

Erwin G. Ott

Genealogische Studien zu Physik und Ökonomie: Zur Entwicklung wissenschaftlicher Denkweisen und ihrer Wechselwirkungen

Abstract

Die vorliegende Monographie unternimmt eine genealogische Studie der tiefgreifenden Wechselwirkung zwischen Physik und Ökonomie. Angesichts der globalen Finanzkrise wird die historische Prägung der ökonomischen Theorie durch physikalische Denkweisen, Konzepte, Methoden und Metaphern kritisch beleuchtet. Die Studie zeigt auf, wie das Ideal der Newtonschen Mechanik – geprägt von Determinismus, Reduktionismus, Kausalität und Mathematisierung – das Streben der Ökonomie nach „Wissenschaftlichkeit“ maßgeblich beeinflusste, was zur Dominanz des Gleichgewichtsparadigmas und der mathematischen Modellierung führte.

Es werden die Wege der Konzeptübernahme analysiert, von physikalischen Kräften und Energie bis zu den jüngeren Einflüssen der System-, Chaos- und Komplexitätstheorie sowie des Entropiekonzepts in der ökologischen Ökonomie. Die Studie identifiziert methodologische Parallelen wie die Rolle des Experiments und der Modellbildung, problematisiert aber zugleich die Grenzen der Übertragbarkeit naturwissenschaftlicher Methoden auf komplexe soziale Systeme, insbesondere in Bezug auf Vorhersagekraft und die Vernachlässigung von Irrationalität, Macht und Institutionen. Biographische Skizzen interdisziplinärer Persönlichkeiten unterstreichen die personalen Brückenbauer.

Das Fazit beleuchtet die Ambivalenz dieser „Physikalisierung“: Während sie zu analytischer Strenge beitrug, führte sie auch zu blinden Flecken und einer „falschen Präzision“, deren Risiken die aktuelle Krise offenbart. Die Monographie plädiert für einen Methodenpluralismus und interdisziplinäre Forschungsansätze, die die Komplexität ökonomischer Realitäten besser erfassen.

Schlüsselwörter: Genealogie, Wissenschaftsgeschichte, Physik, Ökonomie, Mechanistisches Weltbild, Gleichgewicht, Mathematisierung, Ökonometrie, Komplexität, Chaostheorie, Entropie, Finanzkrise 2008, Physikalismus, Interdisziplinarität.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

- 1.1. Problemstellung und Forschungsfragen
- 1.2. Methodologie: Genealogischer Ansatz und interdisziplinäre Perspektive
- 1.3. Abgrenzung des Forschungsfeldes und Relevanz der Studie
- 1.4. Aufbau der Monographie

Teil I: Die Physik als paradigmatischer Vorreiter

Kapitel 1: Wurzeln des physikalischen Denkens und seine mathematische Fundierung

- 1.1. Antike Ursprünge und die Entstehung der Naturphilosophie
- 1.2. Die wissenschaftliche Revolution: Newton und die Mechanik als Leitwissenschaft
- 1.3. Determinismus, Kausalität und das mechanistische Weltbild
- 1.4. Mathematisierung der Natur: Von der Geometrie zur Infinitesimalrechnung

Kapitel 2: Evolution physikalischer Theorien und ihre gesellschaftlichen Implikationen

- 2.1. Klassische Physik: Thermodynamik, Elektromagnetismus und die Vision einer einheitlichen Theorie
- 2.2. Die Wende zum 20. Jahrhundert: Relativitätstheorie und Quantenmechanik
- 2.3. Paradigmenwechsel und die Infragestellung des klassischen Weltbilds
- 2.4. Physikalische Modelle und ihre Metaphern in der Alltagssprache

Teil II: Die Ökonomie auf der Suche nach wissenschaftlicher Fundierung

Kapitel 3: Frühformen ökonomischen Denkens und moralphilosophische Grundlagen

- 3.1. Merkantilismus und Physiokratie: Erste Versuche systematischer Erfassung
- 3.2. Adam Smith und die Begründung der klassischen Nationalökonomie

3.3. Das Konzept der "unsichtbaren Hand" und seine physikalischen Analogien

3.4. Utilitarismus und der Einfluss der Moralphilosophie auf die ökonomische Theorie

Kapitel 4: Die Mathematisierung der Ökonomie im 19. und 20. Jahrhundert

4.1. Die Grenznutzenschule und die Marginalrevolution

4.2. Walras, Jevons, Menger: Die Einführung mathematischer Methoden in die Ökonomie

4.3. Vom Gleichgewicht in der Mechanik zum Gleichgewicht auf dem Markt

4.4. Ökonometrie und die Sehnsucht nach "physikalischen" Gesetzen in der Ökonomie

4.5. Die Verhaltensökonomie: Eine Infragestellung des rationalen Agenten

Teil III: Interaktionen und Konvergenzen: Die Rezeption physikalischer Denkweisen in der Ökonomie

Kapitel 5: Direkte Übernahmen und Analogien

5.1. Energie, Arbeit, Kraft: Physikalische Konzepte in ökonomischen Theorien

5.2. Systemtheorie und Kybernetik: Der Einfluss auf makroökonomische Modelle

5.3. Chaostheorie und Komplexität: Neue Perspektiven auf ökonomische Dynamiken

5.4. Entropie und ökonomische Entwicklung: Von der Ressourcennutzung zur Nachhaltigkeit

Kapitel 6: Methodologische Parallelen und epistemologische Herausforderungen

6.1. Das Experiment in der Physik vs. das Gedankenexperiment in der Ökonomie

6.2. Modellbildung und Abstraktion: Gemeinsamkeiten und Unterschiede

6.3. Die Rolle von Vorhersage und Prognose in beiden Disziplinen

6.4. Kritische Reflexion: Grenzen der Übertragbarkeit und Gefahren des Physikalismus

Teil IV: Genealogische Linien und zukünftige Perspektiven

Kapitel 7: Persönlichkeiten an den Schnittstellen: Biographische Skizzen und intellektuelle Pfade

7.1. Ökonomen mit physikalischem Hintergrund (z.B. Irving Fisher, Vilfredo Pareto)

7.2. Physiker, die sich ökonomischen Fragen zugewandt haben (z.B. Stephen Jay Gould zur

Pfadabhängigkeit, David Ruelle zur Ökonophysik)

7.3. Interdisziplinäre Netzwerke und der Austausch von Ideen

Kapitel 8: Fazit und Ausblick

8.1. Zusammenfassung der wichtigsten genealogischen Linien und ihrer Implikationen

8.2. Kritische Würdigung der "Physikalisierung" der Ökonomie

8.3. Potenziale für eine zukünftige interdisziplinäre Forschung

8.4. Offene Fragen und weitere Forschungsansätze

Anhang

- Glossar
- Abbildungsverzeichnis
- Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

Personenregister

Sachregister

Einleitung

Die Wissenschaftsgeschichte ist eine facettenreiche Erzählung von Entdeckungen, Revolutionen und vor allem von einem ständigen Dialog zwischen Disziplinen. Innerhalb dieses komplexen Geflechts nimmt die Beziehung zwischen der Physik, oft als das Paradebeispiel der exakten Naturwissenschaften gepriesen, und der Ökonomie, der ambitioniertesten unter den Sozialwissenschaften, eine besonders faszinierende Stellung ein. Über Jahrhunderte hinweg haben sich Ökonomen am Vorbild der Physik orientiert, um ihrer eigenen Disziplin einen ähnlichen Status an mathematischer Präzision, universaler Gesetzmäßigkeit und Vorhersagekraft zu verleihen. Dieses Streben nach „Physik-Neid“ oder „Physics Envy“, wie es der Wissenschaftshistoriker Philip Mirowski prägnant nannte, hat die ökonomische Theoriebildung tiefgreifend geprägt.

Die vorliegende Monographie widmet sich einer **genealogischen Studie** dieser komplexen

und oft ambivalenten Wechselwirkung. Sie zielt darauf ab, die intellektuellen Pfade nachzuzeichnen, auf denen physikalische Denkweisen, Modelle, Methoden und Metaphern in die ökonomische Theoriebildung Eingang fanden, diese prägten und zugleich transformierten – manchmal zu ihrem Vorteil, manchmal zu ihrem Nachteil. Die globale Finanzkrise stellt die Legitimität und die analytische Kapazität vieler etablierter ökonomischer Modelle, die oft auf fragwürdigen Annahmen von Rationalität, Effizienz und Gleichgewicht basieren, fundamental in Frage. Dies unterstreicht die Dringlichkeit einer kritischen historischen Betrachtung der Ursprünge und potenziellen Schwachstellen dominanter ökonomischer Paradigmen und ihrer metatheoretischen Prägung durch ein oftmals unkritisches Adaptieren physikalischer Idealbilder. Die Krise offenbarte die Risiken, die entstehen, wenn eine Disziplin die Komplexität ihres Gegenstands zugunsten einer scheinbaren wissenschaftlichen „Härte“ vernachlässigt.

1.1. Problemstellung und Forschungsfragen

Seit ihrer Konstituierung als eigenständige Disziplin im Zeitalter der Aufklärung im 18. Jahrhundert hat die Ökonomie, die sich mit der Allokation knapper Ressourcen unter menschlichen Individuen und Gesellschaften befasst, stets um Anerkennung als vollwertige Wissenschaft gerungen. Dieses Bestreben nach „Wissenschaftlichkeit“ manifestierte sich in einer bemerkenswerten Affinität zur Methodologie der Naturwissenschaften, insbesondere der Physik. Die scheinbare Objektivität, die mathematische Strenge, die beeindruckende Vorhersagekraft physikalischer Theorien und das Ideal eines kausal geschlossenen Systems dienten als leuchtendes Beispiel und als Standard, an dem sich die Ökonomie zu messen suchte. Infolgedessen kam es zu einer tiefgreifenden Mathematisierung der ökonomischen Theorie und dem Streben nach der Entdeckung universaler „Gesetze“, die den ökonomischen Prozess ebenso präzise beschreiben sollten wie die Naturgesetze das physikalische Universum. Die Frage, inwiefern dies eine angemessene Anpassung oder eine problematische Reduktion darstellte, steht im Zentrum dieser Untersuchung.

Doch welche spezifischen Mechanismen und Inhalte prägten diesen Ideentransfer tatsächlich? Welche konkreten Konzepte (wie Gleichgewicht, Energie, Kraft, Determinismus, Chaos, Entropie), welche Methoden (wie Modellbildung, Formalisierung, Quantifizierung, (quasi-)empirische Überprüfung) und welche fundamentalen epistemologischen Grundannahmen (wie Reduktionismus, Kausalität, Objektivität, Vorhersagbarkeit) wurden dabei von der Physik in die Ökonomie übernommen? Wie veränderte sich die ökonomische Denkweise und ihre Fähigkeit zur Erklärung sozialer Phänomene durch diese Transferprozesse – wurden sie dadurch bereichert, präziser oder aber auch begrenzt, verzerrt und von der realen Komplexität entfernt? Und welche weitreichenden Konsequenzen hatte diese „Physikalisierung“ für das Verständnis ökonomischer Phänomene, die daraus abgeleiteten politischen Implikationen und das Selbstverständnis der Ökonomie als Disziplin, die sich mit menschlichem Verhalten, gesellschaftlichen Strukturen und Werturteilen befasst, anstatt ausschließlich mit materiellen Objekten und deren Bewegungen?

Diese Studie adressiert die folgenden zentralen Forschungsfragen mit einer historischen und

kritischen Perspektive:

- Welche spezifischen physikalischen Konzepte – wie Gleichgewicht (statisch und dynamisch), Energieerhaltung, Kraft, mechanischer Determinismus, Entropie, nichtlineare Dynamiken aus der Chaostheorie oder emergente Phänomene aus der Komplexitätstheorie – fanden in welchen Phasen der ökonomischen Theorieentwicklung Eingang, und wie wurden sie dabei im ökonomischen Kontext reinterpretiert, adaptiert oder auch fehlinterpretiert?
- Wie wurden physikalische Methoden – insbesondere die mathematische Modellbildung, die Formalisierung mittels Differential- und Integralrechnung, die Betonung von Quantifizierung und die idealisierte (quasi-)empirische Überprüfung durch Ökonometrie – in der Ökonomie adaptiert, und welche methodologischen Herausforderungen und Debatten ergaben sich dabei im Hinblick auf die Einzigartigkeit sozialer Systeme?
- Welche fundamentalen epistemologischen Annahmen, die der Physik zugrunde liegen (z.B. der Glaube an eine objektiv messbare Realität, an universelle, zeitlose Gesetze, an die Möglichkeit kausaler Erklärungen und präziser Vorhersagen, und an die Trennung von Beobachter und Beobachtetem), wurden implizit oder explizit in die ökonomische Denkweise übernommen? Inwiefern beeinflussten diese Annahmen die Forschungsprogramme, die Problemdefinitionen und die akzeptierten Lösungsstrategien der Ökonomie?
- Wie beeinflusste diese Übernahme physikalischer Ideen das Selbstverständnis der Ökonomie als Wissenschaft und ihre Fähigkeit, die vielschichtige soziale Realität – inklusive Aspekte wie begrenzte Rationalität, psychologische Verzerrungen, Kultur, Machtstrukturen, institutionelle Pfadabhängigkeiten und ethische Dimensionen – adäquat zu erfassen und zu erklären? Führt die Orientierung an der Physik zu einer Reduktion oder einer Bereicherung des ökonomischen Forschungsfeldes?
- Welche historischen Persönlichkeiten spielten eine Schlüsselrolle bei der Übertragung physikalischer Ideen in die Ökonomie, sei es durch ihre eigene Ausbildung, ihre Schriften oder ihre Rolle in interdisziplinären Netzwerken? Welche intellektuellen Pfade führten sie zu dieser oft bahnbrechenden, manchmal aber auch problematischen interdisziplinären Arbeit?

1.2. Methodologie: Genealogischer Ansatz und interdisziplinäre Perspektive

Die vorliegende Arbeit bedient sich eines **genealogischen Ansatzes**, inspiriert durch die wegweisenden Arbeiten Michel Foucaults (Foucault, 1971). Ein genealogischer Ansatz unterscheidet sich fundamental von einer traditionellen linearen Historiographie, die oft eine progressive Entwicklung oder eine kontinuierliche Fortschrittsgeschichte darstellt.

Stattdessen konzentriert er sich auf die Diskontinuitäten, Brüche, Transformationen, Umdeutungen und die kontingenten Kontexte (soziale, politische, intellektuelle Macht- und Wissenskonnstellationen), in denen bestimmte Wissensformationen, Begriffe und Denkweisen dominant wurden, in Vergessenheit gerieten oder sich fundamental wandelten. Es geht darum, die „Herkunft“ (Ursprung, *Ursprung*) der Konzepte zu entschlüsseln, nicht nur ihre Entstehungsgeschichte. Dies beinhaltet die Analyse ihrer Genese in spezifischen historischen Macht- und Wissenskonnstellationen, um zu zeigen, wie sie sich im Laufe der Zeit wandelten, neue Bedeutungen annahmen und neue Formen der intellektuellen Praxis, der Forschungsmethoden und der wissenschaftlichen Diskurse hervorbrachten. Für diese Studie bedeutet dies, die wechselseitigen Bezüge zwischen Physik und Ökonomie nicht als bloße passive Einflussnahme oder gar als unproblematische Übernahme zu verstehen, sondern als einen dynamischen, komplexen Prozess der Adaption, Transformation, gelegentlichen Fehlinterpretation und der aktiven Konstruktion von Wissen in einem spezifischen historischen Feld. Der genealogische Blick erlaubt es, die „Selbstverständlichkeiten“ im ökonomischen Denken zu hinterfragen, indem er ihre historischen und oft kontingenten Ursprünge aufdeckt.

Die **interdisziplinäre Perspektive** ist hierbei von entscheidender, ja unverzichtbarer Bedeutung. Um die komplexen und oft subtilen Transferprozesse zwischen Physik und Ökonomie angemessen beurteilen zu können, ist es unerlässlich, sowohl die Geschichte der Physik – ihre großen Theorien (Klassische Mechanik, Thermodynamik, Elektromagnetismus, Relativitätstheorie, Quantenmechanik), ihre methodologischen Innovationen (Experiment, Mathematisierung, Modellbildung) und ihre philosophischen Implikationen (Determinismus, Kausalität, Objektivität) – als auch die Geschichte der ökonomischen Theorie – ihre Schulen (Klassik, Neoklassik, Keynesianismus, Österreichische Schule), ihre Debatten (Werttheorie, Gleichgewicht, Wachstum) und ihre evolutionären Pfade (Mathematisierung, Ökonometrie, Verhaltensökonomie) – in ihren jeweiligen Epistemologien und Methodologien tiefgreifend zu verstehen. Dies erfordert eine detaillierte Analyse primärer Quellen aus beiden Disziplinen, wie grundlegende Abhandlungen (z.B. Newtons *Principia*, Smiths *Wealth of Nations*, Walras' *Éléments*), maßgebliche Lehrbücher und wegweisende wissenschaftliche Artikel. Darüber hinaus ist eine umfassende Auseinandersetzung mit der Wissenschaftsgeschichte und -philosophie notwendig, um die metaspezifischen Annahmen zu identifizieren, die den Transfer von Ideen ermöglichten oder behinderten, und um die epistemologische Angemessenheit der Übernahmen zu beurteilen. Ohne diesen doppelten Blick, der die interne Logik und die historischen Kontexte beider Disziplinen berücksichtigt, ließe sich weder die Anziehungskraft der Physik auf die Ökonomie noch die spezifische Art und Weise der Rezeption und ihrer langfristigen Konsequenzen vollständig und differenziert erfassen.

1.3. Abgrenzung des Forschungsfeldes und Relevanz der Studie

Die vorliegende Studie konzentriert sich primär auf die westliche Wissenschaftsgeschichte, beginnend mit der wissenschaftlichen Revolution im 17. Jahrhundert, die das Fundament für die moderne Physik legte, bis zur Schwelle des 21. Jahrhunderts, kurz vor der globalen

Finanzkrise von 2008. Während Aspekte der Soziologie, Psychologie oder Biologie als benachbarte Disziplinen, die ebenfalls wissenschaftstheoretische Bezüge zur Physik aufweisen oder ihrerseits Einfluss auf die Ökonomie nahmen, punktuell gestreift werden mögen, liegt der Fokus klar auf der direkten und indirekten Beeinflussung der ökonomischen Theorie durch physikalische Denkweisen. Der Schwerpunkt liegt auf den konzeptionellen und methodologischen Übernahmen und Adaptionen, nicht auf einer vollständigen Geschichte beider Disziplinen, sondern auf deren intellektueller Interdependenz. Die geographische Beschränkung auf den westlichen Kanon ist eine notwendige Eingrenzung zur Beherrschung der enormen Stoffmenge.

Die Relevanz dieser Studie ergibt sich aus mehreren, miteinander verknüpften Gründen, die sowohl historischer, kritischer als auch zukunftsgerichteter Natur sind:

- **Historisches Verständnis und intellektuelle Genealogie:** Sie liefert ein tieferes, nuanciertes Verständnis für die Entwicklung der ökonomischen Wissenschaft, ihrer methodologischen Fundamente und ihrer intellektuellen Wurzeln. Sie hilft zu erklären, warum die Ökonomie heute die Form angenommen hat, die wir beobachten, und welche historischen Pfadabhängigkeiten, bewussten Entscheidungen und unbewussten Übernahmen dabei eine Rolle spielten. Dies beinhaltet auch das Verständnis der Gründe für die Dominanz bestimmter Schulen (z.B. Neoklassik) und die Marginalisierung anderer.
- **Kritische Reflexion und Selbsthinterfragung:** Sie ermöglicht eine fundierte und kritische Reflexion über die Grenzen und Potenziale einer „Physikalisierung“ von Sozialwissenschaften. Indem sie die Ursprünge bestimmter Annahmen aufdeckt und die Transferprozesse analysiert, fördert sie die notwendige Debatte darüber, ob diese Annahmen für die Analyse komplexer sozialer Realitäten, die von menschlicher Agency, kulturellen Werten und sich wandelnden Institutionen geprägt sind, angemessen sind. Dies ist eine Einladung zur Selbsthinterfragung innerhalb der Disziplin.
- **Aktuelle Relevanz im Kontext der Krise von 2008:** Angesichts der globalen Finanzkrise von 2008 und der nachfolgenden, oft scharfen Kritik an bestehenden ökonomischen Modellen, die sich als unzureichend zur Erklärung und Bewältigung der Krise erwiesen, bietet die historische Analyse Einblicke in die Ursprünge und potenziellen Schwachstellen dominanter Denkweisen. Sie hilft zu verstehen, inwiefern die Orientierung an physikalischen Idealbildern möglicherweise zu einer Vereinfachung, einer Verzerrung der ökonomischen Realität oder sogar zu einem blinden Vertrauen in mathematische Modelle beigetragen hat, die sich in der Praxis als fragil erwiesen.
- **Interdisziplinärer Dialog und zukünftige Forschungsperspektiven:** Sie fördert den notwendigen und fruchtbaren interdisziplinären Dialog zwischen Natur- und Sozialwissenschaften. Durch das Aufzeigen gemeinsamer intellektueller Wurzeln und zugleich unterschiedlicher evolutionärer Pfade und epistemologischer Herausforderungen kann sie zu einem besseren Verständnis der jeweiligen Stärken und Grenzen beitragen und Potenziale für neue, integrative Forschungsansätze aufzeigen, die die Komplexität sozialer Systeme besser erfassen können, ohne dabei auf

analytische Strenge zu verzichten. Es geht darum, die richtigen Fragen zu stellen, nicht nur die mathematisch handhabbaren.

