Relevanz. Bedeutet es doch, dass diese Länder durch die Konzentration auf technologischen Fortschritt mittels Bildung sowie F&E dauerhaftes Wachstum sicherstellen können.

Die wirtschaftswissenschaftliche Untersuchung technologischen Fortschritts hat eine relativ lange Geschichte. Die Wachstumstheorie erkannte den enormen Stellenwert technologischen Fortschritts bereits in den 1960er Jahren. Zentrale Strömungen sind dabei die exogene (auch neoklassische), die endogene (auch neue) sowie die evolutionäre Wachstumstheorie. In den Modellen der exogenen Wachstumstheorie wird technologischer Fortschritt allerdings nur als exogener Prozess modelliert (Solow, 1956, 1957). Die endogene Wachstumstheorie nahm sich diesem Problem etwas später an und entwickelte Modelle in denen die Veränderung der Technologie aus den Modellen heraus erklärt wird (Romer, 1986, 1990; Aghion und Howitt, 1999, 2009). Die evolutionäre Wachstumstheorie ging noch einen Schritt weiter und definierte technologischen Fortschritt bzw. allgemein Innovationen als Dreh- und Angelpunkt wirtschaftlicher Entwicklung (Schumpeter, 1939; Nelson und Winter, 1982; Goodwin, 1965, 1990).

Obwohl Konsens innerhalb der unterschiedlichen Strömungen über die enorme Bedeutung neuer und verbesserter Technologien herrscht, existiert keine Einigkeit über die genauen Quellen sowie die Struktur dieses Prozesses. In dieser Diskussion weist Mokyr darauf hin, dass neues Wissen und neue Technologien in einer extrem engen Beziehung zueinander stehen und argumentiert „technology is knowledge“ (Mokyr, 2002b, S. 2). Ayres und Warr (2009) sowie Karlsson et al. (2012) weisen in diesem Kontext darauf hin, dass ein starkes kontinuierliches Wachstum an Technologien sowie ein exponentielles Wachstum an Wissen in den letzten Jahren verzeichnet werden kann. Nelson und Phelps (1966) betonten in Bezug auf dieses Wachstum die enorme Bedeutung von Investitionen in das Humankapital in Form von Bildung und Training. Diese Investitionen generieren mittel- bis langfristig positive Effekte hinsichtlich der Innovationsfähigkeit sowie der technologischen Problemlösungskompetenz der Individuen innerhalb der Ökonomie. Dies führt wiederum zu einem schnelleren technologischen Fortschritt. Dabei gilt es zu beachten, dass dieser in letzter Konsequenz von ökonomischen Agenten auf der Mikroebene durch die Generierung von neuem Wissen ausgelöst wird. Netzwerkstrukturen spielen dabei eine zentrale Rolle. Hierzu ist der Beitrag von Arthur und Polak (2004) bedeutsam. Sie modellieren die Evolution der Technologie als Wachstum eines Netzwerkes, wobei die Rolle der Kombination existierender Technologien für technologischen Fortschritt – ebenso wie bei Strumsky et al. (2011) – im Fokus steht. Sie gehen allerdings nicht auf die direkte Beziehung zwischen Wissen und Technologie ein. Hanappi (2008a) weist wiederum darauf hin, dass Wissen im ökonomischen Kontext als Netzwerk verstanden werden kann. Darüber hinaus betonen Arthur (2000) und Hanappi (2008a, 2011b) in diesem Zusammenhang eine Art Speicher bzw. ein internes Modell ökonomischer Agenten, welches von diesen für ihre wirtschaftliche Aktivität genutzt wird.

Es gilt somit, dass neues Wissen letztendlich die Quelle technologischen Fortschritts ist, wobei es zu beachten gilt, dass sich die für ökonomische Agenten verfügbare Menge an Informationen sowie der Zugang zu diesen in den letzten Jahren massiv durch die

Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) verändert hat (Smith, 2002; Bassanini et al., 2000). Phänomene wie das Internet oder das Mobiltelefon haben unmittelbare Auswirkung auf die verfügbare Menge an Informationen sowie auf den Zugang zu diesen. Dies hat wiederum unmittelbaren Einfluss auf die Generierung von Wissen und daher auch auf technologischen Fortschritt. Auch hier spielen Netzwerkstrukturen eine zentrale Rolle. Die IKT repräsentiert sozusagen eine Art Wissenstechnologie (Mokyr, 2002b, S. 113), die durch die Schaffung neuer Sektoren sowie durch die Modifikation der wirtschaftlichen „Spielregeln“ die Struktur des Wirtschaftssystems massiv verändert hat (Arthur, 1996; Varian, 2001). Sie nimmt somit eine Sonderstellung unter den Technologien ein und hat einen massiven Einfluss auf das Wachstum moderner Ökonomien.

Letztendlich sind all die zuvor genannten Aspekte für ein besseres Verständnis des Zusammenhangs zwischen Wissen, technologischem Fortschritt und ökonomischem Wachstum von zentraler Bedeutung. Aus diesem Grund wird in dieser Dissertation aufbauend auf einer genauen Analyse der zentralen Beiträge der exogenen, endogenen und evolutionären Wachstumstheorie sowie der Netzwerktheorie ein kohärentes Framework zur Analyse technologischen Fortschritts für die Makro- und Mikroebene erarbeitet, wobei die enge Beziehung zwischen Wissen und Technologie betont wird. Der genauen Analyse der Rolle der IKT wird dabei im gesamten Framework besondere Beachtung geschenkt.

Die Analyse auf der Makroebene des Frameworks konzentriert sich auf die verfügbaren Technologien und auf das innerhalb einer Ökonomie verfügbare Humankapital. Die Analyse bedient sich dabei eines Modells auf Basis einfacher Differentialgleichungen. Hierbei wird argumentiert, dass die Veränderung der (gesamtwirtschaftlichen) Technologie durch die Kombination bestehender sowie durch die Entwicklung völlig neuer Technologien getrieben wird. In Bezug auf die Veränderung des Humankapitals wird hingegen argumentiert, dass dieses von explizitem und implizitem Wissen bestimmt wird. Ersteres resultiert primär aus Bildung und letzteres vorrangig aus beruflicher Erfahrung.

Die Analyse auf der Mikroebene des Frameworks geht einen Schritt weiter und konzentriert sich auf die Struktur von Wissen sowie die Informationsverarbeitung ökonomischer Agenten und stellt eine direkte Verbindung im Rahmen eines Modells zwischen Wissen und Technologien her. Dabei wird insbesondere die Rolle des internen Modells ökonomischer Agenten betont, auf dessen Basis diese wirtschaftliche Problemstellungen lösen. Technologien werden dabei als Wissensstrukturen des internen Modells interpretiert, die aus einzelnen Techniken bzw. Wissensentitäten bestehen. Im Detail wird argumentiert, dass das interne Modell als ein skalenfreies Netzwerk repräsentiert werden kann, dessen Wachstum durch Bildung und berufliche Erfahrung bestimmt wird. Ein evolutionärer Prozess spielt dabei eine entscheidende Rolle.

Darüber hinaus wird ein allgemeines Konzept für eine agentenbasierte Simulation des Modells der Mikroebene vorgestellt, welches als Basis für weiterführende Arbeiten dienen kann. Abschließend werden persönliche Schlussfolgerungen für die Wirtschafts- und Bildungspolitik gezogen.

Schlussendlich kann festgehalten werden, dass technologischer Fortschritt als wichtigster Wachstumsfaktor verstanden werden muss. Dieser hat jedoch seinen Ursprung in neuem Wissen. Die direkte Beziehung zwischen Wissen und Technologie ist dabei entscheidend. Im makroökonomischen Kontext wird die Bedeutung von Wissen primär in Form von Technologien und Humankapital sichtbar. Hierbei gilt es jedoch zu beachten, dass die Struktur von Wissen zentral ist. Diese ist durch die internen Modelle ökonomischer Agenten gegeben und ist ein Resultat ihrer Aktivitäten auf der Mikroebene. Das Wissen ökonomischer Agenten und somit ihre Fähigkeit wirtschaftliche und letztendlich technologische Problemstellungen zu lösen, wird maßgeblich durch Bildung und berufliche Erfahrung

bestimmt. Die IKT produziert dabei sowohl positive als auch negative Effekte. In der Diskussion über gesamtwirtschaftliche Wachstumsprogramme werden diese Aspekte leider häufig aus den Augen verloren. Die Wirtschafts- und vor allem die Bildungspolitik haben diesem Zusammenhang jedoch besondere Beachtung zu schenken, trägt er doch das Potential in sich ökonomisches Wachstum langfristig zu gewährleisten und dadurch den Wohlstand einer Gesellschaft zu sichern.

12. Literaturverzeichnis

- Acs** Zoltan J., **Carlsson** Bo, **Audretsch** David B., **Braunerhjelm** Pontus, **2007**, *The knowledge filter, entrepreneurship, and economic growth*, CESIS Electronic Working Paper Series, Paper 104
- Aghion** Philippe, **Howitt** Peter, **1992**, *A Model of Growth through Creative Destruction*, *Econometrica* 60, S. 323—351
- Aghion** Philippe, **Howitt** Peter, **1999**, *Endogenous Growth Theory*, third printing 1999, 1998 Massachusetts Institute of Technology, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England
- Aghion** Philippe, **Howitt** Peter, **2009**, *The Economics of Growth*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England
- Aiginger** Karl, **2008**, *Positionierung Österreichs in einer globalen Wirtschaft*, Vortrag im Rahmen eines Privatissimum an der Technischen Universität Wien, 13.11.2008, Organisiert vom Institut für Wirtschaftsmathematik an der Technischen Universität Wien unter der Leitung von Prof. Hardy Hanappi.
- Albert Réka**, **Barabási** Albert-László, **2001**, *Statistical Mechanics of Complex Networks*, *Reviews of Modern Physics* 74 (2002), S. 47—97
- Antonelli** Cristiano, **Amidei** Federico Barbiellini, **2011**, *The Dynamics of Knowledge Externalities Localized Technological Change in Italy*, Edward Elgar Publishing Limited, Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA
- Arthur** Brian W., **1996**, *Increasing Returns and the Two Worlds of Business*, *Havard Business Review*, July—August, 1996, S. 100—109
- Arthur** Brian W., **2000**, *Cognition: the Black Box of Economics*, Chapter 3 in *The Complexity Vision and the Teaching of Economics*, David Colander (ed.), Edward Elgar Publishing, Northampton, MA
- Arthur** W. Brian, **Polak** Wolfgang, **2004**, *The Evolution of Technology within a Simple Computer Model*, Santa Fe Institute Working Paper 2004-12-042, December 17, 2004
- Audretsch** David B., **Welfens** Paul J. (Eds.), **2002**, *The New Economy and Economic Growth in Europe and the US*, American and European Economic and Political Studies, Verlag Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- Axelrod** Robert, **Testfatsion** Leigh, **2005**, *A Guide for Newcomers to Agent-Based Modeling in the Social Sciences*, in: Testfatsion Leigh und Judd L. Kenneth (Eds.), *Handbook of Computational Economics*, Vol. 2: Agent-Based Computational Economics, Appendix A, S. 1647—1659, *Handbooks in Economics Series*, North-Holland, Amsterdam, the Netherlands