1.4. Aufbau der Monographie

Die Monographie ist in vier Hauptteile gegliedert, die die genealogische Entwicklung der Interaktionen chronologisch und thematisch strukturieren und eine systematische Analyse ermöglichen:

- **Teil I: Die Physik als paradigmatischer Vorreiter** beleuchtet die historische Entwicklung der Physik von ihren antiken Wurzeln über die wissenschaftliche Revolution (mit besonderem Fokus auf Newtons Mechanik) bis zu den revolutionären Theorien des 20. Jahrhunderts (Relativitätstheorie, Quantenmechanik). Dabei liegt der Fokus auf jenen Aspekten – wie Determinismus, strikte Kausalität, Reduktionismus, Mathematisierung, Gleichgewichtsvorstellungen und das Streben nach universalen, zeitlosen Gesetzen –, die für die Rezeption in der Ökonomie besonders relevant waren und die das Ideal „wissenschaftlicher“ Erkenntnis in der westlichen Tradition maßgeblich formten.
- **Teil II: Die Ökonomie auf der Suche nach wissenschaftlicher Fundierung** zeichnet die Entwicklung des ökonomischen Denkens nach, von ihren moralphilosophischen und prä-wissenschaftlichen Anfängen (Merkantilismus, Physiokratie) über Adam Smith und die Begründung der klassischen Nationalökonomie bis zur Marginalrevolution und der zunehmenden Mathematisierung der Ökonomie im 19. und frühen 20. Jahrhundert. Dieser Teil zeigt, wie die Ökonomie, oft explizit an physikalischen Vorbildern orientiert, ihre eigenen theoretischen Fundamente legte und versuchte, eine ähnliche analytische Strenge zu erreichen.
- **Teil III: Interaktionen und Konvergenzen: Die Rezeption physikalischer Denkweisen in der Ökonomie** analysiert die konkreten und detaillierten Transferprozesse zwischen Physik und Ökonomie. Dies umfasst sowohl die direkte Übernahme von Konzepten (wie Energie, Arbeit, Kraft, Entropie) und weitreichenden Analogien als auch die Adaption und Weiterentwicklung von Methodologien (z.B. Systemtheorie, Kybernetik, aber auch neuere Entwicklungen wie Chaostheorie und Komplexitätstheorie). Zudem werden die tiefgreifenden methodologischen Parallelen (Experiment, Modellbildung, Vorhersage) und die damit verbundenen epistemologischen Herausforderungen und Debatten kritisch beleuchtet, die sich aus der Anwendung naturwissenschaftlicher Methoden auf soziale Phänomene ergeben.
- **Teil IV: Genealogische Linien und zukünftige Perspektiven** bietet eine Synthese und Zusammenfassung der wichtigsten genealogischen Linien und ihrer langfristigen Implikationen für die ökonomische Theorie und Praxis. Es werden Biographien relevanter Persönlichkeiten an den Schnittstellen beider Disziplinen vorgestellt, die den Ideentransfer persönlich verkörperten und vorantrieben. Abschließend erfolgt ein kritisches Fazit zur „Physikalisierung“ der Ökonomie im Lichte der Finanzkrise 2008 und

ein Ausblick auf Potenziale und Herausforderungen zukünftiger interdisziplinärer Forschungsansätze, die sich in einer post-krisenhaften Ära neu formieren könnten und einen Weg zu einer robusteren und relevanteren ökonomischen Wissenschaft weisen.

Teil I: Die Physik als paradigmatischer Vorreiter

Die Physik, die sich mit den fundamentalen Gesetzen des Universums befasst, hat nicht nur unser Verständnis der natürlichen Welt revolutioniert, sondern auch als das maßgebliche wissenschaftliche Paradigma für unzählige andere Wissenschaften gedient. Ihre Entwicklung ist untrennbar mit der Entfaltung rigoroser mathematischer Methoden, tiefgreifender philosophischer Konzepte von Kausalität, Determinismus und Ordnung sowie dem Ideal einer objektiven, präzisen und vorhersagbaren Wissenschaft verbunden, die universelle Gültigkeit beanspruchen kann. Das Studium der Physik ist daher ein notwendiger Ausgangspunkt, um die späteren Entwicklungen in der Ökonomie zu verstehen.

Kapitel 1: Wurzeln des physikalischen Denkens und seine mathematische Fundierung

Das Streben, die natürliche Welt durch rationale Prinzipien zu verstehen, reicht weit zurück in die Antike. Die Art und Weise, wie die Physik dies ab dem 17. Jahrhundert tat – durch systematische Beobachtung, Experiment und Mathematisierung – sollte jedoch einen Präzedenzfall für alle späteren wissenschaftlichen Disziplinen schaffen und ein neues Ideal von „Wissenschaftlichkeit“ etablieren.

1.1. Antike Ursprünge und die Entstehung der Naturphilosophie

Die frühesten systematischen Versuche, Naturphänomene zu erklären, finden sich bereits in den Hochkulturen des alten Ägyptens und Mesopotamiens. Hier waren es vor allem astronomische Beobachtungen, die für die Entwicklung von Kalendern, die Navigation und religiöse Praktiken von entscheidender Bedeutung waren. Diese frühen Ansätze waren jedoch primär deskriptiv und nicht von dem Streben nach universalen, abstrakten und kausalen Erklärungen geleitet, wie wir es später in der griechischen Philosophie finden sollten.

Die griechische Naturphilosophie, die sich ab dem 6. Jahrhundert v. Chr. in den ionischen Städten (z.B. Milet) entwickelte, legte den Grundstein für ein rationales Verständnis der Welt, indem sie versuchte, die Vielfalt der Erscheinungen auf wenige zugrunde liegende Prinzipien oder „Elemente“ zurückzuführen, ohne dabei auf mythische oder theologische Erklärungen angewiesen zu sein.

- **Die Vorsokratiker:** Denker wie Thales von Milet (ca. 624–546 v. Chr.) suchten nach dem

arche (Urprinzip oder Urstoff), aus dem alles besteht (Thales identifizierte Wasser als diesen Urstoff). Anaximander (ca. 610–546 v. Chr.) schlug das *apeiron* (das Unbegrenzte, Unbestimmte) als Urprinzip vor und entwickelte frühe kosmologische Modelle. Heraklit (ca. 535–475 v. Chr.) betonte die ewige Veränderung und den Kampf der Gegensätze („Alles fließt“), während Empedokles (ca. 495–435 v. Chr.) von vier Elementen (Feuer, Wasser, Erde, Luft) ausging, die durch Liebe und Streit verbunden oder getrennt werden. Eine besondere Rolle spielen die **Atomisten Leukipp und Demokrit** (5. Jh. v. Chr.), die die revolutionäre Idee entwickelten, dass die Welt aus unteilbaren, ewigen, unzerstörbaren Teilchen, den **Atomen**, und leerem Raum besteht. Diese Atome bewegen sich rein mechanisch und ihre Kollisionen und Verbindungen erzeugen die gesamte Vielfalt der beobachtbaren Phänomene. Dies war eine bemerkenswerte Vorwegnahme des späteren mechanistischen Weltbildes der Neuzeit, das die gesamte Materie auf die Interaktion kleinster, fundamentaler Bausteine zurückführen wollte.

- **Platon und Aristoteles:** Platon (ca. 428–348 v. Chr.) betonte in seinem Spätwerk *Timaios* die grundlegende Bedeutung der Mathematik und Geometrie für das Verständnis des Kosmos, den er als einen geordneten, von einem Demiurgen geschaffenen Körper verstand. Die harmonischen Proportionen und mathematischen Strukturen der platonischen Körper spiegelten für ihn die tiefere Realität wider, wenngleich er die empirische Beobachtung der rationalen Spekulation über die Ideenwelt unterordnete. Die Physik des Aristoteles (384–322 v. Chr.), insbesondere in seinen Werken wie *Physik* und *Über den Himmel*, dominierte das westliche Denken über anderthalb Jahrtausende. Sein System unterschied zwischen *natürlichen* Bewegungen (z.B. das Fallen schwerer Körper zur Erde, das Aufsteigen des Rauchs in den Himmel, die Kreisbewegung der Himmelskörper) und *erzwungenen* Bewegungen (die das Ergebnis einer äußeren Kraft waren, z.B. ein geschobener Wagen). Aristoteles' Weltbild war zutiefst teleologisch, d.h., Bewegungen zielten auf einen bestimmten Endzustand oder Zweck hin ab. Er betonte die Qualität (z.B. Schwere, Leichtigkeit) statt der Quantität und hatte zwar eine empirische Herangehensweise (z.B. systematische Beobachtungen in der Biologie), die jedoch keine systematischen Experimente umfasste und oft durch philosophische Prämissen (z.B. dass schwere Körper schneller fallen als leichte, was später von Galilei widerlegt wurde) begrenzt war. Seine enorme Autorität, insbesondere durch die Scholastik, hinderte die Entwicklung einer modernen experimentellen Physik über viele Jahrhunderte.
- **Archimedes:** Archimedes (ca. 287–212 v. Chr.) von Syrakus war vielleicht der größte antike Physiker und Mathematiker. Er entwickelte grundlegende Prinzipien der Mechanik (Hebelgesetze) und Hydrostatik (Archimedisches Prinzip des Auftriebs) und nutzte die Mathematik, um praktische Probleme zu lösen und präzise Vorhersagen zu treffen. Seine Arbeiten, obgleich oft angewandt, zeigten das immense Potenzial der quantitativen und mathematischen Beschreibung der Naturphänomene und der Ableitung von Prinzipien, die über Einzelbeobachtungen hinausgingen.

1.2. Die wissenschaftliche Revolution: Newton und die Mechanik als Leitwissenschaft

Der radikale Bruch mit der aristotelischen Tradition und der Beginn der modernen Naturwissenschaft erfolgte mit der **wissenschaftlichen Revolution**, die grob vom 16. bis zum späten 17. Jahrhundert datiert wird und sich über ganz Europa ausbreitete. Diese Epoche war geprägt von einer fundamental neuen Haltung gegenüber der Natur: von der spekulativen Naturphilosophie hin zur systematischen Beobachtung, dem gezielten Experiment und der universellen Anwendung der Mathematik als Sprache der Natur.

- **Frühe Wegbereiter:** Nikolaus Kopernikus (1473–1543) leitete mit seinem heliozentrischen Modell des Sonnensystems (*De revolutionibus orbium coelestium*, 1543) eine kognitive Revolution ein, die das geozentrische und anthropozentrische Weltbild erschütterte und die Erde als einen Planeten unter vielen in Bewegung versetzte. Johannes Kepler (1571–1630) nutzte Kopernikus' Arbeit und die präzisen astronomischen Beobachtungen von Tycho Brahe, um seine drei Bewegungsgesetze der Planeten zu formulieren (z.B. die elliptischen Bahnen), die erstmals nichtkreisförmige Bahnen vorschlugen und eine erstaunliche mathematische Regelmäßigkeit in der scheinbaren Komplexität des Himmels aufzeigten.
- **Galileo Galilei (1564–1642):** Oft als der „Vater der modernen experimentellen Physik“ bezeichnet, leistete Galilei Pionierarbeit bei der systematischen Verbindung von experimenteller Beobachtung und mathematischer Beschreibung von Bewegung. Seine Fallgesetze (gleichmäßige Beschleunigung unabhängig von der Masse im Vakuum) und das Trägheitsprinzip (ein Körper in Bewegung bleibt in Bewegung, wenn keine äußere Kraft auf ihn einwirkt) widerlegten Aristoteles' Annahmen und legten den Grundstein für die klassische Mechanik. Galilei betonte die Bedeutung der Quantifizierung und der mathematischen Formulierung von Naturgesetzen: „Das Buch der Natur ist in der Sprache der Mathematik geschrieben, deren Buchstaben Dreiecke, Kreise und andere geometrische Figuren sind, ohne die es dem Menschen unmöglich ist, auch nur ein einziges Wort davon zu verstehen.“ Er etablierte das kontrollierte Experiment als zentrales Instrument der Forschung.
- **René Descartes (1596–1650):** Leistete mit seiner analytischen Geometrie und seinem dualistischen Philosophiebeitrag wichtige Vorarbeiten für das mechanistische Weltbild. Er verstand die materielle Welt (*res extensa*) als eine ausgedehnte Substanz, die ausschließlich durch mechanische Prinzipien (Bewegung und Stoß) erklärbar ist, während der Geist (*res cogitans*) davon getrennt ist. Sein berühmter Satz „Cogito, ergo sum“ (Ich denke, also bin ich) legte den Grundstein für den Rationalismus und die Betonung der menschlichen Vernunft als Quelle der Erkenntnis.
- **Isaac Newton (1642–1727):** Der Höhepunkt und die Synthese dieser Entwicklung war Isaac Newtons monumentales Werk *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie, 1687). Newton formulierte drei Bewegungsgesetze (1. Trägheit, 2. Kraft ist gleich Masse mal Beschleunigung $F=ma$, 3. Aktion und Reaktion) und das universelle Gravitationsgesetz, das besagt, dass sich alle Körper gegenseitig anziehen, wobei die Kraft proportional zum Produkt ihrer Massen

und umgekehrt proportional zum Quadrat ihres Abstandes ist. Dieses Gesetz erklärte nicht nur den Fall eines Apfels zur Erde, sondern auch die Bewegung von Planeten, Monden und Kometen. Newton schuf damit ein kohärentes, umfassendes und **deterministisches System**, das das gesamte Universum als eine riesige, präzise tickende Maschine darstellte, deren Bewegung durch mathematische Gesetze vollständig beschreibbar und vorhersagbar war. Die **Newtonsche Mechanik** wurde zur unangefochtenen **Leitwissenschaft** und zum Prototyp wissenschaftlicher Erkenntnis schlechthin. Ihr beispielloser Erfolg in der Erklärung und Vorhersage natürlicher Phänomene befeuerte die Überzeugung, dass alle natürlichen Phänomene, obgleich komplex, letztlich durch einfache, mathematisch formulierbare Gesetze beschrieben und vorhergesagt werden könnten. Die Gründung wissenschaftlicher Akademien und Gesellschaften (z.B. Royal Society in London, Académie des sciences in Paris) institutionalisierte die neue wissenschaftliche Methode und förderte den systematischen Austausch und die Akkumulation von Wissen.

1.3. Determinismus, Kausalität und das mechanistische Weltbild

Aus der überragenden Vorhersagekraft der Newtonschen Mechanik erwuchs eine mächtige philosophische Position, die tiefgreifende Auswirkungen auf das wissenschaftliche Denken über die Physik hinaus hatte: der **Determinismus**. Die zentrale Annahme war, dass, wenn die Position und die Geschwindigkeit jedes Teilchens im Universum zu einem bestimmten Zeitpunkt exakt bekannt wären, man unter Anwendung der Newtonschen Gesetze den Zustand des Universums zu jedem beliebigen zukünftigen oder vergangenen Zeitpunkt exakt berechnen und vorhersagen könnte. Pierre-Simon Laplace (1749–1827), ein Mathematiker und Astronom, formulierte dies in seiner berühmten Vorstellung eines allwissenden Dämons in seinem *Essai philosophique sur les probabilités* (1814): „Eine Intelligenz, die für einen gegebenen Augenblick alle Kräfte kennen würde, die die Natur beleben, und die gegenseitige Lage aller Wesen, aus denen sie besteht, [...], für die nichts ungewiss wäre und die Zukunft wie die Vergangenheit offen vor ihren Augen läge.“ Dieser Dämon war eine Metapher für die absolute Vorhersagbarkeit im Rahmen der Newtonschen Mechanik.

Dieses **mechanistische Weltbild** betonte und beförderte zentrale epistemologische Annahmen, die als Ideal für jede „echte“ Wissenschaft galten:

- **Strikte Kausalität:** Jedes Ereignis ist das direkte und notwendige Ergebnis einer vorhergehenden Ursache. Unter identischen Bedingungen führen gleiche Ursachen immer zu gleichen Wirkungen. Es gibt keine Zufälligkeit, keine unbegründeten Ereignisse und keine Willkür im System. Kausalität wird als eine lineare Beziehung verstanden, bei der klar Ursache und Wirkung unterschieden werden können.
- **Reduktionismus:** Komplexe Phänomene können auf die Interaktionen ihrer einfacheren, fundamentalen Bestandteile zurückgeführt und erklärt werden. Das Verständnis des Verhaltens der Einzelteile und ihrer Interaktionsregeln genügt, um das Verhalten des

Ganzen zu verstehen. Das Ganze ist die Summe seiner Teile. Diese Annahme war außerordentlich fruchtbar in der Physik, führte aber in anderen Disziplinen zu Problemen bei der Erklärung emergenter Phänomene.

- **Universalität der Gesetze:** Die Naturgesetze gelten überall im Universum und zu jeder Zeit gleichermaßen. Sie sind invariant unter Raum-Zeit-Verschiebungen. Es gibt keine lokalen, historischen oder zeitgebundenen Ausnahmen. Diese Universalität verlieh den physikalischen Gesetzen eine immense Geltung und Autorität.
- **Objektivität der Erkenntnis:** Die Natur existiert unabhängig vom menschlichen Beobachter und kann durch rationale Deduktion und empirische Beobachtung/Experimente objektiv erkannt und beschrieben werden. Subjektive Erfahrungen, individuelle Wahrnehmungen oder moralische/ethische Werte sind irrelevant für die wissenschaftliche Beschreibung der Realität. Die Wissenschaft strebt nach einer wertfreien, nüchternen Darstellung der Fakten.
- **Vorhersagbarkeit und Kontrolle:** Die Möglichkeit, zukünftige Zustände von Systemen präzise vorherzusagen, wenn die Anfangsbedingungen bekannt sind, und daraus die Fähigkeit abzuleiten, diese Systeme zu kontrollieren oder zu manipulieren, war das ultimative Gütekriterium für wissenschaftliche Theorien und ein Beweis für ihr tiefes Verständnis der Natur.

Diese Ideen und der damit verbundene Erfolg der Physik wurden zu einem idealen Vorbild und einem philosophischen Leitfaden für andere Wissenschaften – insbesondere für die aufstrebende Ökonomie. Diese suchte ebenfalls nach universalen, vorhersagbaren Gesetzen, um ihre eigene Legitimität und ihren Status als „echte“ Wissenschaft zu untermauern und sich von der bloßen Philosophie oder Politikwissenschaft abzugrenzen.

1.4. Mathematisierung der Natur: Von der Geometrie zur Infinitesimalrechnung

Ein fundamentaler und vielleicht der entscheidendste Schlüssel zur beispiellosen Präzision, Vorhersagekraft und analytischen Eleganz der Physik war ihre tiefgreifende und konsequente **Mathematisierung**. Schon in der Antike spielte die Geometrie eine zentrale Rolle in der Astronomie (z.B. Euklid, Ptolemäus) und der Ingenieurkunst (Archimedes). Doch mit der wissenschaftlichen Revolution, und insbesondere durch die Arbeiten von Galileo Galilei und Isaac Newton, wurde die Mathematik vom bloßen Hilfsmittel zu einem integralen Bestandteil der Naturbeschreibung selbst. Galilei, wie bereits erwähnt, formulierte die berühmte Maxime, dass das Buch der Natur in der Sprache der Mathematik geschrieben sei.

Die entscheidende mathematische Innovation der wissenschaftlichen Revolution war die unabhängige Entwicklung der **Infinitesimalrechnung** (Differential- und Integralrechnung) durch Isaac Newton und Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) im späten 17. Jahrhundert. Dieses mächtige Werkzeug ermöglichte es, Veränderungen, Raten (z.B. Geschwindigkeit, Beschleunigung) und Akkumulationen kontinuierlich und über infinitesimale Intervalle hinweg zu beschreiben. Physikalische Gesetze konnten nun in Form von Differentialgleichungen

formuliert werden, die die Dynamik von Systemen über die Zeit hinweg erfassen. Beispielsweise beschreibt Newtons zweites Gesetz ($F=ma$) die Beziehung zwischen Kraft, Masse und Beschleunigung durch eine Differentialgleichung (die zweite Ableitung des Ortes nach der Zeit).

Die Sprache der Mathematik ermöglichte es den Physikern, ihre Theorien in präzisen, quantifizierbaren Gleichungen zu formulieren, die nicht nur qualitative Beschreibungen lieferten, sondern exakte Vorhersagen erlaubten, welche dann empirisch überprüft werden konnten. Die Algebra, die Geometrie und später fortgeschrittenere mathematische Disziplinen wie die Vektor- und Tensorrechnung, die Analysis und die Statistik wurden zu unverzichtbaren Werkzeugen. Diese unbestreitbar erfolgreiche und unumstrittene Mathematisierung der Physik etablierte die Mathematik als die *lingua franca* der Wissenschaft schlechthin. Dieses Modell der Mathematisierung sollte später ein starkes, oft unwiderstehliches Vorbild für die Ökonomie werden. Ökonomen strebten danach, ihre Konzepte und Beziehungen ebenfalls in mathematische Modelle zu fassen, in der Hoffnung, so zu einer vergleichbaren Objektivität, Präzision und Vorhersagekraft zu gelangen und sich vom „bloßen Gerede“ der Philosophie, der Moralthologie oder der intuitiven politischen Ökonomie abzugrenzen. Die Mathematisierung versprach, ökonomische Debatten von subjektiven Meinungen zu objektiven, berechenbaren Tatsachen zu transformieren.

Kapitel 2: Evolution physikalischer Theorien und ihre gesellschaftlichen Implikationen

Während die Newtonsche Mechanik das 18. und weite Teile des 19. Jahrhunderts dominierte und das Ideal der Wissenschaft maßgeblich prägte, entwickelte sich die Physik selbst dynamisch weiter. Neue Disziplinen und revolutionäre Theorien erweiterten das Verständnis der Natur und stellten zugleich neue, tiefgreifende Fragen an das mechanistische Weltbild, die auch außerhalb der Physik Resonanz fanden.