Ayres Robert U., Warr Benjamin, 2002a, *Useful Work and Information as Drivers of Growth*, INSEAD Working Paper 2002/121 EPS/CMER, Version: 4. November 2002

Ayres Robert U., Warr Benjamin, 2002b, *Economic Growth Models and the Role of Physical Resources*, INSEAD Working Paper 2002/53/EPS/CMER, Version: 18. August 2001

Ayres Robert U., Warr Benjamin, 2009, *The Economic Growth Engine How Energy and Work Drive Material Prosperity*, paperback edition 2010, Edward Elgar Publishing Limited, Cheltenham, UK, Northampton, MA, USA

Baetjer Howard Jr., 1997, *Software as Capital: An Economic Perspective on Software Engineering*, Wiley-IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California

Bailey Ronald, 2007, *The Law of Increasing Returns, The Human Footprint- Has Civilization Gone Too Far?*, Speech on Tuesday 13. Feb. 2007 at The New School, The NY salon, Download:

http://www.nysalon.org/speakerpapers/RONBaileyThe_Law_of_Increasing_Returns.pdf, 16.06.2012

Balconi Margherita, Pozzali Andrea, Viale Riccardo, 2007, *The “codification debate” revisited: a conceptual framework to analyze the role of tacit knowledge in economics*, Industrial and Corporate Change, Volume 16, No. 5, S. 823—849

Barabási Albert-László, Barzel Baruch, Martino Mauro, 2012, *Network Science, Class 7: Evolving Network Models*, Online Kursmaterial von Barabási Albert-László, Download: http://barabasilab.neu.edu/courses/phys5116/content/Class7_NetSci_2012/07_CLASS_2012_BAmodel.pdf, 27.04.2013

Barabási Albert-László, Albert Réka, 1999, *Emergence of Scaling in Random Networks*, Science, Vol. 286, 15. October 1999, S. 509—512 in **Newman et al., 2006**, S. 349—352

Barabási Albert-László, Bonabeau Eric, 2003, *Scale-Free Networks*, Scientific America May 2003, S. 50—59

Barro Robert J., Sala-i-Martin Xavier, 2004, *Economic Growth*, Second Edition, The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England

Bassanini Andrea, Scarpetta Stefano, Visco Ignazio, 2000, *Knowledge, Technology and Economic Growth: Recent Evidence from OECD Countries*, NBB Working Paper No. 6 – May 2000, National Bank of Belgium, Working Paper – Research Series, Conference on “How to promote economic growth in the euro area?”, 11. – 12. May 2000 in Brussels

Becker Markus C., 2003, *The concept of routines twenty years after Nelson and Winter (1982) A review of the literature*, Department of Marketing, University of Southern Denmark, DK-5230 Odense M, Denmark, Druid Working Paper 03-06

Becker Markus C., 2005, *The concept of routines: some clarifications*, Cambridge Journal of Economics 2005, 29, No. 2, S. 249—262

Berg Maxine, **2006**, *The Genesis of 'Useful Knowledge'*, University of Warwick, UK, XIV International Economic History Congress, Helsinki 2006, Session 38, in: The genesis of 'useful knowledge'. *History of Science*, 2007, Vol.45 (No.148 Part 2). S. 123—133

Berninghaus K. Siegfried, **Ehrhart** Karl-Martin, **Güth** Werner, **2002**, *Strategische Spiele Eine Einführung in die Spieltheorie*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York

Birchler Urs, **Bütler** Monika, **2007**, *Information Economics*, Routledge advanced Texts in Economics and Finance, Taylor and Francis Group, London und New York

Blanchard Oliver, **2003**, *Macroeconomics*, Third Edition, Prentice Hall, Pearson Education International

Böhm Bernhard, **2008**, *Input Output Analyse Vorlesungsnummer 110.594 Vorlesungsbehef Version 2008*, Technischen Universität Wien

Boisot Max, **Canals** Augustí, **2004**, *Data, information and knowledge: have we got it right?*, Working Paper Series WP04-002, Published in: February 2004, Internet Interdisciplinary Institute (IN3)

Bundeskammer für Arbeiter und Angestellte, **2011**, *Wirtschafts- und Sozialstatistisches Taschenbuch 2011*, Überreuter Verlag

Caldarelli Guido, **2007**, *Scale-Free Networks complex webs in nature and technology*, Oxford University Press

Cameron Gavin, **1998**, *Innovation and Growth: a survey of the empirical evidence*, Oxford University, Download: <http://www.nuff.ox.ac.uk/users/cameron/papers/empiric.pdf>, 01.10.2009

Cappellin Riccardo, **2012**, *Knowledge creation and innovation in medium-technology clusters*, in: **Karlsson et al.**, **2012**, S. 157—184

Carlin Wendy, **2009**, *Note on growth and growth accounting*, UCL Kursmaterial zu ECON3018 "Europe: Economic Policy and structural Change", www.ucl.ac.uk, Download: http://www.ucl.ac.uk/~uctpa36/C41_note_growth_accounting.pdf, 29.4.2011

Clement Werner, **2006**, *Welche Rolle spielen Forschung, Technologie und Innovation in der Wirtschaft?*, in Ackerl Isabella, Lehner Johann, Sachslehner Johannes, (Hrsg.), 2006, *Wissen! Antworten auf unserer großen Fragen*, Verlag Styria, S. 357 f.