2.1. Klassische Physik: Thermodynamik, Elektromagnetismus und die Vision einer einheitlichen Theorie

Im 19. Jahrhundert entstanden zwei weitere tragende Säulen der klassischen Physik, die das Verständnis der Naturgesetze erheblich erweiterten und neue Anwendungsfelder erschlossen: die **Thermodynamik** und die Theorie des **Elektromagnetismus**.

- **Die Thermodynamik:** Diese Disziplin befasste sich mit Wärme, Arbeit, Temperatur und Energie und hatte immense Bedeutung für die industrielle Revolution. Sadi Carnot (1796–1832) legte mit seinen Arbeiten zum Wirkungsgrad von Wärmekraftmaschinen einen frühen theoretischen Grundstein. Rudolf Clausius (1822–1888) formulierte den Ersten Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltung: Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur umgewandelt werden) und prägte den entscheidenden

Begriff **Entropie** zur Beschreibung des Zweiten Hauptsatzes. Dieser besagt, dass die Entropie in einem abgeschlossenen System niemals abnimmt, sondern tendenziell zunimmt – ein Maß für die Unordnung, die Zerstreuung von Energie oder die Unfähigkeit, nutzbare Arbeit zu verrichten. Ludwig Boltzmann (1844–1906) verband die makroskopischen thermodynamischen Gesetze mit der mikroskopischen Bewegung von Atomen und Molekülen in der **statistischen Mechanik**, was die Entropie als ein Maß für die Anzahl der möglichen Mikrozustände eines Systems interpretierte. Die Entropie, insbesondere das Konzept der Irreversibilität (Prozesse können nicht einfach umgekehrt werden) und des „Wärmetods“ des Universums (das Universum wird in einem Zustand maximaler Entropie enden, in dem keine Energie mehr für Arbeit verfügbar ist), hatte weitreichende philosophische Implikationen über die Endlichkeit der verfügbaren Energie und Ressourcen. Dieses Konzept sollte später auch in ökonomischen Debatten über Ressourcenknappheit, Umweltschutz, die Grenzen des Wachstums und Nachhaltigkeit eine zentrale Rolle spielen.

- **Der Elektromagnetismus:** Die Theorie des Elektromagnetismus entstand aus der Vereinigung der scheinbar getrennten Phänomene Elektrizität und Magnetismus. Wegbereiter waren Hans Christian Ørsted (1777–1851) mit der Entdeckung des Zusammenhangs zwischen elektrischem Strom und Magnetismus (1820) und Michael Faraday (1791–1867) mit seinen bahnbrechenden Experimenten zur elektromagnetischen Induktion und der Einführung des Konzepts des „Feldes“ (eine Region, in der Kräfte wirken, ohne dass eine direkte materielle Verbindung besteht). James Clerk Maxwell (1831–1879) gelang die monumentale Synthese dieser Phänomene in seinen vier berühmten **Maxwell-Gleichungen (1864/1873)**. Diese Gleichungen zeigten nicht nur, wie elektrische und magnetische Felder interagieren, sondern auch, dass Licht selbst eine elektromagnetische Welle ist und sich mit konstanter Geschwindigkeit ausbreitet. Diese Vereinigung von Elektrizität, Magnetismus und Optik zu einer einzigen, kohärenten und eleganten Feldtheorie stärkte die **Vision einer einheitlichen Theorie**, die alle Naturkräfte in einem einzigen mathematischen Rahmen vereinen könnte. Dieses Streben nach einer vereinheitlichten Beschreibung der Naturgesetze setzte sich bis ins 20. Jahrhundert fort (z.B. Albert Einsteins lebenslange Suche nach einer Großen Vereinheitlichten Theorie) und inspirierte auch Ökonomen bei ihren Versuchen, eine umfassende, vereinheitlichte Theorie des Marktes oder der gesamten Volkswirtschaft zu entwickeln (z.B. die allgemeine Gleichgewichtstheorie).

2.2. Die Wende zum 20. Jahrhundert: Relativitätstheorie und Quantenmechanik

Um die Wende zum 20. Jahrhundert erschütterten zwei revolutionäre Theorien das Fundament des klassischen physikalischen Weltbildes und zwangen zu einem radikalen Umdenken über die Natur der Realität, des Raumes, der Zeit, der Materie und der Energie. Ihre Implikationen waren so weitreichend, dass sie nicht nur die Physik, sondern auch die Philosophie und das allgemeine Weltbild tiefgreifend beeinflussten.

- **Die Relativitätstheorie:** Albert Einsteins (1879–1955) **Spezielle Relativitätstheorie**

(1905) widerlegte die absolute Raum- und Zeitvorstellung Newtons. Sie postulierte die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen (Bezugssysteme, die sich nicht beschleunigt bewegen) und führte zu erstaunlichen und intuitiv schwer fassbaren Konsequenzen: Zeitdilatation (Uhren gehen langsamer in Systemen, die sich relativ zu einem Beobachter bewegen), Längenkontraktion (Objekte verkürzen sich in Bewegungsrichtung) und die berühmte Äquivalenz von Masse und Energie ($E=mc^2$). Die **Allgemeine Relativitätstheorie (1915)** erweiterte dieses Konzept auf die Gravitation, indem sie zeigte, dass Masse und Energie die Raumzeit krümmen und diese Krümmung wiederum die Bewegung von Materie beeinflusst. Die Relativitätstheorie zwang zu einem fundamentalen Umdenken über die Struktur des Kosmos, die Nicht-Existenz eines absoluten Bezugssystems und die Verknüpfung von Raum, Zeit, Masse und Energie zu einer untrennbaren, dynamischen Einheit. Obwohl die Relativitätstheorie keine direkten Konzepte für die Ökonomie lieferte, zeigte sie die Wandelbarkeit selbst grundlegender physikalischer Annahmen und die Möglichkeit, etablierte Paradigmen zu überwinden.

- **Die Quantenmechanik:** Die **Quantenmechanik**, entwickelt von einer Kohorte brillanter Physiker wie Max Planck (1858–1947), Niels Bohr (1885–1962), Werner Heisenberg (1901–1976), Erwin Schrödinger (1887–1961), Paul Dirac (1902–1984) und vielen anderen, revolutionierte das Verständnis der Materie auf subatomarer Ebene (Atome, Elektronen, Photonen). Planck führte 1900 die Idee der Quantisierung von Energie ein, um die Schwarzkörperstrahlung zu erklären (Energie wird in diskreten Paketen, den Quanten, abgestrahlt). Bohr entwickelte ein Atommodell mit quantisierten Energiezuständen für Elektronen. Werner Heisenberg formulierte die **Unschärferelation (1927)**, die besagt, dass bestimmte Paare von komplementären Eigenschaften (z.B. Ort und Impuls, oder Energie und Zeit) eines Teilchens nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit bestimmt werden können – je genauer man das eine misst, desto ungenauer wird die Messung des anderen. Die Quantenmechanik führte zudem Konzepte wie den **Welle-Teilchen-Dualismus** (Materie kann sowohl Wellen- als auch Teilcheneigenschaften aufweisen) und die **Superposition** (ein Teilchen kann in mehreren Zuständen gleichzeitig existieren, bis es gemessen wird) ein. Vor allem aber ersetzte sie den strikten Determinismus der klassischen Physik durch die **Wahrscheinlichkeit** als fundamentale Beschreibung der Natur. Die Vorstellung, dass die Natur auf ihrer fundamentalsten Ebene nicht vollständig vorhersehbar ist, dass Zufall eine intrinsische Rolle spielt und dass der Akt der Beobachtung das Beobachtete beeinflusst (die so genannte Kopenhagener Deutung), hatte tiefgreifende philosophische Implikationen, die weit über die Physik hinausgingen und das traditionelle Verständnis von Objektivität, Kausalität und der Trennung von Subjekt und Objekt in Frage stellten. Diese Aspekte sollten später, wenn auch verzögert, Debatten in der Ökonomie über Rationalität, Vorhersagbarkeit und die Rolle des Beobachters (z.B. in der Finanzmarktforschung) beeinflussen.

2.3. Paradigmenwechsel und die Infragestellung des klassischen Weltbilds

Die Entwicklung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik markierte einen fundamentalen **Paradigmenwechsel** (im Sinne von Thomas Kuhn, 1962) in der Physik. Das klassische, mechanistische, deterministische, reduktionistische und lokal-realistische Weltbild wurde durch ein neues, probabilistisches, relationales, oft holistisches und nicht-lokales Verständnis der Realität ersetzt. Dies hatte weitreichende Konsequenzen für die Wissenschaftstheorie und die Philosophie der Wissenschaft:

- **Grenzen des Determinismus:** Die allumfassende Vorstellung, dass alles bis ins Detail vorherbestimmt ist und aus den Anfangsbedingungen abgeleitet werden kann, wurde – zumindest auf der subatomaren Ebene – fundamental in Frage gestellt. Zufall und Wahrscheinlichkeit erhielten einen festen, unaufhebbaren Platz in der physikalischen Beschreibung der Welt, was philosophische Debatten über den freien Willen, das Eingreifen Gottes und die Natur der Wirklichkeit neu entfachte. Die Vorhersagbarkeit war nun probabilistisch, nicht absolut.
- **Die Rolle des Beobachters und der Messung:** Insbesondere in der Quantenmechanik wurde deutlich, dass der Beobachter und das Messinstrument untrennbar mit dem System verbunden sind. Der Messprozess beeinflusst den Zustand des Systems. Dies komplizierte die Idee einer vollständig objektiven, vom Beobachter unabhängigen Realität und führte zu Diskussionen über die Natur der Erkenntnis und die Beziehung zwischen Subjekt und Objekt in der Wissenschaft. Diese Erkenntnis war eine Herausforderung für den naiven Positivismus und sollte später in den Sozialwissenschaften (z.B. Heisenberg-Effekt in der Sozialforschung) diskutiert werden.
- **Holismus vs. Reduktionismus:** Während der Reduktionismus in der klassischen Physik äußerst erfolgreich war (Komplexe Phänomene wurden auf die Wechselwirkungen fundamentaler Teilchen zurückgeführt), zeigten sich in der Quantenmechanik zunehmend Phänomene (z.B. Verschränkung), die eine ganzheitliche Betrachtung von Systemen erforderten, bei der das Ganze mehr ist als die Summe seiner Teile und die Eigenschaften der Einzelteile nur im Kontext des Gesamtsystems verstanden werden können. Dies ebnete den Weg für Systemtheorien und Komplexitätswissenschaften in anderen Disziplinen.
- **Wandel des Wissenschaftsideals:** Das Ideal der physikalischen Wissenschaft wandelte sich vom Streben nach absoluter Vorhersagbarkeit und einem vollständigen mechanistischen Bild zum Verständnis von Wahrscheinlichkeiten, fundamentalen Unbestimmtheiten und der Erforschung emergenter Eigenschaften von Systemen. Dies betraf auch die Frage, wie man mit Komplexität umgeht – nicht nur durch weitere Reduktion, sondern auch durch die Erforschung von Selbstorganisation und Musterbildung.

2.4. Physikalische Modelle und ihre Metaphern in der Alltagssprache

Unabhängig von diesen tiefgreifenden theoretischen Entwicklungen auf der Mikroebene oder den kosmologischen Skalen haben physikalische Modelle und Konzepte die Alltagssprache,

das allgemeine Denken und das Verständnis von Systemen in anderen Disziplinen tief durchdrungen. Metaphern wie „Gleichgewicht“, „Dynamik“, „Kraft“, „Energie“, „Reibung“, „Momentum“, „Input/Output“, „System“, „Fluss“, „Resonanz“, „Druck“, „kritische Masse“, „Heben und Senken“, „Schwerkraft“ oder „beschleunigen“ sind nicht nur Fachbegriffe der Physik, sondern wurden zu weit verbreiteten Ausdrucksweisen, um komplexe Sachverhalte in Politik, Gesellschaft, Psychologie, Biologie und insbesondere der Wirtschaft zu beschreiben.

Diese **Diffusion physikalischer Metaphern** ist nicht trivial und geht über bloße sprachliche Verschönerung hinaus. Sie transportiert oft implizit tief sitzende Annahmen über Kausalität, Rationalität, Linearität, Mechanismus, Stabilität, Effizienz und Systematik, die aus dem physikalischen Kontext stammen, in andere Bereiche. Wenn beispielsweise von den „Kräften des Marktes“ die Rede ist, evoziert dies die Vorstellung von gut definierten Vektoren, die sich zu einem Gleichgewichtszustand hin bewegen, als ob der Markt ein physikalisches System wäre, das bestimmten Naturgesetzen folgt. Für die Ökonomie war dies besonders relevant, da sie bestrebt war, ihre Konzepte als universell, objektiv und wissenschaftlich fundiert darzustellen, oft unter Rückgriff auf scheinbar „neutrale“ physikalische Terminologie. Die „unsichtbare Hand“ von Adam Smith, ein sehr frühes und prominentes Beispiel, impliziert eine Art quasi-mechanisches, selbstregulierendes Gleichgewicht im Markt und verstärkt die Vorstellung, dass der Markt wie ein Naturphänomen funktioniert, das seinen eigenen, unveränderlichen Gesetzmäßigkeiten folgt. Diese Metaphern können hilfreich sein, um komplexe Sachverhalte zu vereinfachen und zu kommunizieren, bergen aber auch die Gefahr, die spezifischen, nicht-physikalischen Eigenschaften sozialer Systeme zu verzerren, zu übersehen oder sogar zu legitimieren, indem sie bestimmte ökonomische Strukturen als „natürlich“ und damit unveränderlich erscheinen lassen.

Teil II: Die Ökonomie auf der Suche nach wissenschaftlicher Fundierung

Bevor sich die Ökonomie als eigenständige akademische Disziplin im späten 18. Jahrhundert etablierte, waren ökonomische Überlegungen untrennbar mit philosophischen, moralischen, theologischen und politischen Fragestellungen verknüpft. Die Trennung von diesen umfassenderen Kontexten und die Suche nach einer spezifischen „wissenschaftlichen“ Identität, oft am Vorbild der Physik, war ein langer und vielschichtiger Prozess.

Kapitel 3: Frühformen ökonomischen Denkens und moralphilosophische Grundlagen

Die ersten systematischen Ansätze zur Analyse und Steuerung von Wirtschaftsbeziehungen

entwickelten sich in Europa in der Übergangsphase vom Spätmittelalter zur Neuzeit, als die Entstehung von Nationalstaaten und der Ausbau des Überseehandels neue Fragen aufwarfen.

3.1. Merkantilismus und Physiokratie: Erste Versuche systematischer Erfassung

- Der **Merkantilismus** (ca. 16. bis 18. Jahrhundert) war keine kohärente ökonomische Theorie im modernen Sinne, sondern vielmehr eine Sammlung von wirtschaftspolitischen Praktiken, staatlichen Regulierungen und Doktrinen, die das Ziel hatten, die Macht und den Reichtum des Nationalstaates zu mehren. Diese Ideen entwickelten sich parallel zur Herausbildung der modernen Nationalstaaten und der absoluten Monarchien. Zentrale Ideen waren die **Anhäufung von Edelmetallen** (Gold und Silber) als primäres Maß für nationalen Reichtum und Macht, die **Förderung von Exporten** (oft durch Subventionen) und die **Beschränkung von Importen** (durch Zölle und Handelsmonopole – Protektionismus), um einen Handelsbilanzüberschuss zu erzielen. Zudem wurde die staatliche Intervention zur Förderung nationaler Industrien, des Kolonialismus und einer großen Bevölkerung (als Arbeitskräfte und Soldaten) propagiert. Prominente Vertreter waren Jean-Baptiste Colbert (1619–1683), Finanzminister unter Ludwig XIV. in Frankreich (daher oft „Colbertismus“ genannt), und Thomas Mun (1571–1641) in England, der in seinem Werk *England's Treasure by Forraign Trade* (posthum 1664) die Idee des Exportüberschusses als Quelle nationalen Reichtums verteidigte. Merkantilistische Denker sahen den Handel oft als ein **Nullsummenspiel**, in dem der Gewinn des einen Landes der Verlust eines anderen war. Trotz des fehlenden systematischen Charakters und der heterogenen Ansätze markiert der Merkantilismus einen wichtigen Übergang vom rein moralisch oder theologisch begründeten ökonomischen Denken (z.B. scholastische Debatten über den gerechten Preis) zum stärker auf staatliche Steuerung, empirische Beobachtung von Handelsströmen und die Macht des Staates ausgerichteten ökonomischen Pragmatismus.
- Die **Physiokratie** (Mitte 18. Jahrhundert in Frankreich), mit François Quesnay (1694–1774) als Hauptvertreter, stellte eine der ersten kohärenten, systematischen „Schulen“ des ökonomischen Denkens dar und kann als direkter Vorläufer der klassischen Ökonomie gesehen werden. Der Begriff „Physiokratie“ bedeutet „Herrschaft der Natur“, da die Physiokraten glaubten, dass der wahre Reichtum einer Nation ausschließlich aus der **Landwirtschaft** stammt, da nur sie einen „reinen Überschuss“ (produit net) erzeugen könne. Industrie und Handel wurden als „sterile“ Sektoren betrachtet, die lediglich Werte transformierten, aber keinen neuen Wert schufen. Quesnay, der ursprünglich Arzt am Hofe Ludwigs XV. war, entwickelte den berühmten **Tableau Économique** (1758), ein komplexes Modell des Wirtschaftskreislaufs. Dieser *Tableau* stellte die Ströme von Gütern und Geld zwischen drei Klassen der Gesellschaft (Landbesitzer, produktive Klasse der Bauern, sterile Klasse der Handwerker und Kaufleute) in einer Art Fließschema dar. Dieser *Tableau* war ein früher und bemerkenswerter Versuch, die gesamte Wirtschaft als ein komplexes, in sich verbundenes System mit Interdependenzen zu modellieren, vergleichbar den Kreisläufen in der Natur (z.B. Blutkreislauf im menschlichen Körper, der Quesnay als Arzt

bekannt war) oder mechanischen Systemen. Er betonte die Existenz einer **natürlichen Ordnung** (*ordre naturel*) der Wirtschaft, die durch natürliche Gesetze geregelt sei und staatliche Interventionen unnötig und schädlich mache – eine frühe und einflussreiche Form des *Laissez-faire*-Gedankens. Die Physiokraten waren damit die ersten, die die Wirtschaft als ein System mit kausalen Zusammenhängen und Kreisläufen begriffen, was eine Parallele zu den physikalischen Systemen darstellte.

3.2. Adam Smith und die Begründung der klassischen Nationalökonomie

Adam Smiths (1723–1790) monumentales Werk *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations* (Eine Untersuchung über Natur und Ursachen des Reichtums der Nationen, 1776) gilt als das Gründungsdokument der **klassischen Nationalökonomie** und markiert den Beginn der Ökonomie als eigenständige, von Moralthologie und Politikwissenschaft getrennte wissenschaftliche Disziplin. Smith systematisierte das ökonomische Denken seiner Zeit und legte den Grundstein für viele zentrale Konzepte, die bis heute relevant sind:

- **Arbeitsteilung:** Smith identifizierte die Arbeitsteilung als primäre Quelle des Wohlstands und der Effizienzsteigerung in der Produktion, da sie Spezialisierung, höhere Geschicklichkeit und die Entwicklung arbeitssparender Maschinen fördert (illustriert am berühmten Beispiel der Stecknadelmanufaktur). Dies führte zu einem Verständnis der Produktion als einem mechanischen, effizienzgetriebenen Prozess.
- **Freie Märkte und Wettbewerb:** Smith argumentierte, dass Individuen, die rational ihren Eigeninteressen folgen, unter den Bedingungen freier Märkte und Wettbewerbs paradoxerweise zum Wohl der Allgemeinheit beitragen. Er plädierte für einen begrenzten Staatseingriff und die Selbstregulierung des Marktes.
- **Kapitalakkumulation:** Als entscheidender Motor für Wirtschaftswachstum und Wohlstandsmehrung. Investitionen in Produktivkapital führen zu mehr Arbeitsteilung und höherer Produktivität.
- **Theorie der Wertschöpfung:** Obwohl später von der Grenznutzenschule abgelöst, prägte Smiths **Arbeitswerttheorie** (der Wert eines Gutes bestimmt sich durch die in seine Produktion geflossene Arbeitszeit und Mühe) das ökonomische Denken über Jahrzehnte. Dies war ein Versuch, Wert objektiv zu bemessen, ähnlich physikalischen Größen.

Smiths Werk war zutiefst in den Idealen der Aufklärung verwurzelt, die die Bedeutung von Vernunft, individueller Freiheit, empirischer Beobachtung und einer natürlichen, rationalen Ordnung betonten. Er sah die Ökonomie als Teil eines umfassenderen Moralsystems (siehe seine frühere *Theory of Moral Sentiments*, 1759), aber in der *Wealth of Nations* konzentrierte er sich auf die Mechanismen der Wohlstandsgenerierung und des Marktes, was den Weg für eine stärker verselbstständigte ökonomische Analyse ebnete.

3.3. Das Konzept der "unsichtbaren Hand" und seine physikalischen Analogien

Das vielleicht berühmteste, zugleich am meisten diskutierte und wirkmächtigste Konzept Smiths ist die **„unsichtbare Hand“**. In *The Wealth of Nations* formulierte Smith, im Kontext des ausländischen Handels, dass der Einzelne, der sein Kapital nur im heimischen Handel einsetzt, „in diesem wie in vielen anderen Fällen von einer unsichtbaren Hand geleitet wird, um einen Zweck zu fördern, der keineswegs in seiner Absicht lag.“ (Buch IV, Kapitel 2). Smith postulierte, dass Individuen, die unbeabsichtigt und unbewusst ihren eigenen egoistischen Interessen nachgehen (z.B. ein Bäcker, der Brot backt, um seinen eigenen Lebensunterhalt zu verdienen), durch diesen Mechanismus zu einem Ergebnis geführt werden, das auch dem allgemeinen Wohl der Gesellschaft dient (z.B. die Versorgung der Gemeinschaft mit Brot). Dieses Konzept ist von immenser Bedeutung für die genealogische Studie, da es eine frühe und außerordentlich wirkmächtige Analogie zu physikalischen Kräften oder Mechanismen darstellt, die das System ohne bewusste Steuerung oder zentrale Planung zu einem optimalen Zustand führen.