Cornett Andreas P., **Sørensen** Karls Nils, **2012**, *Innovation and regional disparities – a survey of regional growth drivers and economic performance*, in: **Karlsson et al.**, **2012**, S. 81—108

Cortright Joseph, **2001**, *New Growth Theory Technology and Learning: A Practitioners Guide*, Reviews of Economic Development Literature and Practice: No. 4, U.S. Economic Development Administration, Impresa Inc.

Cowan, David und Foray, 1999, *The Explicit Economics of Knowledge Codification and Tacitness*, Paper präsentiert am 3rd TIPIK Workshop in Strasbourg an der BETA-Universität Lous Pasteur, 24. April 1999, Version: Mai 1999

Crafts Nicholas F. R., 2003, *Quantifying the Contribution of Technological Change to Economic Growth in Different Areas: A Review of the Evidence*, Economic History Working Papers, 79/03, Department of Economic History, London School of Economics and Political Science, London, UK

Crafts Nicholas F. R., 2008, *Solow and Growth Accounting: A perspective from quantitative economic history*, Revised draft of the paper for the HOPE Conference, April 2008, 20th Annual History of Political Economy Conference: Robert Solow and the Development of Growth Economics, Duke University, 25—27 April 2008, in: *History of Political Economy*, Vol.42 (Suppl. 1), S. 200—220

Dang Duc, 2007, *The concept of knowledge in Economics: A Historical Overview*, Proceedings of KSS'2007, The Eighth International Symposium on Knowledge and Systems Sciences, November 5—7, 2007, Ishikawa High-Tech Conference Center, Nomi, Ishikawa, Japan

Darwin Charles, 1859, *Origins of species by means of natural selection on the preservation of favoured races in the struggle for life*, John Murray, London

David Paul, Metcalfe Stan, 2009, *How the universities can best contribute to enhancing Europe's innovative performance?*, in: **Europäische Union, 2009**, S. 44—48

de Castro Steve, 1998, *Technological Implications of New Growth Theory for the South, Cooperation South*, , UNDP, New York, Number Two, S. 68—79

de Solla Price Derek J., 1965, *Networks of Scientific Papers The pattern of bibliographic references indicates the nature of scientific research front*, *Science* Vol. 149, S. 510—515 in: **Newman et al., 2006**, S. 149—154

Doh Soogwan, 2012, *A multidimensional perspective on the role of social capital in innovation*, in: **Karlsson et al., 2012**, S. 299—327

Dosi Giovanni, Grazzi Marco, 2010, *On the nature of technologies: knowledge, procedures, artifacts and production inputs*, *Cambridge Journal of Economics* 2010, 34, S. 173—184

Erdős Paul, Rényi A., 1960, *On the Evolution of Random Graphs*, Publikation des mathematischen Instituts der Ungarischen Akademie für Wissenschaften 5, S. 17—61 in: **Newman et al., 2006**, S. 38—82

Europäische Union, 2009, *Knowledge for Growth: Prospects for science, technology and innovation*, Report of the Janez Potočnik's Expert Group, European Union, 2009

Eurostat, 2011a, Datenquelle: Eurostat Code tsieb020, Letztes Update: 02.01.2012
Download:
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=de&pcode=tsieb020>,

Allgemeiner Disclaimer der Europäischen Kommission:
http://europa.eu/geninfo/legal_notices_de.htm, 04.01.2012

Eurostat, 2011b, Datenquelle: Eurostat Code: tsdec100, Letztes Update: 03.01.2012,
Download:
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=0&language=de&pcode=tsdec100>, Allgemeiner Disclaimer der Europäischen Kommission:
http://europa.eu/geninfo/legal_notices_de.htm, 04.01.2012

Eurostat, 2011c, Datenquelle: Eurostat Code: Code: t2020_20, Letztes Update: 16.12.2011
Download:
http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=de&pcode=t2020_20, Allgemeiner Disclaimer der Europäischen Kommission:
http://europa.eu/geninfo/legal_notices_de.htm, 04.01.2012

Eurostat, 2011d, Datenquelle: Eurostat Code: tsc00009, Letztes Update: 16.12.2011
Download:
<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=0&language=de&pcode=tsc00009>, Allgemeiner Disclaimer der Europäischen Kommission:
http://europa.eu/geninfo/legal_notices_de.htm, 04.01.2012

Eurostat, 2011e, Datenquelle: Eurostat Code: tsdsc510,
Letztes Update: 16.12.2011
Download:
Tabelle:<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=0&language=de&pcode=tsdsc510>, Allgemeiner Disclaimer der Europäischen Kommission:
http://europa.eu/geninfo/legal_notices_de.htm, 04.01.2012

EZB (Europäischen Zentralbank), **2012**, Frankfurt am Main, Download:
<http://www.ecb.europa.eu/euro/intro/html/map.de.html>, 15.01.2012 und 9.11.2013