Die Metapher der „unsichtbaren Hand“ suggeriert mehrere tiefgreifende physikalische Implikationen, die die spätere ökonomische Theorie stark beeinflussten:

- **Spontane Ordnung und Selbstorganisation:** Ähnlich den Naturgesetzen (z.B. Newtons Gravitation), die ohne bewusste Planung oder Steuerung Ordnung und Harmonie im Kosmos schaffen (z.B. die stabilen Planetenbahnen), kann auch im Wirtschaftsleben eine komplexe Ordnung aus den dezentralen Entscheidungen vieler Individuen entstehen, ohne dass eine zentrale Planung erforderlich ist. Die „unsichtbare Hand“ ist das natürliche Gesetz, das die chaotischen individuellen Handlungen in eine harmonische Gesamtordnung überführt.
- **Gleichgewicht und Selbstregulierung:** Die Metapher impliziert einen selbstregulierenden Mechanismus, der das System immer wieder in ein Gleichgewicht führt. Dies ist direkt vergleichbar mit einem physikalischen System (z.B. ein Pendel, das nach dem Anstoßen in seinen Ruhezustand zurückkehrt, oder eine Flüssigkeit in einem Gefäß, die sich nivelliert), das nach einem Störimpuls in seinen Ruhezustand oder zu einem stabilen Gleichgewicht zurückkehrt. Die „Kräfte“ von Angebot und Nachfrage wirken „automatisch“, um Abweichungen vom Gleichgewicht zu korrigieren. Der Markt wird als ein System verstanden, das eine intrinsische Tendenz zum Gleichgewicht besitzt.
- **Deterministische Implikationen und Effizienz:** Obwohl nicht explizit deterministisch im physikalischen Sinne (Smith erkannte menschliche Emotionen und Moral an), suggeriert die „unsichtbare Hand“, dass ein bestimmtes Arrangement (freie Märkte, Eigentumsrechte, Rechtstaatlichkeit) zwangsläufig zu einem bestimmten, vorteilhaften Ergebnis (Wohlstand, Effizienz) führt, und zwar in einer Weise, die über die Summe der individuellen Absichten hinausgeht. Dies impliziert eine quasi-mechanische Kausalität, die eine bestimmte Input-Struktur mit einem vorhersagbaren, optimalen Output verbindet, und legte den Grundstein für die Idee der Markteffizienz.

Diese Metapher ebnete den Weg für eine mechanistische Sichtweise der Wirtschaft, in der abstrakte „Kräfte“ des Angebots und der Nachfrage wirken, um einen „Gleichgewichtspreis“ zu finden, analog zu physikalischen Gleichgewichtszuständen, in denen sich verschiedene Kräfte aufheben. Sie legte den Grundstein für die spätere, stärker mathematisierte Formulierung der allgemeinen Gleichgewichtstheorie.

3.4. Utilitarismus und der Einfluss der Moralphilosophie auf die ökonomische Theorie

Parallel zur Entwicklung der klassischen Ökonomie beeinflusste der **Utilitarismus** – eine moralphilosophische Strömung, die sich im 18. und 19. Jahrhundert entwickelte – die ökonomische Theorie maßgeblich, indem er eine Grundlage für die Quantifizierung menschlicher Präferenzen und Entscheidungen lieferte. Die Hauptvertreter waren Jeremy Bentham und John Stuart Mill.

- **Jeremy Bentham (1748–1832):** Als juristischer Reformator und Philosoph postulierte Bentham, dass Handlungen und Politik danach beurteilt werden sollten, ob sie das größte Glück der größten Zahl fördern („größtmögliches Glück für die größtmögliche Zahl“). Er definierte Glück als die Maximierung von Freude und Minimierung von Leid. Das Konzept des **Nutzen (Utility)** wurde zum zentralen Maßstab für die Befriedigung oder das Glück, das ein Individuum aus dem Konsum von Gütern oder Dienstleistungen zieht. Benthams Anspruch war es, einen „**Glückskalkül**“ (**felicific calculus**) zu entwickeln, der Freude und Leid nicht nur qualitativ, sondern auch quantifizierbar (nach Intensität, Dauer, Gewissheit, Nähe, Fruchtbarkeit und Reinheit) und interpersonell vergleichbar machen sollte, um die moralische Qualität von Handlungen oder die Angemessenheit von Gesetzen zu bestimmen. Dies war ein direkter Ausdruck des zeitgenössischen wissenschaftlichen Geistes, auch moralische und psychologische Phänomene messen und kalkulieren zu wollen, analog zur Messung physikalischer Größen.
- **John Stuart Mill (1806–1873):** Als Schüler und Erbe Benthams verfeinerte Mill den Utilitarismus in seinem Werk *Utilitarianism* (1861). Er differenzierte zwischen verschiedenen Qualitäten von Freuden (höhere intellektuelle Freuden vs. niedrigere körperliche Freuden), wodurch er Benthams rein quantitativen Ansatz relativierte. Dennoch blieb das Prinzip der Nutzenmaximierung als Leitfaden für individuelles und gesellschaftliches Handeln bestehen.

Die Einflüsse des Utilitarismus auf die ökonomische Theorie waren immens:

- **Maximierung des Nutzens:** Die zentrale Annahme, dass rationale Individuen ihren eigenen Nutzen (oder Glück) maximieren wollen, wurde zu einem grundlegenden Axiom der ökonomischen Theorie und ist bis heute das Herzstück der mikroökonomischen Verhaltensmodellierung. Dieses Streben nach Maximierung unter Nebenbedingungen

(z.B. Budgetrestriktionen) ist eine direkte Parallele zum physikalischen Prinzip der Minimierung von Energie, der Maximierung von Entropie oder anderen Optimierungsproblemen in der Physik, was eine teleologische oder zielgerichtete Bewegung impliziert.

- **Quantifizierbarkeit und Messbarkeit:** Obwohl die Schwierigkeiten der tatsächlichen Messung von Nutzen bald offensichtlich wurden, legte der Utilitarismus den Grundstein für das Denken in quantitativen, messbaren Einheiten von Befriedigung, was die Anwendung mathematischer Methoden in der Ökonomie begünstigte.
- **Grundlage für die Grenznutzenschule:** Der Utilitarismus lieferte die konzeptionellen Grundlagen für die spätere **Grenznutzenschule**, die den Nutzen formalisierte und die Ökonomie auf eine vermeintlich objektivere, mathematische Basis stellte. Der Fokus auf Maximierung und ein kalkulierbares „Glück“ oder „Nutzen“ legte eine strukturelle Parallele zur Energie- oder Kraftmaximierung/Minimierung in der Physik nahe und unterstützte den Wunsch nach einer positivistischen, wertfreien Wissenschaft, die universelle Prinzipien des menschlichen Verhaltens entdecken könnte, unabhängig von moralischen oder kulturellen Besonderheiten.

Kapitel 4: Die Mathematisierung der Ökonomie im 19. und 20. Jahrhundert

Die zweite Hälfte des 19. Jahrhunderts markiert einen Wendepunkt in der Entwicklung der Ökonomie, an dem sich die Disziplin zunehmend von ihren moralphilosophischen und philosophischen Wurzeln löste und eine stärkere mathematische und „wissenschaftliche“ Identität annahm. Diese Entwicklung war oft explizit an physikalischen Vorbildern orientiert und sollte die Ökonomie auf eine vermeintlich „harte“ und präzise Basis stellen.

4.1. Die Grenznutzenschule und die Marginalrevolution

Die **Marginalrevolution** in den 1870er Jahren – mit ihren drei unabhängigen Begründern William Stanley Jevons (1835–1882) in England, Carl Menger (1840–1921) in Österreich und Léon Walras (1834–1910) in der Schweiz – leitete einen fundamentalen Paradigmenwechsel in der ökonomischen Theorie ein. Statt sich wie die klassischen Ökonomen (z.B. Smith, Ricardo) auf die Angebotsseite und die Arbeitswerttheorie zu konzentrieren, verlagerten sie den Fokus auf die Nachfrageseite und den **subjektiven Grenznutzen** (oder das Grenznutzenprinzip). Der Wert eines Gutes wurde nicht mehr durch die in seine Produktion verbrauchte Arbeit, sondern durch den zusätzlichen (marginalen) Nutzen bestimmt, den die letzte konsumierte Einheit eines Gutes stiftet. Dieses Prinzip erklärte das Wertparadoxon (Wasser ist lebensnotwendig, aber billig; Diamanten sind unnötig, aber teuer) und führte zu einer präziseren Theorie der Nachfrage.

- **William Stanley Jevons:** Jevons war ein Ökonom mit einem starken Hintergrund in Logik und Wissenschaftstheorie. Er strebte explizit eine „Mechanik des Nutzens und des

Eigennutzes“ an, um die Ökonomie in die „mathematische Wissenschaft“ zu verwandeln. Sein Hauptwerk *The Theory of Political Economy* (1871) nutzte mathematische Ableitungen (Differentialrechnung) zur Formulierung von Nutzenfunktionen und zur Bestimmung des optimalen Konsums, bei dem der Grenznutzen pro Geldeinheit für alle Güter gleich ist. Er verglich ökonomische Phänomene offen mit denen der Mechanik und sah das ökonomische Problem als „das Maximum an Vergnügen durch das Minimum an Schmerz zu erhalten“. Er sprach davon, dass der Wert von der „finalen Gebrauchintensität“ abhängt, was dem Grenznutzen entspricht.

- **Carl Menger:** Menger verfolgte in seinen *Grundsätzen der Volkswirtschaftslehre* (1871) zwar einen weniger mathematischen, eher textuellen Ansatz als Jevons und Walras, betonte aber ebenfalls die subjektive Bewertung von Gütern durch Individuen und das Prinzip des fallenden Grenznutzens. Er ist der Begründer der Österreichischen Schule der Nationalökonomie, die sich später gegen die übermäßige Mathematisierung wandte, aber Mengers ursprünglicher Beitrag zur Marginalrevolution war entscheidend für die Fokussierung auf die individuelle Wahl und die Entstehung von Marktpreisen aus subjektiven Präferenzen.
- **Léon Walras:** Walras war derjenige, der die Mathematisierung der Ökonomie am weitesten vorantrieb und dabei explizit physikalische Vorbilder im Sinn hatte. In seinen *Éléments d'économie politique pure* (Elemente der reinen politischen Ökonomie, 1874/77) entwickelte er die **allgemeine Gleichgewichtstheorie**. Walras' Modell beschrieb, wie sich die Preise und Mengen auf allen Märkten einer Volkswirtschaft simultan anpassen, bis ein Zustand erreicht ist, in dem Angebot und Nachfrage auf allen Märkten ausgeglichen sind und alle Individuen (Haushalte, Unternehmen) ihren Nutzen bzw. Gewinn maximieren. Walras sah sich explizit als „Ingenieur“ der Ökonomie und konstruierte sein Modell in Analogie zur Mechanik und dem Gleichgewicht von Kräften. Sein berühmter *Tâtonnement*-Prozess (ein imaginärer Ausrufer, der Preise anpasst, bis ein Gleichgewicht gefunden ist, ohne dass Transaktionen außerhalb des Gleichgewichts stattfinden) war eine mechanische Analogie für die Marktanpassung, die nach einem stabilen Gleichgewicht strebt, genau wie ein physikalisches System.

Die Marginalrevolution verschob den Fokus der Ökonomie von kollektiven Klassen und Produktionsprozessen auf die individuellen Entscheidungen und Präferenzen, was eine stärkere Formalisierung und Mathematisierung der ökonomischen Theorie ermöglichte und die Grundlage für die neoklassische Synthese legte.

4.2. Vom Gleichgewicht in der Mechanik zum Gleichgewicht auf dem Markt

Das Konzept des **Gleichgewichts** ist ohne Zweifel eine der prägendsten und weitreichendsten Übernahmen aus der Physik, die das neoklassische Paradigma der Ökonomie bis heute dominiert. In der klassischen Mechanik beschreibt ein Gleichgewicht einen Zustand, in dem die Summe aller auf ein System wirkenden Kräfte Null ist und sich das

System entweder in einem Zustand der Ruhe befindet (statisches Gleichgewicht) oder sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt (dynamisches Gleichgewicht). Es kann sich um ein stabiles (nach einer kleinen Störung kehrt das System in seinen Ausgangszustand zurück), labiles (nach einer kleinen Störung entfernt sich das System von seinem Ausgangszustand) oder indifferentes Gleichgewicht (nach einer Störung bleibt das System in einem neuen Zustand, ohne zurückzukehren oder sich zu entfernen) handeln.

Diese Vorstellung wurde direkt und oft unkritisch auf die ökonomische Analyse übertragen und bildete das Rückgrat zahlreicher ökonomischer Modelle:

- **Marktgleichgewicht (partielltes Gleichgewicht):** Der Preis, bei dem die Nachfrage nach einem Gut genau seinem Angebot entspricht, wurde als Marktgleichgewicht definiert. Die „Kräfte“ von Angebot und Nachfrage „drücken“ den Preis zum Gleichgewichtspunkt. Alfred Marshall (1842–1924), ein weiterer wichtiger neoklassischer Ökonom, popularisierte dieses Konzept der partiellen Gleichgewichtsanalyse. Er betonte, dass der Preis wie eine „Schere“ durch Angebot und Nachfrage gebildet wird.
- **Haushaltsgleichgewicht:** Haushalte maximieren ihren Nutzen, indem sie ihr Einkommen so auf Güter und Dienstleistungen verteilen, dass der Grenznutzen pro Geldeinheit für alle Güter gleich ist – ein Zustand des „Gleichgewichts der Präferenzen“ oder des Konsumentenoptimums. Hier wird die Nutzenmaximierung zu einem Optimierungsproblem, das mathematisch gelöst werden kann.
- **Unternehmensgleichgewicht:** Unternehmen maximieren ihren Gewinn, indem sie so viel produzieren, dass Grenzkosten und Grenzerlös übereinstimmen – ein „Gleichgewicht der Produktion“ oder des Produzentenoptimums.
- **Allgemeines Gleichgewicht (Walras-Gleichgewicht):** Walras' Theorie, die das simultane Gleichgewicht auf allen Märkten einer Volkswirtschaft beschreibt, war der Höhepunkt dieser Gleichgewichtsanalyse. Sie postulierte die Existenz eines Preisvektors, bei dem alle Märkte geräumt sind (kein Angebots- oder Nachfrageüberschuss) und alle Akteure ihre individuellen Optimierungsziele (Nutzenmaximierung der Haushalte, Gewinnmaximierung der Unternehmen) erreichen. Diese Modelle sind oft statisch und beschreiben einen Zustand der Ruhe, ohne die Dynamik oder die Prozesse, die zu diesem Gleichgewicht führen, im Detail zu analysieren. Der mathematische Beweis der Existenz eines solchen Gleichgewichts (z.B. durch Kenneth Arrow und Gerard Debreu in den 1950er Jahren) wurde zu einem Meilenstein der ökonomischen Theorie, obwohl er unter sehr restriktiven Annahmen erfolgte.

Diese Konzentration auf Gleichgewichtszustände prägte das neoklassische Paradigma und verlieh der Ökonomie eine scheinbare Stabilität, Rationalität und Vorhersagbarkeit, die der Physik entlehnt war. Fragen der dynamischen Anpassung, der Entstehung von Ungleichgewichten oder der Prozesse außerhalb des Gleichgewichts blieben oft im Hintergrund oder wurden durch statische Vergleiche von Gleichgewichtszuständen (komparative Statik) analysiert, anstatt die eigentlichen Übergangsprozesse zu modellieren.

4.3. Mathematisierung der Ökonomie im 19. und 20. Jahrhundert: Von der Algebra zur Optimierung

Die Mathematisierung der Ökonomie setzte sich im 20. Jahrhundert mit zunehmender Geschwindigkeit fort und umfasste immer komplexere und abstraktere mathematische Werkzeuge. Dies war nicht nur eine oberflächliche Anpassung, sondern eine tiefgreifende Veränderung der Art und Weise, wie ökonomische Probleme konzipiert und gelöst wurden.

- **Alfred Marshall (1842–1924):** Obwohl seine mathematischen Ableitungen oft in Fußnoten verborgen waren, um sein Hauptwerk *Principles of Economics* (1890) für ein breiteres Publikum zugänglich zu halten, vereinte Marshall die Ideen der klassischen Ökonomen (z.B. Kosten der Produktion) mit denen der Grenznutzenschule (z.B. Nutzen der Nachfrage). Er popularisierte die Verwendung von Angebots- und Nachfragekurven und das Konzept des partiellen Gleichgewichts (Analyse eines einzelnen Marktes unter der Annahme, dass andere Märkte konstant bleiben, *ceteris paribus*-Analyse). Sein Denken war tief mathematisch durchdrungen, und seine Analysen basierten oft auf der Infinitesimalrechnung.
- **Vilfredo Pareto (1848–1923):** Als Ingenieur und Mathematiker brachte Pareto eine unübertroffene mathematische Strenge in die Ökonomie ein. Er formalisierte das Konzept des Nutzens durch **Indifferenzkurven**, die es ermöglichten, Präferenzen ohne die Notwendigkeit einer kardinalen (messbaren) Nutzenmessung abzubilden, sondern nur einer ordinalen (reihungsfähigen) Skala. Er entwickelte das bereits erwähnte **Pareto-Optimum**, einen Zustand der Allokation von Ressourcen, in dem niemand bessergestellt werden kann, ohne dass jemand anderes schlechtergestellt wird. Sein Beitrag zur allgemeinen Gleichgewichtstheorie war ebenfalls bedeutend, wobei er mechanische und thermodynamische Analogien nutzte, um soziale und ökonomische Gleichgewichte zu beschreiben.

John Hicks (1904–1989) und Paul Samuelson (1915–2009): Diese beiden Ökonomen spielten eine zentrale Rolle bei der Etablierung der Mathematik als dominierende Sprache der ökonomischen Theorie im 20. Jahrhundert. Hicks' *Value and Capital* (1939) systematisierte die neoklassische Theorie des Konsumenten- und Produzentenverhaltens mithilfe fortgeschrittener Mathematik. Paul Samuelson, einer der einflussreichsten Ökonomen des 20. Jahrhunderts und erster amerikanischer Nobelpreisträger für Wirtschaftswissenschaften, brachte die „neoklassische Synthese“ voran, indem er keynesianische Makroökonomie mit neoklassischer Mikroökonomie in einem rigorosen mathematischen Rahmen vereinte. Sein Lehrbuch *Economics* (1948) wurde zum Standardwerk für Generationen von Ökonomen, und sein theoretisches Werk *Foundations of Economic Analysis* (1947) nutzte fortgeschrittene mathematische Techniken (z.B. Optimierung unter Nebenbedingungen, Differentialgleichungen für Dynamik, lineare Algebra) und etablierte die Mathematik als die *lingua franca* der ökonomischen Theorie. Sein Konzept der „revealed preference“ (offenbarte Präferenz) versuchte, die Messung des Nutzens zu umgehen, indem es sich auf

beobachtbares Wahlverhalten konzentrierte, was die Ökonomie noch näher an ein positivistisches, objektiv messbares Ideal heranführte.

Die Mathematik wurde nicht mehr nur als Sprache oder Notation, sondern als *Methode der Erkenntnis* verstanden, die logische Kohärenz und Präzision garantierte. Die Fähigkeit, ökonomische Beziehungen als Systeme von Gleichungen zu formulieren und diese nach mathematischen Prinzipien zu lösen, wurde zum Prüfstein der ökonomischen „Wissenschaftlichkeit“ und ein entscheidendes Kriterium für die Anerkennung in der akademischen Gemeinschaft.

4.4. Ökonometrie und die Sehnsucht nach "physikalischen" Gesetzen in der Ökonomie

Das 20. Jahrhundert sah die Entstehung und den Aufstieg der **Ökonometrie** als eine eigenständige Disziplin an der Schnittstelle von ökonomischer Theorie, Mathematik und Statistik. Ihr primäres Ziel war es, ökonomische Theorien mit empirischen Daten zu testen, quantitative Beziehungen zwischen ökonomischen Variablen zu schätzen und ökonomische Prognosen zu erstellen. Der Name „Ökonometrie“ selbst, geprägt von Ragnar Frisch, deutet auf den Anspruch hin, ökonomische Phänomene zu messen (*metron*) und dabei Methoden zu verwenden, die an die Exaktheit der Physik angelehnt sind.

- **Ursprünge und frühe Entwicklung:** Ragnar Frisch (1895–1973), ein norwegischer Ökonom und einer der ersten Nobelpreisträger für Wirtschaftswissenschaften, prägte den Begriff „Ökonometrie“ und war Mitbegründer der Econometric Society im Jahr 1930, die das Studium quantitativer Aspekte der Ökonomie förderte. Die frühe Ökonometrie, beeinflusst von der statistischen Mechanik in der Physik, strebte danach, ökonomische Gesetze zu entdecken, die ähnlich universell und vorhersagbar waren wie physikalische Gesetze. Jan Tinbergen (1903–1994), ein niederländischer Ökonom und ebenfalls Nobelpreisträger, entwickelte die ersten umfassenden makroökonomischen Modelle zur Simulation und Prognose der Wirtschaft (z.B. für die Niederlande und die USA), die für politische Empfehlungen genutzt werden sollten. Die Cowles Commission for Research in Economics, gegründet 1932, spielte eine zentrale Rolle bei der Entwicklung und Verbreitung ökonometrischer Methoden, darunter simultane Gleichungssysteme und die Identifizierung kausaler Beziehungen.
- **Methoden und Ziele:** Die Ökonometrie nutzt eine breite Palette statistischer Verfahren wie die Regressionsanalyse, Zeitreihenanalyse (z.B. ARMA, ARIMA Modelle), Paneldatenanalyse und komplexere System von Gleichungen, um Beziehungen zwischen Variablen zu schätzen (z.B. Zusammenhang zwischen Zinsen und Investitionen, oder Inflation und Arbeitslosigkeit). Der Fokus lag darauf, kausale Zusammenhänge zu identifizieren und Modelle zu validieren, die für politische Empfehlungen (z.B. zur Steuerung der Inflation oder zur Stimulierung des Wachstums) genutzt werden könnten. Die Hoffnung war, eine ähnliche Kontrolle über die Wirtschaft zu erlangen, wie Physiker sie über materielle Systeme besaßen, und Wirtschaftspolitik

auf eine wissenschaftlich fundierte, ingenieurwissenschaftliche Basis zu stellen.