Fagerberg Jan, 2002, September, *A Layman`s Guide to Evolutionary Economic*, TIK Working paper no. 17, Centre for technology, innovation and culture, University of Oslo Working Papers

Foss Nicolai J., 1996, *The New Growth Theory: Some Intellectual Growth Accounting*, Working Paper Series, Department of Industrial Economics & Strategy, Copenhagen Business School, No. 97-2, Revised Draft, December 9th

Gandolfo Giancarlo, 1997, *Economic Dynamics*, Study Edition, Verlag Springer, Berlin, Heidelberg, New York

Gnan Ernest, Janger Jürgen, Scharler Johann, 2004, *Ursachen des langfristigen Wachstums in Österreich — Plädoyer für eine nationale Wachstumsstrategie*, in: Österreichische Nationalbank, Geldpolitik und Wirtschaft Q1/04

Goodwin Richard M., **1965**, *A Growth Cycle*, paper presented at the First World Congress of the Econometric Society, Rome, 1965, in: Feinstein C. H. (Eds.), 1967, *Socialism, Capitalism and Economic Growth*, Cambridge University Press, London, S. 54—58

Goodwin Richard M., **1985**, *Swinging Along the Autostrada*, in: *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems Competition, Instability, and Nonlinear Cycles*, Proceedings of an International Conference, New School for Social Research, S. 125—131, M. Beckmann and W. Krelle (Eds.), New York, USA, March 1985

Goodwin Richard M., **1990**, *Schumpeter, Keynes and the theory of economic evolution*, *Economia e Banca – Annali Scientifici*, 3/1990

Greenhalgh Christine, **Rogers** Mark, **2010**, *Innovation, Intellectual Property, and Economic Growth*, Princeton University Press, Princeton und Oxford

Gundlach Erich, **2001**, *Humankapital als Motor der Entwicklung Ein neuer Ansatz der neoklassischen Wachstumstheorie*, in: Reinold E. Thiel (Hrsg.), *Neue Ansätze zur Entwicklungstheorie*. Deutsche Stiftung für internationale Entwicklung (DSE). Informationszentrum Entwicklungspolitik (IZEP). Bonn: DSE/IZEP 2. Aufl. 2001. S. 173—185

Hackler Darrene, **2012**, *High technology and regions in an era of open innovation*, in: **Karlsson et al.**, **2012**, S. 240—262

Hahn Franz R., **1993**, *Neuere Entwicklungen in der Wachstumsökonomie*, WIFO Monatsbericht 8/93, S. 432—437

Hanappi Hardy, **1997**, Manuskript zur Vorlesung *Konjunktur- und Wachstum*, Wintersemester 1996/1997, Technische Universität Wien, Institut für Wirtschaftsmathematik, www.vwl.tuwien.ac.at, 30.06.2006

Hanappi Hardy, **2008a**, *On the Nature of Knowledge, An Evolutionary Perspective*, MPRA Paper No. 27615

Hanappi Hardy, **2008b**, Persönliche Diskussion im Rahmen einer Vorlesung zu “Information Economics“ im Studienjahr 2008, Technische Universität Wien

Hanappi Hardy, **2011a**, *From Growth to Innovative Reproduction: A Roadmap for a European model of Evolution*, MPRA Paper No. 29062

Hanappi Hardy, **2011b**, *Signs of Reality – Reality of Signs Explorations of a pending revolution in political economy*, MPRA Paper No. 31570

Hank Rainer, Onlineausgabe **FAZ**, 9. Juni **2008**, *Erklär mir die Welt: Warum ist die Wirtschaft unser Schicksal?*, Download: <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/wirtschaftswissen/erklaer-mir-die-welt-warum-ist-die-wirtschaft-unser-schicksal-1545314.html>, 01.02.2010

Hayek August H., **1945**, *The Use of Knowledge in Society*, The American Economic Review, Volume XXXV, September 1945, No. 4, S. 519—530

Hedesstrom Ted und **Whitley**, Edgar A., **2000**; *What is meant by tacit knowledge? Towards a better understanding of the shape of actions*, in: 8th European Conference on Information Systems, 3—5 July 2000, Vienna, Austria, Download: <http://is2.lse.ac.uk/asp/aspecis/20000021.pdf>,

Helpman Elhanan, **Rangel** Antonio, **1998**, *Adjusting to a new Technology: Experience and Training*, NBER Working Paper 6551, May 1998

Hirshleifer Jack, **2001**, *The Dark Side of the Force Economic Foundations of Conflict Theory*, Cambridge University Press, Cambridge

Hodgson Geoffrey M., **2003**, *The Mystery of the Routine The Darwinian Destiny of An Evolutionary Theory of Economic Change*, Revue économique – Vol. 54, No. 2, March 2003, S. 355—384

Houghton John, **Sheehan** Peter, **2000**, *A Primer on the Knowledge Economy*, Centre for Strategic Economic Studies, CSES Working Paper 18/2000, Victoria University, Melbourne, Australia

Howells Jeremy R. L., **2002**, *Tacit Knowledge, Innovation and Economic Geography*, Urban Studies, Vol. 39, Nos. 5—6, S. 871—884, Carfax Publishing, Taylor & Francis Group

Japan Association for Evolutionary Economics, **2006**, *Emergence of Evolutionary Ideas in Economics*, Download: <http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/~evoeco/eng/emergence.html>, 19.12.2006

Johnson Björn und **Lundvall** Bengt-Åke, **2001**, *Why all this fuss about codified and tacit knowledge?*, Druid Winter Conference January 18-20 2011, in: Oxford Journals – Industrial and Corporate Change (ICC), 2002, 11(2), S. 245—262

Karlsson Charlie, **Johansson** Börje, **Stough** Roger R., **2012**, *Innovation, Technology and Knowledge*, Routledge Studies in Global Competition, Routledge Taylor & Francis Group, London and New York

Kaufman Charlie, **Perlman** Radia, **Speciner** Mike, **2010**, *Network Security PRIVATE Communication in a PUBLIC World*, Second Edition, Prentice Hall, Westford, Massachusetts, USA

Keller Fox Evelyn, **2005**, *Revisiting ‘scale-free’ networks*, BioEssays 27.10, BioEssays 27 S. 1060—1068, 2005 Wiley Periodicals Inc.