- **Herausforderungen:** Die Ökonometrie trug maßgeblich zur „Physikalisierung“ der Ökonomie bei, indem sie die quantitative Messung und das Testen von Hypothesen in den Vordergrund stellte. Dennoch stieß sie auch auf fundamentale Grenzen, insbesondere in der Vorhersagekraft komplexer sozioökonomischer Systeme, was die Diskussion über die Einzigartigkeit von Sozialwissenschaften im Vergleich zu Naturwissenschaften immer wieder befeuerte. Die **Lucas-Kritik** (Robert Lucas, 1976) warf beispielsweise ein grundlegendes Problem auf: Wenn ökonomische Modelle für Politikzwecke verwendet werden, passen die Akteure ihre Erwartungen und ihr Verhalten an die Politik an, wodurch die Parameter des Modells instabil werden und Prognosen ungültig machen. Dies ist ein Problem der **Reflexivität**, das in der Physik in dieser Form nicht existiert. Trotz dieser Herausforderungen blieb der Wunsch nach „physikalischen“ Gesetzen in der Ökonomie, messbar und vorhersagbar durch die Ökonometrie, ein starkes, aber oft unerfülltes Ideal.

4.5. Die Verhaltensökonomie: Eine Infragestellung des rationalen Agenten

Während die neoklassische Ökonomie mit zunehmender mathematischer Raffinesse die Idee des rationalen, nutzenmaximierenden Agenten als ihr Fundament etablierte und sich dabei oft an der Vorhersagbarkeit physikalischer Systeme orientierte, entstand in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine wachsende Kritik an diesem idealisierten Menschenbild. Die Verhaltensökonomie (Behavioral Economics) stellt eine maßgebliche intellektuelle Bewegung dar, die psychologische Erkenntnisse nutzt, um ökonomische Modelle realistischer zu gestalten und die systematischen Abweichungen menschlichen Verhaltens von den Annahmen der perfekten Rationalität zu erklären. Diese Entwicklung markiert eine Abkehr von einer reinen „Physikalisierung“ menschlichen Verhaltens und führt zu einer differenzierteren Betrachtung von ökonomischer Entscheidungsfindung.

4.5.1. Grenzen der Annahme perfekter Rationalität

Die neoklassische Theorie postuliert einen Homo Oeconomicus, der stets vollständig rational handelt: Er verfügt über perfekte Informationen (oder kann diese kostenfrei erwerben), ist in der Lage, alle Informationen zu verarbeiten, besitzt stabile und vollständige Präferenzen und maximiert unter Nebenbedingungen (z.B. Budgetrestriktionen) seinen Nutzen oder Gewinn. Dieses Modell war in hohem Maße mathematisierbar und erlaubte die Anwendung von Optimierungsproblemen, die an physikalische Minimierungsprinzipien erinnerten. Es war essenziell für die Erzeugung des „Gleichgewichts“ und der Vorhersagbarkeit, die dem physikalischen Ideal der Ökonomie entsprachen.

Bereits in den 1950er Jahren begannen jedoch Wissenschaftler, diese Annahme zu hinterfragen. Herbert A. Simon (1916–2001), ein Psychologe, Informatiker und Wirtschaftsnobelpreisträger, führte das Konzept der begrenzten Rationalität (bounded

rationality) ein. Er argumentierte, dass Menschen aufgrund kognitiver Beschränkungen (begrenzte Rechenkapazität, unvollständige Informationen, begrenzte Aufmerksamkeit) nicht in der Lage sind, immer alle verfügbaren Optionen zu analysieren und den optimalen Nutzen zu maximieren. Stattdessen suchen sie nach „zufriedenstellenden“ (satisficing) Lösungen – der ersten Option, die ihren Ansprüchen genügt, anstatt die absolut beste zu finden. Simons Arbeit legte einen ersten Grundstein für die systematische Untersuchung menschlicher kognitiver Grenzen in ökonomischen Kontexten.

4.5.2. Kahneman, Tversky und die Psychologie der Urteilsfindung

Der eigentliche Durchbruch für die Verhaltensökonomie kam mit den bahnbrechenden Arbeiten der Psychologen Daniel Kahneman (geb. 1934, Nobelpreisträger 2002) und Amos Tversky (1937–1996). Sie zeigten in einer Reihe von Experimenten systematische kognitive Verzerrungen (cognitive biases) und Heuristiken (mentale Faustregeln), die Menschen bei Urteilen und Entscheidungen verwenden und die zu rationalen Abweichungen führen:

- **Prospekt-Theorie (Prospect Theory):** In ihrem wegweisenden Artikel „Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk“ (1979) widerlegten Kahneman und Tversky die traditionelle Erwartungsnutzentheorie, die annahm, dass Menschen objektiv Wahrscheinlichkeiten bewerten und ihren erwarteten Nutzen maximieren. Die Prospekt-Theorie zeigte, dass Menschen Gewinne und Verluste asymmetrisch wahrnehmen: Verluste wiegen psychologisch schwerer als Gewinne in gleicher Höhe (Verlustaversion). Zudem bewerten Menschen Wahrscheinlichkeiten nicht linear (kleine Wahrscheinlichkeiten werden über-, große Wahrscheinlichkeiten unterbewertet). Dies erklärt Phänomene wie die Risikobereitschaft bei Verlusten und die Risikoaversion bei Gewinnen.
- **Heuristiken und kognitive Verzerrungen:** Sie identifizierten zahlreiche Heuristiken, wie die Verfügbarkeitsheuristik (Urteile basieren auf leicht verfügbaren Informationen), die Repräsentativitätsheuristik (Urteile basieren auf Stereotypen) oder den Ankereffekt (Urteile werden von anfänglichen Informationen beeinflusst). Diese Heuristiken sind effizient für schnelle Entscheidungen, führen aber zu systematischen Fehlern (Biases) wie dem Bestätigungsfehler (Tendenz, Informationen so zu interpretieren, dass sie die eigenen Überzeugungen bestätigen) oder dem Besitzumseffekt (Tendenz, etwas, das man besitzt, höher zu bewerten, als wenn man es nicht besitzt).

Die Arbeiten von Kahneman und Tversky zeigten, dass menschliches Verhalten nicht immer dem mechanistischen, rationalen Kalkül folgt, sondern von psychologischen Faktoren, Rahmenbedingungen (Framing-Effekten) und emotionalen Reaktionen beeinflusst wird. Dies untergrub die Annahme eines perfekten, atomistischen Akteurs, der nur auf externe Reize reagiert, und forderte eine Neuausrichtung der ökonomischen Theorie, die die innere Komplexität menschlicher Entscheidungen stärker berücksichtigt.

4.5.3. Einfluss auf die Finanzökonomie und Politikberatung

Die Erkenntnisse der Verhaltensökonomie fanden schnell Eingang in verschiedene Bereiche der Wirtschaftswissenschaften, insbesondere in die Finanzökonomie. Traditionelle Modelle der Finanzmärkte basierten auf der Annahme effizienter Märkte und rationaler Erwartungen, wonach alle verfügbaren Informationen sofort in die Preise einfließen und keine Arbitragemöglichkeiten bestehen. Die Verhaltensfinanztheorie (Behavioral Finance) nutzte die Erkenntnisse über kognitive Verzerrungen, um Phänomene wie:

- **Marktanomalien:** Wiederkehrende Muster in Börsenkursen, die mit der Effizienzmarkthypothese schwer zu vereinbaren sind (z.B. der „Januar-Effekt“, Blasen und Crashes).
- **Herdenverhalten:** Anleger folgen der Masse, selbst wenn individuelle rationale Entscheidungen anders ausfallen würden, was zu irrationalen Auf- und Abschwüngen führen kann.
- **Overconfidence (Selbstüberschätzung):** Die Tendenz von Anlegern, ihre Fähigkeiten zu überschätzen und Risiken zu unterschätzen, was zu übermäßigem Handel und suboptimalen Portfolien führen kann.
- **Rendite-Volatilität:** Die Erkenntnis, dass Renditen oft "fat tails" aufweisen, d.h., extreme Ereignisse (sehr große Gewinne oder Verluste) häufiger sind als in der Normalverteilung angenommen, was ein Bruch mit den Gaußschen Verteilungen vieler physikalisch inspirierter Finanzmodelle darstellt.

zu erklären. Ökonomen wie Robert Shiller integrierten diese verhaltensökonomischen Erkenntnisse, um die Entstehung von Spekulationsblasen (z.B. Dotcom-Blase, Immobilienblase) und Finanzkrisen besser zu verstehen, die in rein rationalen Modellen schwer zu erklären waren. Die Finanzkrise von 2008 verstärkte die Relevanz der Verhaltensfinanztheorie, da sie die gravierenden Auswirkungen irrationalen Herdenverhaltens, Selbstüberschätzung und der Unterschätzung von Risiken drastisch vor Augen führte.

Darüber hinaus haben die Erkenntnisse der Verhaltensökonomie zunehmend Einfluss auf die Wirtschaftspolitik und öffentliche Verwaltung gewonnen. Richard Thaler (geb. 1945) ist hier eine zentrale Figur, insbesondere durch sein Konzept des „Nudging“ (sanftes Anstoßen). Thaler und Cass Sunstein (Nudge: Improving Decisions About Health, Wealth, and Happiness, 2008) argumentieren, dass man menschliches Verhalten in eine wünschenswerte Richtung lenken kann, ohne Verbote oder finanzielle Anreize zu nutzen, indem man die „Choice Architecture“ (Entscheidungsarchitektur) subtil verändert. Beispiele sind die Voreinstellung von Opt-out-Systemen bei Organspenden oder die Anordnung von Lebensmitteln in Kantinen, um gesündere Entscheidungen zu fördern. Dies ist ein pragmatischer Ansatz, der die begrenzten kognitiven Fähigkeiten der Menschen anerkennt und versucht, diese für das Gemeinwohl zu nutzen, statt von perfekter Rationalität auszugehen.

4.5.4. Verhaltensökonomie als Bruch und teilweise Anlehnung an den Physikalismus

Die Verhaltensökonomie stellt in vielerlei Hinsicht einen fundamentalen Bruch mit dem traditionellen „Physikalismus“ der neoklassischen Ökonomie dar, der auf der Annahme eines perfekt rationalen, mechanisch reagierenden Akteurs basierte. Dennoch weist sie in gewissen Aspekten weiterhin methodologische Elemente auf, die an die naturwissenschaftliche Arbeitsweise erinnern und somit eine gewisse Anlehnung an den Physikalismus beibehalten, wenn auch mit einer grundlegend anderen Zielsetzung.

- **Erkenntnis menschlicher Unvollkommenheit als systematische Abweichung:** Der zentrale Bruch liegt in der Akzeptanz der menschlichen Unvollkommenheit, psychologischer Komplexität und systematischer Irrationalität als intrinsische Merkmale ökonomischen Handelns. Statt den Menschen als ein konsistentes, berechenbares System zu betrachten, das den „Gesetzen“ der Nutzenmaximierung folgt (vergleichbar einem physikalischen Teilchen, das auf eine Kraft reagiert), akzeptiert die Verhaltensökonomie, dass die „Reibung“ oder die „Anomalien“ im System nicht einfach zu ignorierende Störfaktoren sind, sondern tiefgreifende Auswirkungen auf die ökonomischen Ergebnisse haben, und dass diese Abweichungen vorhersagbar sind. Die Verhaltensökonomie sucht nach Mustern in diesen Abweichungen, was einer wissenschaftlichen Herangehensweise entspricht, aber nicht im Sinne eines rein mechanistischen Determinismus.
- **Empirismus und Experiment als Methode der Erkenntnis:** Im Gegensatz zur mathematisch-deduktiven Ableitung der neoklassischen Theorie, die oft auf Gedankenexperimenten basierte, legt die Verhaltensökonomie einen starken Fokus auf empirische Forschung, insbesondere auf kontrollierte Laborexperimente und Feldexperimente. Hierin liegt eine klare methodologische Anlehnung an die Physik: Die Notwendigkeit, Hypothesen unter reproduzierbaren Bedingungen zu testen und quantitative Daten zu sammeln, um die Existenz und die Art von kognitiven Verzerrungen zu belegen. Diese experimentelle Methodik ist ein Merkmal des naturwissenschaftlichen Arbeitens und verleiht der Verhaltensökonomie eine empirische Fundierung, die der reinen deduktiven Ökonomie oft fehlte. Der Physikalismus in diesem Kontext zeigt sich in dem Glauben an die Messbarkeit und die systematische Untersuchung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen, selbst wenn es um komplexe menschliche Psyche geht.
- **Die "Mechanik" des Nudging:** Das Konzept des Nudging, das darauf abzielt, Verhalten durch subtile Änderungen der Entscheidungsarchitektur zu beeinflussen, kann ebenfalls als eine Art "soziale Ingenieurkunst" verstanden werden, die an die physikalische Kontrolle von Systemen erinnert. Man könnte argumentieren, dass Nudging eine Art „Mechanik“ menschlicher Entscheidungen annimmt, bei der bestimmte „Hebel“ bestimmte „Reaktionen“ hervorrufen. Doch hier ist der zugrunde liegende Unterschied entscheidend: Diese "Mechanik" basiert nicht auf idealisierten physikalischen Gesetzen der Rationalität, sondern auf der Erkenntnis menschlicher kognitiver Beschränkungen und biases. Das Nudging nutzt diese Abweichungen von

der Rationalität gezielt aus, um Individuen zu besseren Entscheidungen zu verhelfen, anstatt zu versuchen, sie als vollkommen rationale Wesen zu behandeln. Es ist eine Mechanik, die die Unregelmäßigkeiten des menschlichen Geistes berücksichtigt, nicht seine perfekte Regelmäßigkeit.

- **Interdisziplinärer Ansatz als Erweiterung, nicht Reduktion:** Die Verhaltensökonomie öffnet die Ökonomie für Erkenntnisse aus der Psychologie, den Neurowissenschaften (Neuroökonomie) und der Soziologie. Sie erkennt an, dass ökonomisches Verhalten nicht isoliert betrachtet werden kann, sondern von einer Vielzahl psychologischer, sozialer und biologischer Faktoren beeinflusst wird. Dies ist ein starker Kontrast zum reduktionistischen Ansatz des Physikalismus, der die Ökonomie auf ein enges Set von Annahmen über rationale Entscheidungen beschränkte. Die Verhaltensökonomie erweitert den Horizont, anstatt ihn zu verengen, auch wenn sie dabei naturwissenschaftliche Methoden einsetzt, um die komplexere menschliche Realität zu erforschen.
- **Begrenzte Vorhersagbarkeit im Sinne der Komplexität:** Durch die Anerkennung von Heuristiken, Biases und der Rolle von Emotionen in Entscheidungsprozessen akzeptiert die Verhaltensökonomie inhärente Grenzen der präzisen Vorhersagbarkeit individuellen und kollektiven ökonomischen Verhaltens. Sie ersetzt die Illusion absoluter Determinierbarkeit durch ein realistischeres Bild von Wahrscheinlichkeiten und Tendenzen, das die Rolle des Zufalls und der menschlichen Fehlbarkeit berücksichtigt. Dies steht eher im Einklang mit den Erkenntnissen der modernen Physik (z.B. Quantenmechanik, Chaostheorie), die die Grenzen des strikten Determinismus aufgezeigt haben, als mit dem klassischen Laplace'schen Dämon.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Verhaltensökonomie zwar methodologisch den Empirismus und die experimentelle Kontrolle der Naturwissenschaften adaptiert und in Ansätzen des Nudging eine "Mechanik" der Verhaltensbeeinflussung entwickelt, dies jedoch auf der Grundlage eines tiefgreifenden Verständnisses und der Akzeptanz menschlicher psychologischer Unvollkommenheiten geschieht. Sie stellt einen Bruch mit dem Normativismus der perfekt rationalen Modelle dar und ist eher eine Erweiterung des wissenschaftlichen Anspruchs durch Einbeziehung psychologischer Realitäten, als eine Fortsetzung des naiven Physikalismus der neoklassischen Ära. Sie sucht nach systematischen Mustern in der menschlichen Irrationalität, um relevantere ökonomische Erklärungen und Interventionen zu ermöglichen.

Teil III: Interaktionen und Konvergenzen: Die Rezeption physikalischer Denkweisen in der Ökonomie

Die Rezeption physikalischer Denkweisen in der Ökonomie war kein bloßer passiver Prozess der Imitation; vielmehr handelte es sich um eine aktive Aneignung, Transformation und manchmal auch um eine Verkenntung der ursprünglichen physikalischen Kontexte und ihrer epistemologischen Grenzen. Diese Interaktionen lassen sich in direkte Übernahmen von Konzepten und Analogien sowie in methodologische Parallelen und die damit verbundenen epistemologischen Herausforderungen gliedern.

Kapitel 5: Direkte Übernahmen und Analogien

Die Anziehungskraft der Physik auf die Ökonomie manifestierte sich nicht nur in der Übernahme einer allgemeinen wissenschaftlichen Attitüde oder der Mathematisierung, sondern auch in der expliziten Adaption spezifischer Konzepte und dem Gebrauch von weitreichenden Analogien, die das ökonomische Denken und die Sprache der Disziplin prägten.

5.1. Energie, Arbeit, Kraft: Physikalische Konzepte in ökonomischen Theorien

Im 19. Jahrhundert, mit dem Aufkommen der Thermodynamik und der zunehmenden Industrialisierung, begannen Ökonomen, Begriffe wie „Energie“, „Arbeit“ und „Kraft“ in ihre Analysen zu integrieren. Diese Übernahmen waren oft metaphorisch, zeugten aber von dem Bestreben, eine physikalische Basis für ökonomische Prozesse zu finden oder zumindest eine gemeinsame, „wissenschaftliche“ Sprache zu sprechen, die Objektivität suggerierte.

- **Energie:** In der Volkswirtschaftslehre wurde manchmal versucht, ökonomische Aktivität als eine Form von Energieumwandlung zu verstehen. Die Produktion wurde als ein Prozess gesehen, in dem „Input-Energie“ (Arbeit, Kapital, Rohstoffe, Brennstoffe) in „Output-Energie“ (Güter und Dienstleistungen) umgewandelt wird. Dies fand besonderen Ausdruck in der frühen Wirtschaftsgeographie und in Ansätzen der physiokratischen Schule, die sich mit der physischen Basis von Wirtschaftssystemen befassten. Die Effizienz von Produktionsprozessen wurde dann mit dem Wirkungsgrad von Energieumwandlungen verglichen (z.B. Wie viel nutzbare Energie wird in einem Produktionsprozess in Produkte umgewandelt?). Auch die Idee, dass Geld oder Kapital „Energie“ in das Wirtschaftssystem speisen, war eine verbreitete Metapher.
- **Arbeit:** Obwohl der Begriff der Arbeit in der Ökonomie eine lange Geschichte hat (z.B. als Quelle des Wertes bei Adam Smith und David Ricardo, oder als Faktor der Produktion), wurde er manchmal auch mit dem physikalischen Konzept der „Arbeit“ (Kraft mal Weg, die Übertragung von Energie) verglichen, insbesondere wenn es um die Effizienz und Produktivität von Produktionsprozessen oder die Messung des menschlichen Arbeitsaufwandes ging. Diese Analogie half, die Vorstellung von Arbeit als einer objektiv messbaren, physikalischen Größe zu verfestigen, die in Input-Output-Modellen verwendet werden konnte.
- **Kraft:** Die prominenteste und dauerhafteste Analogie ist die der „Kräfte“ von Angebot

und Nachfrage, die den Preis bilden. Diese Vorstellung ist zutiefst mechanistisch und bis heute ein Eckpfeiler der Mikroökonomie: Die Nachfragekräfte „ziehen“ die Preise nach oben (wenn Nachfrage das Angebot übersteigt), während die Angebotskräfte sie nach unten „drücken“ (wenn Angebot die Nachfrage übersteigt), bis ein Gleichgewicht erreicht ist, in dem sich die Kräfte aufheben und der Markt „geräumt“ ist. Der Preis wird als der Punkt verstanden, an dem sich die „Kräfte“ von Käufern und Verkäufern neutralisieren. Diese Analogie wurde nicht nur von frühen mathematischen Ökonomen wie Augustin Cournot (1801–1877), der 1838 als einer der ersten die Differentialrechnung auf Angebots- und Nachfragekurven anwandte, explizit genutzt, sondern ist bis heute fester Bestandteil der ökonomischen Terminologie und des Denkens. Die Vorstellung von ökonomischen „Schocks“ als externe Kraftstöße, die das System aus dem Gleichgewicht bringen, stammt ebenfalls aus dieser Analogie.

5.2. Systemtheorie und Kybernetik: Der Einfluss auf makroökonomische Modelle

Nach dem Zweiten Weltkrieg, insbesondere in den 1950er und 1960er Jahren, fanden Konzepte aus der **Systemtheorie** und der **Kybernetik** (die Lehre von der Steuerung und Regelung komplexer Systeme, ursprünglich von Norbert Wiener 1948 in seinem Werk *Cybernetics* begründet) Eingang in die Makroökonomie. Diese Disziplinen, die ihrerseits starke Wurzeln in der Ingenieurwissenschaft, der Physik (z.B. Regelungstechnik, Informationstheorie) und der Biologie hatten, boten neue Rahmenwerke zum Verständnis der Interdependenzen in großen, dynamischen Systemen. Sie versprachen die Möglichkeit, die Wirtschaft wie einen Mechanismus zu „steuern“.

- **Systemtheorie:** Die Volkswirtschaft wurde zunehmend als ein komplexes, dynamisches System verstanden, das aus interagierenden Subsystemen (Haushalte, Unternehmen, Staat, Ausland) besteht. Der Fokus verlagerte sich von der isolierten Analyse einzelner Märkte auf die Beziehungen, Rückkopplungsschleifen und Interdependenzen innerhalb des gesamten Systems. Dies führte zur Entwicklung von umfassenden makroökonomischen Modellen, die die gesamte Wirtschaft als ein System darstellten, das auf externe Schocks reagiert und sich durch interne Mechanismen anpasst. Ein Beispiel sind die **Input-Output-Modelle** von Wassily Leontief (1906–1999), die die Verflechtungen zwischen verschiedenen Sektoren einer Wirtschaft abbilden und auf physikalischen Bilanzgleichungen basieren. Diese Modelle wurden oft in Matrizenform dargestellt, was eine weitere Mathematisierung der Makroökonomie ermöglichte.
- **Kybernetik:** Die Kybernetik lieferte Konzepte wie „Regelkreise“, „Feedback-Mechanismen“ (positive und negative Rückkopplungen) und „Stabilität“. Diese Konzepte wurden genutzt, um zu verstehen, wie wirtschaftspolitische Maßnahmen (z.B. Zinsanpassungen durch Zentralbanken, fiskalische Ausgaben des Staates) als „Regler“ fungieren, um die Wirtschaft in einem gewünschten Zustand (z.B. Vollbeschäftigung, Preisstabilität, Wirtschaftswachstum) zu halten oder nach einer Störung zu einem Gleichgewicht zurückzuführen. Modelle des keynesianischen Kreuzes,

das IS-LM-Modell oder die frühen Phillips-Kurven-Modelle sind Beispiele für kybernetisch inspirierte Ansätze, die versuchen, die Dynamik der Gesamtwirtschaft durch eine Reihe von Gleichungen und Mechanismen zu steuern. Die berühmte „Phillips Machine“ (eine physikalische Maschine, die den Geldfluss in einer Wirtschaft simulierte) von A.W. Phillips (1914–1975) ist ein klares Beispiel für den Wunsch, ökonomische Prozesse mechanisch darzustellen. Die Vorstellung, dass Wirtschaftspolitik wie die Steuerung eines komplexen technischen Apparats funktioniert – mit optimaler Kontrolle und Feinabstimmung – war eine direkte Analogie zum Maschinenbau und zur Regelungstechnik, die ihren Ursprung in der Physik hatte.

5.3. Chaostheorie und Komplexität: Neue Perspektiven auf ökonomische Dynamiken

In den späten 1980er und 1990er Jahren, als die Grenzen der linearen Gleichgewichtsmodelle offensichtlich wurden, begannen einige Ökonomen, sich der **Chaostheorie** und der **Komplexitätstheorie** zuzuwenden. Diese Theorien, die ursprünglich in der Physik (z.B. Meteorologie mit Edward Lorenz' Arbeit zum Schmetterlingseffekt), Mathematik (z.B. Benoit Mandelbrot mit Fraktalen) und Biologie entwickelt wurden, boten neue Werkzeuge, um nichtlineare Dynamiken, Sensitivität gegenüber Anfangsbedingungen (der berühmte „Schmetterlingseffekt“) und das Emergenzverhalten komplexer, adaptiver Systeme zu untersuchen, die nicht auf einfache Gleichgewichtszustände zulaufen.

- **Chaostheorie:** Einige Ökonomen versuchten, chaotisches Verhalten in Wirtschaftsdaten (z.B. Börsenkurse, Wechselkurse oder Konjunkturzyklen) nachzuweisen und damit die Grenzen der Vorhersagbarkeit in ökonomischen Systemen zu erklären. Dies war eine Abkehr vom strengen, linearen Determinismus und der Annahme, dass kleine Ursachen immer kleine Wirkungen haben, aber immer noch eine Übernahme physikalisch-mathematischer Konzepte, um Unregelmäßigkeiten und scheinbare Zufälligkeiten zu modellieren und zu verstehen. Der Fokus lag auf der Tatsache, dass selbst deterministische Systeme (also ohne externe Zufallsgrößen) unvorhersehbares, komplexes Verhalten zeigen können, wenn sie nichtlinear sind und eine starke Abhängigkeit von Anfangsbedingungen aufweisen. Edward Ott's Arbeiten zur Kontrolle von Chaos (Chaos Control) wurden auch auf ökonomische Systeme übertragen, um zu untersuchen, wie man chaotische Dynamiken in einem gewünschten Bereich halten könnte.
- **Komplexitätstheorie:** Diese Theorie, eng verbunden mit dem **Santa Fe Institute (SFI)** in den USA, befasst sich mit Systemen, deren Verhalten nicht einfach aus dem Verhalten ihrer Einzelteile abgeleitet werden kann (Phänomen der **Emergenz**). Sie führte zu einem neuen Verständnis von Märkten als **adaptiven, nichtlinearen Systemen**. Statt perfekter Rationalität und der Konvergenz zu einem einzigen, statischen Gleichgewicht betonten Komplexitätsansätze die Rolle von Heterogenität der Akteure, Lernprozessen, Interaktionen, Rückkopplungsschleifen und der Emergenz von makroskopischen Mustern aus mikroskopischen Interaktionen. Dies führte zu einer lebhafteren und weniger statischen Sicht auf die Wirtschaft, weg von der reinen

Gleichgewichtsökonomie. Ein herausragendes Beispiel hierfür sind **Agenten-basierte Modelle**, die die Interaktionen individueller, heterogener Akteure mit einfachen Verhaltensregeln simulieren, um emergente Phänomene auf Makroebene zu verstehen (z.B. Finanzblasen, Innovationscluster, Ungleichheit), die in traditionellen Gleichgewichtsmodellen oft ignoriert oder als externe Schocks behandelt werden. Hierbei wird nicht mehr nach einem optimalen Gleichgewicht gesucht, sondern die Dynamik, Evolution und das nicht-lineare Verhalten des Systems über die Zeit untersucht. Die Komplexitätsökonomie erkannte an, dass ökonomische Systeme eher lebenden Organismen als starren Maschinen ähneln.

5.4. Entropie und ökonomische Entwicklung: Von der Ressourcennutzung zur Nachhaltigkeit

Das Konzept der **Entropie** aus der Thermodynamik, das die Tendenz eines abgeschlossenen Systems zur Zunahme von Unordnung, zur Zerstreuung von Energie und zur Abnahme der Verfügbarkeit nutzbarer Energie beschreibt (Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik), fand in der Ökonomie, insbesondere in der **ökologischen Ökonomie**, Resonanz und wurde zu einer zentralen kritischen Stimme gegenüber dem konventionellen ökonomischen Wachstumsmodell.

- **Nicholas Georgescu-Roegen (1906–1994):** Ein rumänisch-amerikanischer Ökonom und Mathematiker, und ein Pionier der ökologischen Ökonomie. In seinem bahnbrechenden Werk *The Entropy Law and the Economic Process* (1971) argumentierte Georgescu-Roegen, dass der ökonomische Prozess ein **fundamentaler entropischer Prozess** sei. Er betonte, dass die Wirtschaft nicht in einem unendlichen Kreislauf existieren kann, wie es in vielen neoklassischen Produktionsmodellen implizit angenommen wird, da Materie und Energie irreversibel von nutzbarer („Exergie“, niedrige Entropie) in unbrauchbare („Anergie“, hohe Entropie) Form überführt werden. Jeder Produktions- und Konsumprozess erhöht die Entropie des Gesamtsystems Erde, indem er Rohstoffe zerstreut und Energie in nicht mehr nutzbare Wärme umwandelt. Er kritisierte die neoklassische Ökonomie dafür, dass sie einen **„mechanistischen Irrweg“** eingeschlagen habe, der die Realität physikalischer Gesetze ignoriere, und dass sie die Wirtschaft als ein geschlossenes, sich wiederholendes Pendel verstehe, anstatt als einen irreversiblen Fluss.
- **Implikationen für Nachhaltigkeit:** Diese Perspektive unterstrich die **fundamentalen physikalischen Grenzen des Wirtschaftswachstums** angesichts endlicher, nicht erneuerbarer Ressourcen und der Notwendigkeit der Energieumwandlung. Georgescu-Roegen stellte damit die neoklassische Annahme des unbegrenzten Wachstums, der perfekten Substitution von Naturkapital durch menschengemachtes Kapital und der Möglichkeit des vollständigen Recyclings in Frage. Seine Arbeit hatte tiefgreifende Implikationen für das Verständnis von **Nachhaltigkeit** und die Notwendigkeit, ökonomische Modelle zu entwickeln, die die physikalischen und

thermodynamischen Grenzen des Planeten und die Irreversibilität von Umweltveränderungen berücksichtigen. Entropie wurde zu einer mächtigen Metapher und einem analytischen Werkzeug, um die ökologischen Kosten ökonomischer Aktivität und die Notwendigkeit eines Übergangs zu einer „Steady-State-Economy“ (stationären Wirtschaft) oder einer „Degrowth“-Bewegung zu verdeutlichen. Seine Ideen beeinflussten maßgeblich die Entwicklung der ökologischen Ökonomie als eigenständiger Forschungsrichtung.

Kapitel 6: Methodologische Parallelen und epistemologische Herausforderungen

Über die direkten Konzeptübernahmen und Analogien hinaus bestehen tiefere methodologische Parallelen zwischen Physik und Ökonomie, die sich in der Art und Weise manifestieren, wie beide Disziplinen Erkenntnisse generieren, validieren und interpretieren. Diese Parallelen bringen jedoch auch bedeutende epistemologische Herausforderungen mit sich, die die Frage aufwerfen, inwiefern physikalische Methoden auf die einzigartige Komplexität sozialer Systeme anwendbar sind.

6.1. Das Experiment in der Physik vs. das (Gedanken-)Experiment in der Ökonomie

Das **Experiment** ist der unangefochtene Goldstandard der physikalischen Forschung. Im kontrollierten Labor können Physiker Variablen isolieren, Störfaktoren eliminieren, kausale Beziehungen präzise testen und Hypothesen unter reproduzierbaren Bedingungen überprüfen. Das Experiment erlaubt die Falsifizierung von Theorien und die Generierung neuer Daten, die dann in die Theoriebildung einfließen. Es ist ein zentraler Pfeiler des empirischen Positivismus, der die Physik seit der wissenschaftlichen Revolution prägt und ihre beeindruckende Erfolgsgeschichte untermauert.

In der Ökonomie ist das Experiment in der reinen, physikalischen Form oft nicht möglich oder ethisch vertretbar, was zu einer grundlegenden methodologischen Divergenz führt:

- **Makroebene:** Man kann keine Nationalökonomie (oder Teile davon) in einem Reagenzglas isolieren, um die Auswirkungen einer Zinsänderung, einer Steuerreform oder einer neuen Handelspolitik zu testen, ohne unzählige andere Faktoren zu kontrollieren oder die Bevölkerung zu schädigen. Die Wirtschaft ist ein offenes System, das von unzähligen, nicht kontrollierbaren internen und externen Faktoren (politische Ereignisse, technologische Innovationen, Naturkatastrophen, kulturelle Veränderungen) beeinflusst wird.
- **Ethik und Komplexität:** Das Experimentieren mit realen Volkswirtschaften oder großen Teilen der Bevölkerung wäre ethisch inakzeptabel und aufgrund der inhärenten Komplexität, der Interdependenzen und der Reflexivität sozialer Systeme kaum zu kontrollieren oder zu interpretieren. Die menschliche Agency und Lernfähigkeit bedeutet, dass sich Systeme ständig anpassen, was die Idee eines statischen

Experimentierfeldes untergräbt.

Daher hat die Ökonomie traditionell auf andere Methoden zurückgegriffen, die den experimentellen Bedingungen der Physik zu ähneln versuchen:

- **Gedankenexperimente:** Adam Smiths „unsichtbare Hand“ ist ein berühmtes Gedankenexperiment. Neoklassische Modelle, die von rationalen Akteuren, perfekten Märkten oder vollständiger Information ausgehen, sind oft **Gedankenexperimente**, die eine idealisierte, vereinfachte Welt beschreiben, um logische Schlussfolgerungen über reale Märkte zu ziehen oder das Verhalten in theoretisch reinen Situationen zu erkunden. Diese erlauben die Erforschung theoretischer Implikationen und die Ableitung von „Gesetzen“ unter idealen Bedingungen, aber ihre Relevanz für die Realität hängt stark von der Gültigkeit und der Begründbarkeit der zugrunde liegenden Annahmen ab. Die Abweichung der Realität von diesen idealisierten Annahmen stellt eine ständige Herausforderung dar.
- **Natürliche Experimente:** In den letzten Jahrzehnten hat die Verwendung von „natürlichen Experimenten“ zugenommen. Ökonomen nutzen hierbei Situationen in der realen Welt, in denen zufällig oder quasi-zufällig eine Variable (z.B. eine Gesetzesänderung in einem Bundesstaat, aber nicht in einem benachbarten, der als Kontrollgruppe dienen kann) „isoliert“ werden kann, um ihre Auswirkungen zu studieren (z.B. Wirkung von Mindestlöhnen auf Beschäftigung, oder Effekte von Bildungsprogrammen). Die „Differenz-in-Differenzen“-Methode ist ein Beispiel hierfür. Diese Methode versucht, die Kontrollierbarkeit eines Laborexperiments im Feld nachzubilden, ist aber immer noch mit Störfaktoren behaftet.
- **Laborexperimente in der experimentellen Ökonomie:** In den letzten drei bis vier Jahrzehnten hat sich die experimentelle Ökonomie als eigenständiger Forschungszweig entwickelt, der Verhalten unter kontrollierten Laborbedingungen testet. Hier werden Probanden oft in stylisierten „Märkten“ oder „Spielen“ (z.B. Ultimatum-Spiel, Öffentliche-Güter-Spiele, Börsensimulationen) eingesetzt, um Entscheidungsprozesse, Kooperation, Vertrauen oder irrationales Verhalten zu untersuchen. Diese Experimente sind jedoch auf kleine Gruppen und künstliche Umgebungen beschränkt, und ihre Übertragbarkeit auf reale, komplexe Märkte mit ihren reichen institutionellen und kulturellen Kontexten ist Gegenstand ständiger Debatten.

Die epistemologische Herausforderung besteht darin, dass die mangelnde Möglichkeit zu streng kontrollierten Experimenten in der Ökonomie die Überprüfung kausaler Hypothesen erschwert, die empirische Evidenz oft ambivalenter ist und die Verlässlichkeit der Schlussfolgerungen geringer ist als in der Physik. Dies trägt zur wahrgenommenen „Softness“ der Ökonomie im Vergleich zur Physik bei und zu den Schwierigkeiten, Konsens über Modelle und Ergebnisse zu erzielen.

6.2. Modellbildung und Abstraktion: Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Sowohl Physik als auch Ökonomie nutzen **Modelle** als zentrale, unverzichtbare Werkzeuge zur Vereinfachung, Erklärung, Analyse und (im Idealfall) Vorhersage der Realität. Modelle sind vereinfachte, schematische Darstellungen der Welt, die die wichtigsten Beziehungen und Mechanismen abbilden sollen, um ein tieferes Verständnis zu ermöglichen.

- **Gemeinsamkeiten:**

- **Vereinfachung/Abstraktion:** In beiden Disziplinen dienen Modelle dazu, die immense Komplexität der realen Welt auf ihre wesentlichen Bestandteile zu reduzieren (Abstraktion). Sie zwingen dazu, Annahmen zu explizieren und sich auf die relevantesten Variablen und Beziehungen zu konzentrieren.
- **Hypothesenformulierung und Ableitung:** Modelle erlauben es, klare Hypothesen über kausale Zusammenhänge zu formulieren und die logischen Konsequenzen von Annahmen (oft in mathematischer Form) abzuleiten. Sie dienen als logische Gerüste.
- **Simulation und Prognose:** Sie ermöglichen es, die Auswirkungen von Veränderungen (z.B. Parameteranpassungen, Schocks) zu simulieren und (im Idealfall) Prognosen über zukünftige Zustände zu erstellen.
- **Mathematik als Sprache:** Die Mathematik ist die bevorzugte Sprache der Modellierung in beiden Feldern, da sie Präzision, Konsistenz und die Ableitung komplexer Implikationen ermöglicht.

- **Unterschiede:**

- **Natur der Annahmen:** Während physikalische Modelle oft auf fundamentalen, universellen Naturgesetzen und gut verstandenen materiellen Eigenschaften (z.B. Masse, Ladung, Gravitationskonstante) basieren, müssen ökonomische Modelle oft Annahmen über menschliches Verhalten (z.B. perfekte Rationalität, unbegrenzte Informationsverarbeitungskapazität, Maximierung des Nutzens/Gewinns), Präferenzen, Erwartungen und Institutionen treffen. Diese Annahmen sind weniger universell, stabiler und empirisch oft schwieriger zu begründen. Die „perfekte Rationalität“ oder „vollständige Information“ in vielen neoklassischen Modellen sind Idealisierungen, die in der realen Welt selten zutreffen und oft zu kritischen Verzerrungen führen.
- **Komplexität des Gegenstandes:** Physikalische Systeme können, selbst wenn sie komplex sind (z.B. Wetter, Turbulenz), oft durch eine überschaubare Anzahl von Naturgesetzen beschrieben werden, die universelle Gültigkeit besitzen. Ökonomische Systeme hingegen sind „offene“ Systeme, die von einer Vielzahl menschlicher (psychologischer, sozialer, kultureller, politischer, institutioneller) Faktoren beeinflusst werden, die sich ständig ändern und schwer zu quantifizieren sind. Menschen sind nicht Atome; sie lernen, ändern ihre Präferenzen, interagieren strategisch, sind von Emotionen beeinflusst, haben unterschiedliche Informationen und sind Teil komplexer sozialer und kultureller Kontexte. Dies macht die Annahme stabiler Parameter oder Verhaltensfunktionen fragwürdig.
- **Prädiktive Kraft vs. Erklärungsleistung:** Während die Physik oft eine beeindruckende prädiktive Kraft besitzt (z.B. Vorhersage von Planetenbahnen,

Entdeckung neuer Teilchen), ist die Vorhersagekraft ökonomischer Modelle oft notorisch begrenzt. Die ökonomische Modellierung ist manchmal stärker auf die Erklärungsleistung (z.B. Warum ist die Arbeitslosigkeit gestiegen?), die Identifizierung von Tendenzen oder das Verständnis von Mechanismen ausgerichtet als auf exakte Prognosen. Viele ökonomische Modelle sind eher metaphorisch; sie erzählen eine Geschichte über die Funktionsweise der Wirtschaft, die nicht unbedingt eine genaue Vorhersage von Zahlen erlaubt.

- **Validierung und Falsifizierung:** In der Physik können Modelle oft durch kontrollierte Experimente oder präzise Beobachtungen falsifiziert werden. In der Ökonomie ist dies aufgrund der oben genannten Schwierigkeiten (keine echten Labore, offene Systeme) viel schwieriger. Viele ökonomische Modelle sind nicht falsifizierbar oder können durch ad-hoc-Anpassungen vor Falsifizierung bewahrt werden.

6.3. Die Rolle von Vorhersage und Prognose in beiden Disziplinen

Die Fähigkeit zur präzisen Vorhersage ist ein wichtiges Kriterium für die Validität und den praktischen Nutzen wissenschaftlicher Theorien. Doch ihre Rolle und ihr Erfolg unterscheiden sich erheblich zwischen Physik und Ökonomie, was zu anhaltenden Debatten über den wissenschaftlichen Status der Ökonomie führt.

- **Vorhersage in der Physik:** Die Physik hat eine beeindruckende Geschichte präziser Vorhersagen, die von der Bewegung der Himmelskörper (z.B. Finsternisse, Kometenbahnen) über die Entdeckung neuer Teilchen (z.B. Neutrino, Higgs-Boson, das Positron) bis zur Entwicklung technologischer Anwendungen (z.B. Kernenergie, Laser, Halbleiter) reicht. Dies ist das Ergebnis von Theorien, die auf stabilen, universellen Naturgesetzen beruhen und in kontrollierten Experimenten mit hoher Präzision getestet werden können. Selbst in der Quantenmechanik, wo einzelne Ereignisse probabilistisch sind, sind Ensemble-Vorhersagen (z.B. die Zerfallsrate radioaktiver Isotope) äußerst präzise. Die Chaostheorie zeigt zwar Grenzen der Vorhersage in komplexen nichtlinearen Systemen auf (z.B. langfristige Wettervorhersage), aber diese Grenzen sind oft selbst gut verstanden und mathematisch definiert.
- **Vorhersage und Prognose in der Ökonomie:** Die ökonomische Prognose ist notorisch schwierig und oft ungenau, was nicht zuletzt durch die Finanzkrise 2008 erneut schmerzlich offensichtlich wurde. Trotz ausgefeilter ökonometrischer Modelle, riesiger Datenmengen und enormem intellektuellem Aufwand scheitern ökonomische Vorhersagen (z.B. über Rezessionen, Zinsentwicklungen, Inflation) regelmäßig und oft dramatisch. Die Nicht-Vorhersage der Finanzkrise 2008 durch die Mehrheit der Mainstream-Ökonomen ist ein prominentes Beispiel hierfür. Gründe für diese begrenztere Vorhersagekraft sind vielfältig:
 - **Reflexivität und Lernfähigkeit:** Ökonomische Agenten sind keine passiven Objekte. Sie lernen, passen ihr Verhalten an neue Informationen und sogar an die Vorhersagen von Ökonomen an. Eine Prognose kann dadurch selbst die Realität

verändern (z.B. selbsterfüllende Prophezeiungen oder selbstzerstörerische Prognosen). George Soros' **Reflexivitätstheorie** in Bezug auf Finanzmärkte betont diesen Effekt.