Kistner Klaus-Peter, **Steven** Marion, **1999**, *Betriebswirtschaftslehre im Grundstudium I Produktion Absatz Finanzierung*, 3. Auflage, Verlag Physica, Heidelberg

Kolleritsch Erwin, **2004**, *Input-Output-Multiplikatoren 2000*, Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung Statistische Nachrichten 6/2004, in: Statistik Austria Input-Output-Tabelle

2000, Wien 2004

Korres Georg M., **2008**, *Technical Change and Economic Growth, Inside the Knowledge Based Economy*, 2nd Edition, Ashgate, Great Britain

Krugman Paul, **1996**, *What Economists Can Learn from Evolutionary Theorists*, Synopsis: A look at a way to get beyond traditional Profit-Maximization theory into something more realistic. A talk given to the European Association from Evolutionary Political Economy, November 1996, <http://www.mit.edu/~krugman/evolute.html>, 17.05.2006

Kuznets Simon, **1965**, *Economic Growth and Structure*, W. W. Norton, New York

Langlois Richard N., **2000**, *Knowledge Consumption, and Endogenous Growth*, University of Connecticut, Working Paper 2000-02, January 2000

Léonard Daniel, **Van Long** Ngo, **1992**, *Optimal Control Theory and Static Optimization in Economics*, Cambridge University Press, Cambridge

Licht Georg, **2009**, *How to better diffuse technologies in Europe*, in: **Europäische Union**, **2009**, S. 31—34

Liljeros Frederik, **Edling** Christofer R., **Amaral** Luís A. Nunes, **Stanley** H. Eugene, **Åberg** Yvonne, **2001**, *The web of human sexual contacts, Promiscuous individuals are the vulnerable nodes to target in safe-sex campaigns*, Nature Vol. 411, 21. June 2001, S. 907—908 in: **Newman et al.**, **2006**, S. 227 f.

MacKay David J., **2004**, *Information Theory, Inference, and Learning Algorithms*, Cambridge University Press, UK

Maddison Angus **1991** *Dynamic Forces in Capitalist Development*, Oxford University Press, Oxford

Mallard Graham, **2011**, *Modelling Cognitively Bounded rationality: An Evaluative Taxonomy*, Journal of Economic Surveys, Journal of Economic Surveys 26, S. 674—704

Marr Bernhard, **Spender** J.-C., **2004**, *Measuring knowledge assets – implications of the knowledge economy for performance measurement*, Measuring Business Excellence, Vol. 8 NO 1 2004, S. 18—27, Emerald Group Publishing Limited

Marx Karl, **1969 (1872)**, *Das Kapital*, Band I: Der Produktionsprozess des Kapitals, Band II: Der Zirkulationsprozess des Kapitals, Verlag Ullstein, Frankfurt, Berlin, Wien

Maußner Alfred, **Klump** Rainer, **1996**, *Wachstumstheorie*, Verlag Springer, Berlin, Heidelberg, New York

Metcalf J. S., **2001**, *Knowledge of Growth and the Growth of Knowledge*, Journal of Evolutionary Economics 12, S. 3—15

Metcalf J. S., **2007**, *The Broken Thread: Marshall, Schumpeter and Hayek on the Evolution of Capitalism*, ESRC Center for Research on Innovation and Competition, The University of

Manchester, First Draft, 7th March 2007

Mokyr Joel, 1990, *The Lever of Riches Technological Creativity and Economic Progress*, Oxford University Press, Oxford, New York

Mokyr Joel, 2002a, *Useful Knowledge as an Evolving System: The View from Economic History*, Revised Version February 11, 2002, Presented to the Conference on “The Economy as an Evolving System.” Santa Fe, Nov. 16—18, 2001/2004, in 2004, Max-Planck-Inst. for Research into Economic Systems, Jena

Mokyr Joel, 2002b, *The Gifts of Athena: Historical Origins of The Knowledge Economy*, Princeton University Press, Princeton and Oxford

Müller Pamela, 2005, *Exploring the Knowledge Filter: How Entrepreneurship and University-Industry Relations Drive Economic Growth*, Freiberg Working Paper 2005/17, July 8, 2005, Technical University Bergakademie Freiberg

Naderer Ruth, Delapina Thomas, Grandosek Mathias, 2007, *Die wirtschaftliche Lage der Informationstechnologie*, Ausgabe 2007, Kammer für Arbeiter und Angestellte

Nelson Richard R., 2006, *Economic Development From the Perspective of Evolutionary Economic Theory*, Tallinn University of Technology, Working Paper January 2006/02, The Other Canon Foundation, Norway, in Oxford Development Studies, Taylor and Francis Journals, vol. 36(1), S. 9—21

Nelson Richard R., 2011, Keynote im Rahmen der Schumpeter-Konferenz 2011, Vienna 2011 Conference on Schumpeter’s Heritage The Evolution of the Theory of Evolution, 27.—30. Oktober 2011 in Wien

Nelson Richard R., Phelps Edmund S., 1966, *Investment in Humans, Technological Diffusion, and Economic Growth*, the American Economic Review, Vol. 56, No. ½ (March 1966), S. 69—75

Nelson Richard R., Winter Siegfried G., 1982, *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge, MA, Belknap Press, Harvard University Press, Harvard

Newell Allen, Simon A. Herbert, 1976, *Computer Science as Empirical Inquiry: Symbols and Search*, 1975 ACM Turing Award Lecture, Communications of the Association for Computing Machinery, March 1976, Volume 19, Number 3

Newman Mark E.J., 2010, *Networks An Introduction*, Oxford University Press, Oxford, New York

Newman Mark, Barabási Albert-László, Watts Duncan J. (Eds.), 2006, *The Structure and Dynamics of Networks*, Princeton University Press, Princeton and Oxford

No Doubt Research, 2003, *Data, Information, and Knowledge*, www.nodoubt.co.nz Auckland, New Zealand, March 2003, frei verfügbarer Artikel, Download: http://www.nodoubt.co.nz/pdfs/knowledge_management/data.pdf, 01.02.2013

OECD, 1996, *The Knowledge-Based Economy*, Paris, General Distribution, OCDE/GD(96)102

OECD, 2010, *OECD-Ausblick Informationstechnologie: Ausgabe 2010*, Multilingual Summaries (German), ISBN 978-92-64-84667, Download: <http://www.oecd.org/sti/ieconomy/46559738.pdf>, 05.02.2011

Otruba Heinrich, Munduch Gerhard, Stiassny Alfred, 1996, *Makroökonomik*, Zweite, neubearbeitete Auflage, Springers Kurzlehrbücher der Wirtschaftswissenschaften, Verlag Springer, Wien, New York

Ottmann Thomas, Widmayer Peter, 1996, *Algorithmen und Datenstrukturen*, 3. Überarbeitet Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Oxford

Plosser Charles I, 1992, *The search for growth*, in: Policies for long-run economic growth: a symposium sponsored by the Federal Reserve Bank of Kansas City, Jackson Hole, Wyoming, August 27, S. 57—92

Polanyi Michael, 1958, *Personal Knowledge*, University of Chicago Press

Polanyi Michael, 1966, *The tacit dimension*, Gloucester, MA, Peter Smith

Potts Jason, 2003, *Evolutionary Economics Foundation of Liberal Economic Philosophy*, (schools brief) Autumn, Policy vol. 19, No. 1, S. 58—62, Download: <http://www.cis.org.au/images/stories/policy-magazine/2003-autumn/2003-19-01-jason-potts.pdf>, 17.10.2009

Reber Arthur S., 1989, *Implicit Learning and Tacit Knowledge*, Journal of Experimental Psychology, General 1989, Vol. 118, No. 3, S. 219—235

Ricketts Martin, 2002, *The Economics of Business Enterprise An Introduction to the Economic Organisation and the Theory of the Firm*, 3rd Edition, Edward Elgar, Cheltenham, UK; Northampton, MA, USA

Rolf Bertil, 2004, *Two Theories of Tacit and Implicit Knowledge*, Blekinge Institute of Technology, Ronneby Sweden, In Autumn Meeting of the SIG Philosophy and Informatics, Ulm, October 19, 2004 (2004)

Romer Paul M., 1986, *Increasing Returns and Long Run Growth*, Journal of Political Economy 94, S. 1002—1037

Romer Paul M., 1990, *Endogenous Technological Change*, Journal of Political Economy, 1990, Vol. 98, No. 5, pt 2, The University of Chicago, 0022-3808/90/9805-001550150, S. 71—102

Sacchetti Silvia, Sugden Roger (Hrsg.), 2009a, *Knowledge in the Development of Economies Institutional Choices Under Globalization*, Edward Elgar Publishing Limited, UK

Sacchetti Silvia, Sugden Roger, 2009b, *Creativity in economic development: space in an inferno*, in **Sacchetti und Sugden, 2009a**, S. 181—202

Schmitz Stefan W., **2001**, *Die New Economy, Literaturübersicht über methodische Grundlagen und empirische Ergebnisse für die USA und ausgewählte G-7 Länder mit dem Schwerpunkt Deutschland*, Österreichische Akademie der Wissenschaften Forschungsstelle für Institutionellen Wandel und Europäische Integration, IWE Working Paper Series, No. 19, September 2001

Schumpeter Josef Alois, **1912**, *Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung*, Duncker & Humboldt, Berlin

Schumpeter Josef Alois, **1939**, *Business Cycles: A Theoretical, Historical and Statistical Analysis of the Capitalist Process*, Volume 1 and 2, McGraw-Hill Book Company, Inc.