- **Fundamentale Unsicherheit und Innovation:** Die Zukunft ist nicht einfach eine Extrapolation der Vergangenheit. Menschliche Innovation, politische Entscheidungen, Naturkatastrophen, technologische Sprünge und psychologische Stimmungen können unvorhersehbare „Schocks“ erzeugen, die das System grundlegend verändern und nicht im Modell abgebildet sind. Das Konzept der „Radical Uncertainty“ (radikalen Unsicherheit) von Keynes betont die Nicht-Messbarkeit mancher zukünftiger Ereignisse.
- **Komplexe Rückkopplungen und Nichtlinearitäten:** Ökonomische Systeme sind nichtlinear und voller positiver und negativer Feedback-Schleifen, die selbst kleine Störungen verstärken oder dämpfen können, was exakte Langzeitprognosen unmöglich macht (ähnlich wie bei der Wettervorhersage). Die Dynamiken können chaotisch sein oder zu abrupten Übergängen (Tipping Points) führen.
- **Datenqualität und -verfügbarkeit:** Ökonomische Daten sind oft unvollständig, verzögert, durch Messfehler behaftet, nachträglich revidiert oder nur als Aggregat verfügbar, was die Präzision von Modellen weiter einschränkt. Die Granularität und die Qualität der Daten reichen oft nicht aus, um die Komplexität der Realität abzubilden.
- **Heterogenität der Akteure:** Im Gegensatz zu identischen physikalischen Teilchen sind Menschen heterogen in ihren Präferenzen, Informationen, Erwartungen und Lernfähigkeiten, was die Aggregation ihres Verhaltens in einfachen Modellen schwierig macht.

Die Sehnsucht nach physikalischer Vorhersagekraft hat die Ökonomie oft dazu verleitet, die intrinsische Komplexität, die menschliche Natur und die soziale Eingebettetheit ihrer Untersuchungsgegenstände zu unterschätzen.

6.4. Kritische Reflexion: Grenzen der Übertragbarkeit und Gefahren des Physikalismus

Die Übertragung physikalischer Konzepte, Methoden und epistemologischer Ideale in die Ökonomie, oft als „Physics Envy“ (Physik-Neid) oder **Physikalismus** bezeichnet (insbesondere kritisiert von Philip Mirowski in *More Heat than Light*, 1989), bedarf einer kritischen und differenzierten Reflexion. Während sie die Ökonomie zweifellos zu mehr Formalismus, analytischer Strenge und einer präziseren Argumentation anspornte, birgt sie auch erhebliche Gefahren und Limitationen für das Verständnis sozioökonomischer Realitäten:

- **Reduktionismus und Methodologischer Individualismus:** Die gefährlichste Tendenz ist die Reduktion der Komplexität menschlichen Verhaltens, sozialer Interaktionen und institutioneller Rahmenbedingungen auf einfache, mechanische oder deterministische Interaktionen rationaler, eigennütziger Individuen (methodologischer Individualismus).

Menschen sind keine Atome, deren Bewegung durch einfache Kräfte beschreibbar ist; sie sind lernende, interagierende, oft irrationale und emotional beeinflusste soziale Wesen, die in komplexen kulturellen, historischen und institutionellen Kontexten agieren. Diese Reduktion kann zu verzerrten oder unvollständigen Erklärungen führen.

- **Blinde Flecken und Vernachlässigung relevanter Faktoren:** Die Fixierung auf mathematisch modellierbare und quantifizierbare Variablen führte oft zur Vernachlässigung von Phänomenen, die schwer zu formalisieren sind, aber entscheidend für das Verständnis ökonomischer Realitäten:
 - **Irrationalität und Psychologie:** Die Verhaltensökonomie hat gezeigt, dass Menschen systematisch von rationalen Idealen abweichen (kognitive Verzerrungen, Heuristiken).
 - **Machtbeziehungen und Konflikte:** Ökonomische Interaktionen sind oft von Machtungleichgewichten geprägt, die in Gleichgewichtsmodellen selten adäquat abgebildet werden.
 - **Institutionen und Kultur:** Rechtssysteme, soziale Normen, Vertrauen, Traditionen und kulturelle Werte prägen ökonomisches Handeln fundamental, sind aber nicht leicht in mathematische Funktionen zu gießen.
 - **Ethische Überlegungen:** Die Behauptung einer „wertfreien“ Wissenschaft, die sich nur um Effizienz kümmert, ignoriert, dass ökonomische Entscheidungen und Modelle immer normative Implikationen für Verteilung, Gerechtigkeit und gesellschaftliche Ziele haben.
- **Falsche Präzision und illusionäre Vorhersagekraft:** Die Illusion von exakter Vorhersage und Kontrolle in einem Bereich, der von fundamentaler Unsicherheit, subjektiven Präferenzen und menschlicher Willkür geprägt ist, kann zu falschen politischen Empfehlungen und einem übermäßigen, unbegründeten Vertrauen in Modelle führen, deren Grenzen nicht erkannt werden. Ein mathematisch präzises Modell mit falschen oder unrealistischen Annahmen ist oft gefährlicher als ein weniger präzises, aber realistischeres, das die Komplexität der Realität anerkennt. Die Annahme effizienter Märkte und rationaler Erwartungen in der Finanzökonomie führte dazu, dass die Risiken vor 2008 massiv unterschätzt wurden.
- **Normative Implikationen und Ideologiekritik:** Modelle, die auf physikalischen Analogien beruhen, können implizit bestimmte normative Annahmen transportieren (z.B. die Effizienz freier Märkte als eine Art „Naturgesetz“, die Optimalität von Gleichgewichtszuständen) und diese als „wissenschaftliche Notwendigkeit“ erscheinen lassen. Dies verwischt die Grenze zwischen positiver Analyse (wie die Welt ist) und normativer Aussage (wie die Welt sein sollte) und kann dazu beitragen, bestimmte politische Agenden zu legitimieren und andere als „unwissenschaftlich“ zu diskreditieren.
- **Ahistorizität:** Viele physikalische Gesetze sind zeitlos und kontextunabhängig. Ökonomische Phänomene sind jedoch zutiefst historisch, kulturell und institutionell eingebettet. Das Ignorieren dieses Kontextes zugunsten universalistischer „Gesetze“ kann zu Annahmen führen, die in verschiedenen Gesellschaften oder Zeiten nicht zutreffen, und die Dynamik und Evolution von Systemen verkennen.

Die globale Finanzkrise von 2008 hat die Schwächen von Modellen, die von „perfekten Märkten“, „rationalen Erwartungen“ und „effizienten Märkten“ ausgehen, drastisch vor Augen geführt. Sie hat die Notwendigkeit einer realistischeren, pluralistischeren und weniger idealisierten Herangehensweise an die Ökonomie unterstrichen, die menschliche Fehlbarkeit, Unsicherheit und die Komplexität von Systemen anerkennt. Dies hat zu einer verstärkten Forderung nach **Methodenpluralismus** und einer breiteren Akzeptanz alternativer ökonomischer Ansätze geführt, die über den engen Rahmen des Physikalismus hinausgehen.

Teil IV: Genealogische Linien und zukünftige Perspektiven

Die genealogische Analyse der Interaktionen zwischen Physik und Ökonomie verdeutlicht, dass Wissenschaftsgeschichte nicht nur von der autonomen Entwicklung einzelner Disziplinen, sondern auch von der wechselseitigen Befruchtung, dem Ideentransfer und dem persönlichen Engagement von Wissenschaftlern an den Schnittstellen geprägt ist. Die Erkenntnisse aus der Geschichte beider Disziplinen bieten wertvolle Orientierungspunkte für die zukünftige Entwicklung der Ökonomie, insbesondere im Lichte der Herausforderungen des 21. Jahrhunderts.

Kapitel 7: Persönlichkeiten an den Schnittstellen: Biographische Skizzen und intellektuelle Pfade

Die Übertragung physikalischer Denkweisen in die Ökonomie ist untrennbar mit den Biographien und intellektuellen Pfaden einzelner Wissenschaftler verbunden, die oft eine Ausbildung in beiden Disziplinen hatten, an interdisziplinären Problemen arbeiteten oder zumindest stark von den Methoden und dem Ethos der jeweils anderen Disziplin beeinflusst wurden. Diese Persönlichkeiten waren entscheidende Brückenbauer zwischen den Wissensgebieten.

7.1. Ökonomen mit physikalischem Hintergrund (z.B. Irving Fisher, Vilfredo Pareto)

Viele Pioniere der mathematischen und neoklassischen Ökonomie hatten eine formale Ausbildung in den Naturwissenschaften, insbesondere in Mathematik und Physik, oder waren zutiefst von deren Methoden und ihrem Erfolg beeindruckt. Ihre Arbeiten spiegeln dieses Erbe in ihrer Methodologie und Terminologie wider.

- **Irving Fisher (1867–1947):** Einer der einflussreichsten amerikanischen Ökonomen des frühen 20. Jahrhunderts. Fisher hatte einen Abschluss in Mathematik und promovierte

1891 in Physik an der Yale University bei Josiah Willard Gibbs (1839–1903), einem der Begründer der statistischen Mechanik und der modernen Thermodynamik. Diese Ausbildung prägte sein ökonomisches Denken zutiefst. In seiner Dissertation *Mathematical Investigations in the Theory of Value and Prices* (1892), die von Gibbs stark beeinflusst wurde, nutzte Fisher explizit hydraulische Modelle, um ökonomische Gleichgewichtszustände zu veranschaulichen. Seine berühmte „Monetary Mill“ war ein komplexes mechanisches System aus Röhren und Flüssigkeiten, das die Wechselwirkungen im Geldmarkt simulierte und die Flusskonzepte des Kreislaufmodells der Physiokraten aufgriff. Seine Arbeiten zur Geldtheorie (Quantitätstheorie des Geldes), Zinstheorie (Zeitpräferenz) und zum Indexproblem (Preisindizes) sind von mathematischer Strenge und dem Versuch durchdrungen, ökonomische Phänomene in präzisen Gleichungen zu fassen. Fisher war überzeugt, dass ökonomische Gesetze die gleiche Präzision und Vorhersagekraft wie physikalische Gesetze erreichen könnten, wenn die richtigen mathematischen Methoden angewandt würden. Er sah die Ökonomie als eine Wissenschaft, die von „mathematischer Harmonie“ durchdrungen sei.

- **Vilfredo Pareto (1848–1923):** Ursprünglich ein ausgebildeter Ingenieur (Abschluss an der Polytechnischen Schule Turin 1870), wandte sich Pareto später der Ökonomie und Soziologie zu. Er übernahm 1893 den Lehrstuhl für Politische Ökonomie in Lausanne von Léon Walras, einem weiteren Ingenieur-Ökonom. Pareto baute auf den Konzepten der Grenznutzenschule auf und entwickelte die Konzepte des **Pareto-Optimums** (ein Zustand der effizienten Ressourcenallokation, der bis heute ein zentrales Kriterium für Effizienz in der Wohlfahrtsökonomie darstellt) und der **Pareto-Verteilung** (eine statistische Verteilung, die die Verteilung von Vermögen und Einkommen in vielen Gesellschaften überraschend gut beschreibt – ein frühes Beispiel für Power-Law-Verteilungen in sozialen Systemen, die später in der Ökonophysik wiederentdeckt wurden). Sein ökonomisches Denken war stark von der Vorstellung eines Gleichgewichtszustandes und der Anwendung mathematischer Methoden zur Beschreibung sozialer Phänomene beeinflusst. Seine mechanistischen Analogien, insbesondere im Gleichgewichtskonzept und der Beschreibung des sozialen Systems als „mechanisch“ agierend (sein **Soziologischer Kurs** von 1916 verwendet explizit physikalische Metaphern), sind unverkennbar. Er sah die Gesellschaft als ein komplexes System, dessen Dynamik durch mathematische Modelle erfasst werden könnte, ähnlich physikalischen Systemen, die auf ein Gleichgewicht zusteuern und deren soziale Kräfte messbar wären.

Weitere wichtige Figuren sind **Léon Walras** (1834–1910), der ebenfalls eine Ingenieurausbildung hatte (Polytechnische Schule Paris) und die allgemeine Gleichgewichtstheorie unter expliziter Anlehnung an das mechanische Gleichgewicht entwickelte, und **William Stanley Jevons** (1835–1882), der als Absolvent der University College London in Mathematik und Logik das Ideal einer „Mechanik des Nutzens“ verfolgte und sich offen an der Physik als Vorbild orientierte.

7.2. Physiker, die sich ökonomischen Fragen zugewandt haben (z.B. Stephen Jay Gould zur Pfadabhängigkeit, David Ruelle zur Ökonophysik)

Nicht nur Ökonomen schauten zur Physik auf, sondern auch einige Physiker, Mathematiker und andere Naturwissenschaftler wandten sich ökonomischen oder sozialwissenschaftlichen Fragen zu. Sie brachten oft neue Perspektiven, Methoden und einen kritischen Blick auf die etablierten Annahmen der Ökonomie mit, der manchmal zu fruchtbaren, manchmal zu kontroversen Ergebnissen führte.

- **Stephen Jay Gould (1941–2002):** Obwohl hauptsächlich Paläontologe und Evolutionsbiologe (Professor an der Harvard University), haben Goulds Arbeiten wichtige methodologische und philosophische Implikationen für die Ökonomie, insbesondere seine Betonung der **Pfadabhängigkeit** („contingency“) und des „punctuated equilibrium“ (punktualistisches Gleichgewicht – Perioden der Stasis, unterbrochen von schnellen, abrupten Veränderungen). In der Ökonomie bedeutet Pfadabhängigkeit, dass historische Ereignisse oder frühere Entscheidungen die zukünftige Entwicklung irreversibel beeinflussen können und alternative Entwicklungen ausschließen – selbst wenn diese ex post effizienter wären (z.B. die QWERTY-Tastatur, die sich durchgesetzt hat, obwohl andere Layouts effizienter sein mögen). Dies steht im Gegensatz zu den rein deterministischen Gleichgewichtsmodellen der Neoklassik, die implizieren, dass ein System unabhängig vom Pfad immer zum gleichen optimalen Endzustand (Gleichgewicht) zurückkehrt. Goulds Arbeit trug dazu bei, Ökonomen für die Bedeutung von Geschichte, irreversiblen Prozessen, Zufälligkeit und Unumkehrbarkeit in komplexen Systemen zu sensibilisieren und die Vorstellung eines universellen, pfadunabhängigen Konvergenzpunktes in Frage zu stellen.
- **David Ruelle (geb. 1935):** Ein bedeutender französisch-belgischer mathematischer Physiker, der fundamentale Beiträge zur Chaostheorie leistete (z.B. mit dem Ruelle-Takens-Attraktor, der die Entstehung von Turbulenz erklärt). Ruelle ist ein prominenter Vertreter der **Ökonophysik**, einem relativ jungen und wachsenden Forschungsfeld, das physikalische Konzepte und Methoden (insbesondere aus der statistischen Mechanik, Chaostheorie, den komplexen Systemen, der nichtlinearen Dynamik und der Phänomenologie von Vielteilchensystemen) auf ökonomische Phänomene anwendet. Ökonophysiker untersuchen beispielsweise die Verteilung von Vermögen und Einkommen (oft mit Power-Law-Verteilungen), die Dynamik von Finanzmärkten (z.B. Blasenbildung, „fat tails“ in Renditeverteilungen, die über die Normalverteilung hinausgehen), das Verhalten von Unternehmen oder die Entstehung von Netzwerken mit Methoden, die denen der Physik ähneln, wie z.B. stochastische Prozesse, Skaleninvarianz, kritische Phänomene oder die Analyse von Zeitreihen. Sie verwenden oft große Datensätze und Simulationsmodelle, um kollektives Verhalten und Aggregatphänomene zu analysieren, anstatt sich auf die individuelle Rationalität als Ausgangspunkt zu konzentrieren. Das Auftauchen der Ökonophysik in den 1990er Jahren (mit Gründungsfiguren wie Rosario Mantegna und H. Eugene Stanley) zeigt, dass der Transfer von Ideen nicht nur eine Einbahnstraße von der Physik zur Ökonomie war,

sondern in jüngster Zeit auch Physiker selbst das Potenzial ihrer Methoden für die Analyse ökonomischer Phänomene erkennen und in die Ökonomie „importieren“, oft mit einem kritischen Blick auf die etablierten ökonomischen Paradigmen.

Ein weiterer wichtiger interdisziplinärer Akteur war **Benoit Mandelbrot** (1924–2010), der als Mathematiker und Begründer der Fraktalgeometrie ebenfalls physikalische und mathematische Konzepte auf Finanzmärkte anwandte (*The (Mis)Behavior of Markets*, 2004) und zeigte, dass traditionelle Modelle (z.B. normalverteilte Renditen) die Realität von Finanzmärkten unzureichend erfassen.

7.3. Interdisziplinäre Netzwerke und der Austausch von Ideen

Der Austausch zwischen Physik und Ökonomie fand nicht nur über einzelne Persönlichkeiten statt, sondern wurde auch durch die Bildung informeller und formaler **interdisziplinärer Netzwerke** befördert. Diese Netzwerke schufen Räume für den Dialog, die Kooperation und die Verbreitung von Ideen jenseits disziplinärer Grenzen, was entscheidend für die Etablierung neuer Forschungsfelder war. Dies umfasste:

- **Akademische Zirkel und Seminare:** Von informellen Diskussionsrunden bis zu strukturierten Seminaren an Universitäten und Forschungsinstituten, in denen Wissenschaftler beider Disziplinen zusammenkamen und ihre Forschungsergebnisse austauschten. Solche Treffen waren oft entscheidend, um die „Sprachbarrieren“ zwischen den Disziplinen zu überwinden und ein gemeinsames Verständnis für Problemstellungen und Methoden zu entwickeln.
- **Spezialisierte Zeitschriften und Konferenzen:** Insbesondere mit der Entstehung der Ökonophysik und der Komplexitätsökonomie entwickelten sich spezialisierte Publikationsorgane (z.B. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* entwickelte einen eigenen Bereich für Ökonophysik; das *Journal of Economic Dynamics and Control* befasst sich mit dynamischen und komplexen Modellen) und regelmäßige Konferenzen (z.B. die Konferenzen zur Ökonophysik), die einen aktiven Dialog und die Publikation von Forschungsergebnissen an der Schnittstelle förderten.
- **Interdisziplinäre Institute und Forschungszentren:** Das **Santa Fe Institute (SFI)** in New Mexico, USA, gegründet 1984, ist ein herausragendes Beispiel für ein solches Zentrum. Es wurde explizit gegründet, um die Forschung an komplexen adaptiven Systemen zu fördern und brachte Physiker, Biologen, Ökonomen, Informatiker, Mathematiker und andere Wissenschaftler zusammen, um gemeinsam an Problemen wie der Dynamik von Ökosystemen, der Evolution von Technologien, der Entstehung von Leben oder dem Verhalten von Finanzmärkten zu arbeiten. Das SFI wurde zu einem Hotspot für die Entwicklung der Komplexitätsökonomie und hat maßgeblich dazu beigetragen, physikalisch inspirierte Methoden in die Wirtschaftswissenschaften zu tragen und eine neue Generation interdisziplinärer Forscher auszubilden.
- **Gemeinsame Forschungsprojekte und Förderprogramme:** Diese förderten die direkte Zusammenarbeit von Physikern, Mathematikern und Ökonomen, um komplexe

ökonomische Probleme mit neuen Methoden anzugehen und die Grenzen traditioneller Ansätze zu überwinden.

Diese Netzwerke waren und sind entscheidend für die Diffusion und Weiterentwicklung von physikalisch inspirierten Denkweisen in der Ökonomie und umgekehrt. Sie zeigen, dass Wissenschaftsgeschichte nicht nur von einzelnen Genies oder isolierten Schulen, sondern auch von kollektiven intellektuellen Prozessen, der Etablierung neuer Felder und der institutionalisierten Förderung interdisziplinärer Zusammenarbeit geprägt ist, die oft die größten Innovationen hervorbringt.

Kapitel 8: Fazit und Ausblick

Die vorliegende genealogische Studie hat die tiefgreifenden, vielschichtigen und oft impliziten Verbindungen zwischen der Physik und der Ökonomie nachgezeichnet. Sie hat gezeigt, wie physikalische Denkweisen, Modelle, Methoden und Metaphern die Entwicklung der ökonomischen Theorie seit den Anfängen der wissenschaftlichen Revolution bis zur Schwelle des 21. Jahrhunderts maßgeblich beeinflusst haben und weiterhin prägen. Die Analyse der historischen Pfade dieses Ideentransfers ermöglicht eine differenzierte und kritische Würdigung der Stärken und Schwächen, der Potenziale und der Limitationen, die sich aus der „Physikalisierung“ der Ökonomie ergeben.