Schumpeter Joseph, **1943**, *Capitalism, Socialism and Democracy*, Verlag Harper, New York

Segerstrom Paul S., **Anant** T. C. A., **Dinopoulos** Elias, **1990**, *A Schumpeterian Model of the Product Life Cycle*, *The American Economic Review*, Volume 80, Issue 5 (December 1990), S. 1077—1091

Shadlen Kenneth C., **2009**, *Harmonization, differentiation, and development: the case of intellectual property in the global trading regime*, in **Sacchetti** und **Sugden**, **2009a**, S. 44—66

Sigmund Karl, **Dawson** John, **Mühlberger** Kurt, **2006**, *Kurt Gödel Das Album*, Verlag Vieweg & Sohn, Wiesbach

Simon Herbert A., **1972**, *Theories of Bounded Rationality*, in: C.B. McGuire and Roy Radner (eds.), *Decision and Organization*, 1972, North-Holland Publishing Company

Smith Keith, **2002**, *What is the 'Knowledge Economy'? Knowledge Intensity and Distributed Knowledge Bases*, INTECH Institute of New Technologies, Discussion Paper Series, ISSN 1564-8370

Solow M. Robert, **1956**, *A Contribution to the Theory of Economic Growth*, *The Quarterly Journal of Economics*, Vol. 70, No. 1, S. 65—94

Solow M. Robert, **1957**, *Technical Change and the Aggregate Production Function*, *Review of Economics and Statistics*, Vol. 39, No. 3, S. 312—320, The MIT Press, Massachusetts

Solow M. Robert, **1987**, “We’d better watch out”, *New York Times Book Review*, 12. Juli 1987, Download: <http://www.standupeconomist.com/pdf/misc/solow-computer-productivity.pdf>, 29.4.2012

Steedman Ian, **2001**, *On Measuring Knowledge in New (Endogenous) Growth Theory*, Growth Theory Conference, Pisa, Italy October 5-7th 2001, Download: <http://growthconf.ec.unipi.it/papers/Steedman1.pdf>, 07.01.2011

- Stenmark**, Dick, **2001**, *The Relationship between Information and Knowledge*, in: Proceedings of IRIS 24, Ulvik, Norway, August 11—14
- Strumsky** Deborah, **Lobo** José, **van der Leeuw** Sander, **2011**, *Measuring the Relative Importance of Reusing, Recombining and Creating Technologies in the Process of Invention*, Santa Fe Working Paper 2011-02-003, Version January 2011
- Sugden** Roger, **Te Velde** Robbin, **Wilson** James R., **2009**, *Economic development lite: communication, art and ICTs in a globalized economy*, in **Sacchetti** und **Sugden**, **2009a**, S. 205—228
- Tanenbaum** Andrew S., **2003**, *Computer Networks*, Fourth Edition, International Edition, Pearson Education International
- Tang** Shiping, **2005**, *Knowledge as Production Factor: Toward a unified theory of economic growth*, IAPSCASC Publications, Version 3.0, June 2005, Download: <http://yataisuo.cass.cn/UploadFile/2005102203439560.pdf>, 07.04.2011
- Varian** Hal R., **1999**, *Grundzüge der Mikroökonomie*, 4. überarbeitet und erweiterte Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München Wien
- Varian** Hal R., **2001**, *Economics of Information Technology*, University of California, Berkeley, July 2001, Revised Version of March 23th 2003, Download: <http://people.ischool.berkeley.edu/~hal/Papers/mattioli/mattioli.pdf>
- von Neumann** John, **1937**, *Über ein Ökonomisches Gleichungssystem und eine Verallgemeinerung des Brouwerschen*. Ergebnisse eines Mathematischen Kolloquiums 8, in Review of Economic Studies, 1945, 13, S. 1—9
- Watts** Duncan J., **Strogatz** Steven H., **1998**, *Collective dynamics of ‚small-world‘ networks*, Nature Vol. 393, S. 440 ff., 4th of June 1998, Macmillian Publishers Ltd 1998
- Weber** Thomas, **2002**, *Darwinismus*, Verlag Fischer, Frankfurt am Main
- Welfens** Paul J.J., **2002**, *Information & Communication Technology and Growth: Some Neglected Dynamic Aspects in Open Digital Economies*, in **Audretsch** und **Welfens**, **2002**, S. 29—52
- Wooldridge** Michael, **2002**, *An Introduction to MultiAgent Systems*, John Wiley & Sons, LTD, UK
- Xingyuan** Che Natasha, **2009**, *Sectoral Structural Change in a Knowledge Economy*, MPRA Paper No. 19653
- Zambonelli** Franco, **2005**, *Scale Free Networks*, Folienpräsentation, February 2005, <http://mars.ing.unimo.it/didattica/cas/L10/ScaleFree.pdf>, 27.04.2013

13. Lebenslauf

Mag. rer. soc. oec. Philip Bacher

07.10.2012	Geburt meines Sohnes Maximilian Bacher
10/2010 bis laufend	SAP-Softwareentwickler in einem Beratungsunternehmen im Versicherungsbereich
06/2006—10/2010	SAP-Softwareentwickler im Sozialversicherungsbereich
02.10.2009	Hochzeit mit Frau Mag. Ines Bittner
10/2000—03/2006	Interuniversitäres Diplomstudium der Wirtschaftsinformatik an der Technischen Universität Wien und Universität Wien Abschluss mit dem akademischen Grad Magister der Sozial- und Wirtschaftswissenschaften
07/1999—02/2000	Ordentlicher Präsenzdienst in Wien
09/1994—05/1999	Bundeshandelsakademie in 1120 Wien Reifeprüfung (Matura) im Mai 1999
09/1990—06/1994	Bundesrealgymnasium in 1140 Wien
09/1986—06/1990	Öffentliche Volksschule in 1140 Wien
16.09.1979	Geburt in 1160 Wien, Österreich