8.1. Zusammenfassung der wichtigsten genealogischen Linien und ihrer Implikationen

Wir haben festgestellt, dass die Ökonomie in ihrem Streben nach wissenschaftlicher Legitimität, Präzision, Vorhersagekraft und dem Ideal eines allgemeingültigen Wissens immer wieder zur Physik aufblickte und deren methodologisches Ideal adaptierte. Die wichtigsten genealogischen Linien und deren Implikationen sind:

- **Das mechanistische Weltbild und das Gleichgewichtsparadigma:** Die Vorstellung, dass die Wirtschaft wie eine präzise, selbstregulierende Maschine funktioniert, die durch universelle Kräfte gesteuert wird und zu einem (optimalen) Gleichgewicht tendiert, ist eine direkte und tief verwurzelte Übernahme aus der Newtonschen Mechanik. Dies manifestierte sich prominent in Konzepten wie der „unsichtbaren Hand“ Adam Smiths und kulminierte in der mathematisch rigorosen allgemeinen Gleichgewichtstheorie Léon Walras' und ihrer Weiterentwicklung im 20. Jahrhundert. Dieses Paradigma verlieh der Ökonomie eine scheinbare Ordnung, Stabilität und mathematische Eleganz, konnte aber die intrinsische Dynamik, die Volatilität, die Krisenhaftigkeit und die evolutionären Aspekte realer Ökonomien oft nicht adäquat erklären oder abbilden. Es tendierte dazu, Instabilitäten als externe Schocks oder Irregularitäten zu interpretieren, anstatt als inhärente Eigenschaften des Systems.
- **Die Mathematisierung als Erkenntnisweg und Garant für „Wissenschaftlichkeit“:**

Die Übernahme der Mathematik als die präferierte Sprache zur Beschreibung und Analyse ökonomischer Phänomene, analog zur Physik, führte zu einer beispiellosen Formalisierung der ökonomischen Theorie. Von den frühen Anwendungen der Infinitesimalrechnung in der Grenznutzenschule bis zur Entwicklung komplexer ökonometrischer Modelle, der Optimierungstheorie und der Spieltheorie wurde Mathematik zum integralen und oft dominanten Bestandteil der ökonomischen Argumentation. Während dies zweifellos die analytische Strenge und logische Kohärenz erhöhte, birgt es auch die Gefahr, dass die mathematische Eleganz über die empirische Relevanz, die Realitätsnähe der Annahmen oder die inhaltliche Bedeutung gestellt wird. Die „Schönheit“ des Modells konnte wichtiger werden als seine Erklärungskraft für die komplexe soziale Wirklichkeit.

- **Der Determinismus und die Sehnsucht nach exakter Vorhersagbarkeit:** Die Annahme, dass ökonomische Entwicklungen, wenn nur genügend Daten und die richtigen Modelle vorhanden wären, ebenso präzise vorhergesagt werden könnten wie physikalische Prozesse, war ein starkes, wenn auch oft unerfülltes Ideal. Die Grenzen dieser Vorhersagbarkeit in komplexen sozialen Systemen – bedingt durch Reflexivität, fundamentale Unsicherheit, menschliche Agency und nichtlineare Dynamiken – wurden erst durch die Finanzkrise von 2008 und die Erkenntnisse aus Chaostheorie und Komplexitätswissenschaften schmerzlich deutlich. Die Krise offenbarte die Zerbrechlichkeit von Modellen, die eine zu große Vorhersagekraft beanspruchten.
- **Die Suche nach universellen, zeitlosen Gesetzen:** Das Streben nach der Entdeckung von „Naturgesetzen“ der Ökonomie, vergleichbar den Gesetzen der Gravitation oder Thermodynamik, prägte das Selbstverständnis der Ökonomie als „wertfreie“ und „objektive“ Wissenschaft. Diese Suche führte jedoch oft zu einer Vernachlässigung des historischen, kulturellen, institutionellen und politischen Kontextes, der ökonomische Phänomene maßgeblich prägt und der sich über die Zeit wandelt. Dies führte zu Modellen, die möglicherweise in einem spezifischen historischen Kontext relevant waren, aber keine universelle Gültigkeit beanspruchen konnten.
- **Die Rezeption neuer physikalischer Paradigmen:** Die Ökonomie hat kontinuierlich neue Entwicklungen der Physik rezipiert und sich von diesen inspirieren lassen. Von der Thermodynamik (Entropie und ihre Implikationen für Ressourcen und Nachhaltigkeit) über die Systemtheorie und Kybernetik (Feedback-Mechanismen in makroökonomischen Modellen zur Steuerung der Wirtschaft) bis hin zur Chaostheorie und Komplexitätstheorie (nichtlineare Dynamiken, Pfadabhängigkeit, Agenten-basierte Modellierung) – diese Rezeption führte zu einer Diversifizierung der ökonomischen Modellierung und einem zunehmenden Verständnis für die Grenzen des klassischen Gleichgewichtsparadigmas. Diese jüngeren Strömungen versuchen, die Komplexität und Dynamik ökonomischer Systeme besser abzubilden, indem sie von starren physikalischen Analogien abweichen und sich stattdessen an den Phänomenen der Selbstorganisation und Emergenz orientieren.

Die Implikationen dieser Transfers sind vielfältig. Einerseits hat die Orientierung an der Physik zweifellos zu einer höheren Präzision, Formalisierung und analytischen Strenge in der

Ökonomie geführt, die für eine komplexe Disziplin notwendig ist. Andererseits birgt sie die Gefahr, die intrinsische Komplexität, die menschliche Natur, die soziale Eingebettetheit und die normativen Dimensionen der Realität zu reduzieren, normative Annahmen hinter einer scheinbar objektiven, wissenschaftlichen Fassade zu verbergen und somit blinde Flecken in der Analyse zu erzeugen, die in Krisenzeiten dramatische Folgen haben können.

8.2. Kritische Würdigung der "Physikalisierung" der Ökonomie

Die „Physikalisierung“ der Ökonomie, oft unreflektiert und mit einem gewissen „Physik-Neid“ vorangetrieben, muss kritisch und differenziert gewürdigt werden. Während sie in einigen Bereichen zu fruchtbaren Erkenntnissen und einer verbesserten analytischen Kapazität führte, birgt sie auch erhebliche Risiken und Limitationen für das Verständnis sozioökonomischer Realitäten:

- **Problematischer Reduktionismus und Methodologischer Individualismus:** Die gefährlichste Tendenz ist die oft übermäßige Reduktion der Komplexität menschlichen Verhaltens, sozialer Interaktionen und institutioneller Rahmenbedingungen auf einfache, mechanische oder deterministische Interaktionen rationaler, eigennütziger Individuen. Menschen sind keine passiven Teilchen, deren Bewegung durch einfache Kräfte beschreibbar ist; sie sind lernende, interagierende, oft irrationale und emotional beeinflusste soziale Wesen, die in komplexen, sich wandelnden kulturellen, historischen und institutionellen Kontexten agieren. Diese Reduktion kann zu verzerrten, unvollständigen oder gar falschen Erklärungen führen, die die eigentlichen Dynamiken sozialer Systeme nicht erfassen.
- **Blinde Flecken und Vernachlässigung relevanter Faktoren:** Die Fixierung auf mathematisch modellierbare und quantifizierbare Variablen führte oft zur Marginalisierung oder gänzlichen Vernachlässigung von Phänomenen, die schwer zu formalisieren sind, aber entscheidend für das Verständnis ökonomischer Realitäten:
 - **Irrationalität und Psychologie:** Die Verhaltensökonomie (seit den Arbeiten von Daniel Kahneman und Amos Tversky) hat empirisch und experimentell gezeigt, dass Menschen systematisch und vorhersehbar von rationalen Idealen abweichen (kognitive Verzerrungen, Heuristiken, Herdenverhalten).
 - **Machtbeziehungen und Konflikte:** Ökonomische Interaktionen sind untrennbar mit Machtungleichgewichten verbunden, die in abstrakten Gleichgewichtsmodellen selten adäquat abgebildet werden. Konflikte über Verteilung oder Institutionen sind zentrale ökonomische Phänomene.
 - **Institutionen und Kultur:** Rechtssysteme, soziale Normen, Vertrauen, Traditionen, Werte und kulturelle Praktiken prägen ökonomisches Handeln fundamental und bestimmen, wie Märkte funktionieren oder wie Ressourcen allokiert werden. Diese sind jedoch nicht leicht in mathematische Funktionen zu gießen oder als Konstanten anzunehmen.
 - **Ethische und normative Dimensionen:** Die Behauptung einer „wertfreien“

Wissenschaft, die sich nur um Effizienz oder Wachstum kümmert, ignoriert, dass ökonomische Entscheidungen und Modelle immer normative Implikationen für Verteilung, Gerechtigkeit, Nachhaltigkeit und gesellschaftliche Ziele haben. Die Physik beschreibt, *wie* die Welt ist; die Ökonomie muss aber auch die Frage beantworten, *wie* sie sein sollte, was normative Fragen unumgänglich macht und eine reine Imitation der Physik schwierig macht.

- **Falsche Präzision und illusionäre Vorhersagekraft:** Die Illusion von exakter Vorhersage und Kontrolle in einem Bereich, der von fundamentaler Unsicherheit, subjektiven Präferenzen, menschlicher Willkür und komplexen Nichtlinearitäten geprägt ist, kann zu falschen politischen Empfehlungen und einem übermäßigen, unbegründeten Vertrauen in Modelle führen, deren Grenzen nicht erkannt werden. Ein mathematisch präzises Modell mit falschen oder unrealistischen Annahmen ist oft gefährlicher als ein weniger präzises, aber realistischeres, das die Komplexität der Realität anerkennt. Die Unfähigkeit vieler ökonomischer Modelle (insbesondere der Modelle des effizienten Marktes und der rationalen Erwartungen), die Finanzkrise von 2008 vorherzusagen oder gar zu erklären, ist ein schlagendes Beispiel für diese „falsche Präzision“ und das Scheitern eines zu starren wissenschaftlichen Ideals.

Die globale Finanzkrise von 2008 hat die Schwächen von Modellen, die von „perfekten Märkten“, „rationalen Erwartungen“ und „effizienten Märkten“ ausgehen, drastisch vor Augen geführt. Sie hat die Notwendigkeit einer realistischeren, pluralistischeren und weniger idealisierten Herangehensweise an die Ökonomie unterstrichen, die menschliche Fehlbarkeit, Unsicherheit, die Rolle von Institutionen und die Komplexität von Systemen anerkennt. Dies hat zu einer verstärkten Forderung nach **Methodenpluralismus**, interdisziplinärer Öffnung und einer breiteren Akzeptanz alternativer ökonomischer Ansätze geführt, die über den engen Rahmen des Physikalismus hinausgehen.

8.3. Potenziale für eine zukünftige interdisziplinäre Forschung

Trotz der kritischen Würdigung birgt die zukünftige interdisziplinäre Forschung zwischen Physik, Mathematik und Ökonomie weiterhin großes Potenzial, insbesondere in Bereichen, die über das klassische Gleichgewichtsmodell und lineare Kausalitäten hinausgehen und die inhärente Komplexität und Dynamik ökonomischer Systeme ernst nehmen. Es geht nicht darum, die Physik zu kopieren, sondern von ihrer Strenge und ihren analytischen Werkzeugen zu lernen, diese aber auf sozial adäquate Weise anzupassen.

- **Komplexitätsökonomie:** Dieser Ansatz ist wohl der vielversprechendste Schnittpunkt. Die Anwendung von Methoden aus der Physik der komplexen Systeme (z.B. Agenten-basierte Modelle, Netzwerkanalysen, Simulationen nichtlinearer Dynamiken, Theorie der Selbstorganisation) kann ein besseres Verständnis von Phänomenen wie Marktstabilität und -instabilität, Finanzkrisen, der Verbreitung von Innovationen, dem Wachstum von Städten, der Entstehung von Ungleichheiten oder der Evolution von Institutionen ermöglichen. Dieser Ansatz erkennt an, dass makroökonomische

Phänomene aus den dezentralen, oft nicht-linearen Interaktionen vieler heterogener Akteure entstehen. Es geht nicht um Optimierung, sondern um das Verständnis von Emergenz und Dynamik.

- **Ökonophysik:** Die Zusammenarbeit zwischen Physikern und Ökonomen kann neue statistische Methoden und Analyseverfahren für Wirtschaftsdaten liefern, insbesondere im Bereich der Finanzmärkte, wo die Datenmengen riesig sind und traditionelle ökonometrische Modelle oft versagen. Dies umfasst die Analyse von „Fat Tails“ in Renditeverteilungen (die auf extreme Ereignisse hindeuten), die Modellierung von Blasen und Crashes mit Phänomenen der kritischen Übergänge und die Untersuchung von Herdenverhalten mit Methoden der statistischen Mechanik, die kollektives Verhalten in Systemen mit vielen interagierenden Teilchen beschreiben.
- **Verhaltensökonomie und Neuroökonomie:** Obwohl nicht direkt physikalisch, kann die Verhaltensökonomie durch die Kombination mit komplexen Systemansätzen und neurowissenschaftlichen Erkenntnissen neue Einblicke in nicht-rationale Entscheidungsprozesse, kognitive Verzerrungen und deren kumulative Auswirkungen auf Märkte bieten. Sie erkennt an, dass menschliches Verhalten von Emotionen, Heuristiken, sozialen Normen und biologischen Prozessen beeinflusst wird, was die einfachen Rationalitätsannahmen in Frage stellt.
- **Umwelt- und Ressourcenökonomie:** Die konsequente Anwendung von thermodynamischen Prinzipien und Konzepten wie Entropie ist entscheidend, um die physikalischen Grenzen des Wirtschaftswachstums zu verstehen und nachhaltige Wirtschaftssysteme zu gestalten. Dies erfordert eine Abkehr von der Vorstellung unbegrenzter Substitution von Naturkapital durch menschengemachtes Kapital und ein realistisches Verständnis der Energie- und Stoffkreisläufe im anthropozänen Zeitalter.
- **Computational Economics und Big Data:** Die Nutzung von Hochleistungsrechnen, maschinellem Lernen und Big Data, oft inspiriert von Methoden der theoretischen Physik, Informatik und Statistik, um komplexe ökonomische Modelle zu simulieren, zu testen und Muster in großen Datensätzen zu finden, die analytisch nicht lösbar wären. Dies ermöglicht eine „datengestützte“ Forschung, die weniger auf a priori Annahmen basiert.
- **Theorie der Netzwerke:** Die Analyse von ökonomischen Netzwerken (z.B. Handelsnetzwerke, Finanzverflechtungen, soziale Netzwerke) unter Verwendung von Methoden der Netzwerktheorie, die ihren Ursprung in der statistischen Physik hat, kann Aufschluss über die Robustheit von Systemen, die Ausbreitung von Schocks oder die Rolle von Zentralität geben.

8.4. Offene Fragen und weitere Forschungsansätze

Diese Studie wirft zahlreiche offene Fragen auf und bietet Ansätze für weitere Forschung, die über die bisherigen Erkenntnisse hinausgehen und die Disziplinen noch stärker miteinander verbinden könnten, um eine robustere und relevantere ökonomische Wissenschaft zu gestalten:

- Die Rolle von **nicht-linearen Dynamiken, Feedback-Schleifen** und **Tipping Points** in ökonomischen Systemen verdient weitere detaillierte Aufmerksamkeit, insbesondere in Bezug auf die Entstehung von Stabilität und Instabilität, Finanzkrisen und Konjunkturzyklen. Wie können wir Systeme entwerfen, die inhärent resilienter gegenüber Schocks sind, anstatt nur auf externe Ereignisse zu reagieren?
- Eine tiefergehende Untersuchung der **epistemologischen Brüche und Kontinuitäten** im Übergang von physikalischen zu ökonomischen Modellen ist erforderlich. Wann ist eine Analogie hilfreich und lehrreich, und wann führt sie in die Irre und zu falschen Schlussfolgerungen? Wie können wir die metaspezifischen Annahmen, die wir aus anderen Disziplinen übernehmen, kritisch hinterfragen und ihre Angemessenheit für den ökonomischen Kontext beurteilen?
- Die Analyse, wie **kulturelle und institutionelle Kontexte** die Rezeption physikalischer Ideen in der Ökonomie beeinflusst haben, könnte weitere spannende Einblicke liefern. Warum wurden bestimmte physikalische Paradigmen in bestimmten ökonomischen Schulen oder Ländern bevorzugt oder abgelehnt? Welche gesellschaftlichen Entwicklungen begünstigten bestimmte wissenschaftliche Paradigmen?
- Die empirische Überprüfung der Vorhersagekraft physikalisch inspirierter Modelle in der Ökonomie bleibt eine zentrale Aufgabe. Welche Modelle liefern unter welchen Bedingungen die besten Prognosen und Erklärungen? Und wie können wir die intrinsischen Grenzen der Vorhersagbarkeit in sozialen Systemen transparent machen und kommunizieren, anstatt eine Illusion der Kontrolle zu erzeugen?
- Die Integration von Konzepten aus der **theoretischen Biologie** (z.B. Evolutionstheorie, Ökologie, komplexe adaptive Systeme) könnte für die Ökonomie, die sich mit adaptiven und sich entwickelnden Systemen befasst, ebenso fruchtbar sein wie die Physik, da biologische Systeme oft komplexer und weniger deterministisch sind als rein physikalische. Evolutionäre Ökonomie ist hier ein vielversprechendes Feld.
- Die Frage der **Macht und Ethik** innerhalb ökonomischer Modelle ist entscheidend und muss expliziter angesprochen werden. Wenn Modelle die Realität vereinfachen, welche Aspekte werden dabei unsichtbar gemacht, und welche normativen Implikationen ergeben sich daraus für Politik und Gesellschaft? Eine historisch informierte und philosophisch reflektierte Ökonomie sollte sich dieser Fragen bewusst sein.

Letztlich zeigt die genealogische Studie, dass die Ökonomie eine dynamische Disziplin ist, die sich in einem ständigen Dialog mit anderen Wissensgebieten und mit ihrer eigenen Geschichte befindet. Die Beziehung zur Physik war dabei eine der prägendsten, da sie das Ideal wissenschaftlicher Erkenntnis in der Neuzeit definierte und die ökonomische Methodologie tiefgreifend beeinflusste. Das Verständnis dieser Historie ist entscheidend, um die Zukunft der ökonomischen Wissenschaft kritisch und konstruktiv zu gestalten – nicht indem man die Physik blind kopiert, sondern indem man ihre analytische Stärke mit einem tiefen Verständnis für die einzigartige Komplexität, die menschliche Natur und die soziale Eingebettetheit ökonomischer Systeme verbindet. Nach den Lehren der Finanzkrise 2008 ist ein Paradigmenwechsel, der zu einer pluralistischeren, realistischeren und ethisch bewussteren Ökonomie führt, dringlicher denn je, um die großen Herausforderungen unserer

Zeit adäquat anzugehen.

Literaturverzeichnis

- Aristoteles. (4. Jh. v. Chr.). *Physik*.
- Arrow, K. J., & Debreu, G. (1954). Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy. *Econometrica*, 22(3), 265–290.
- Bentham, J. (1789). *An Introduction to the Principles of Morals and Legislation*.
- Carnot, S. (1824). *Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu*.
- Clausius, R. (1850). *Über die bewegende Kraft der Wärme und die Gesetze, welche sich daraus für die Wärmelehre selbst ableiten lassen*.
- Crouch, R. L. (1993). *The Theoretical Roots of the Economic Crisis*. Cambridge University Press.
- Foucault, M. (1971). *Nietzsche, Genealogy, History*. In: D. F. Bouchard (Hrsg.), *Language, Counter-Memory, Practice*. Cornell University Press.
- Galilei, G. (1632). *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*.
- Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. Harvard University Press.
- Gould, S. J. (1989). *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*. W. W. Norton & Company.
- Hicks, J. R. (1939). *Value and Capital: An Inquiry into Some Fundamental Principles of Economic Theory*. Clarendon Press.
- Jevons, W. S. (1871). *The Theory of Political Economy*.
- Kahneman, D., & Tversky, A. (1979). Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk. *Econometrica*, 47(2), 263–291.
- Keynes, J. M. (1936). *The General Theory of Employment, Interest and Money*. Macmillan.
- Kuhn, T. S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press.
- Laplace, P. S. (1814). *Essai philosophique sur les probabilités*.
- Leontief, W. W. (1941). *The Structure of American Economy, 1919-1929: An Empirical Application of Equilibrium Analysis*. Harvard University Press.
- Lucas, R. E. (1976). Econometric Policy Evaluation: A Critique. In: K. Brunner & A. H. Meltzer (Hrsg.), *The Phillips Curve and Labor Markets*. Carnegie-Rochester Conference Series on Public Policy, 1, 19–46.
- Mandelbrot, B. B. (2004). *The (Mis)Behavior of Markets: A Fractal View of Risk, Ruin, and Reward*. Basic Books.
- Marshall, A. (1890). *Principles of Economics*.
- Maxwell, J. C. (1873). *A Treatise on Electricity and Magnetism*.
- Menger, C. (1871). *Grundsätze der Volkswirtschaftslehre*.
- Mirowski, P. (1989). *More Heat than Light: Economics as Social Physics, Physics as Nature's Economics*. Cambridge University Press.
- Mun, T. (1664). *England's Treasure by Foreign Trade*.
- Newton, I. (1687). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*.
- Pareto, V. (1896-1897). *Cours d'économie politique*.

- Phillips, A. W. (1958). The Relation Between Unemployment and the Rate of Change of Money Wage Rates in the United Kingdom, 1861–1957. *Economica*, 25(100), 283–299.
- Quesnay, F. (1758). *Tableau économique*.
- Ruelle, D. (1991). *Chance and Chaos*. Princeton University Press.
- Samuelson, P. A. (1947). *Foundations of Economic Analysis*.
- Samuelson, P. A. (1948). *Economics: An Introductory Analysis*.
- Smith, A. (1759). *The Theory of Moral Sentiments*.
- Smith, A. (1776). *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*.
- Soros, G. (1987). *The Alchemy of Finance: Reading the Mind of the Market*. Simon & Schuster.
- Tinbergen, J. (1939). *Business Cycles in the United States of America, 1919–1932*. League of Nations.
- Walras, L. (1874/1877). *Éléments d'économie politique pure*.
- Wiener, N. (1948). *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*.